

การทำความสะอาดถ่านหินแม่เมาะโดยการรวมกลุ่มกับน้ำมัน



นางสาวปิ่นธนา แสงจันทร์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2542

ISBN 974-332-751-7

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CLEANING OF MAE MOH COAL BY OIL AGGLOMERATION



Miss Piluntana Sangchan

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

Department of Chemical Technology

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 1999

ISBN 974-332-751-7

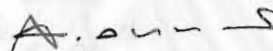
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การทำความสะอาดถ่านหินแม่เมาะโดยการรวมกลุ่มกับน้ำมัน
โดย นางสาวปิ่นธนา แสงจันทร์
ภาควิชา เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษา ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรณ ประศาสน์สารกิจ

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการ
ศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุชาดา กิระนันท์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



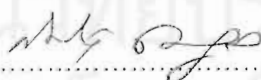
.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ กัญญา บุญเกียรติ)



.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรณ ประศาสน์สารกิจ)



.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบุญ)



.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปิลันธนา แสงจันทร์ : การทำความสะอาดถ่านหินแม่เมาะโดยการรวมกลุ่มกับน้ำมัน (CLEANING OF MAE MOH COAL BY OIL AGGLOMERATION) อ.ที่ปรึกษา : ศ.ดร.ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ; 100 หน้า. ISBN 974-332-751-7.

การรวมกลุ่มกับน้ำมันเป็นกระบวนการทางกลที่ใช้ทำความสะอาดถ่านหิน อาศัยการผสมน้ำมันลงในสารแขวนลอยของถ่านหินในสารละลาย น้ำมันที่เติมลงไปนั้นจะจับกับส่วนของสารประกอบอินทรีย์ที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำ ทำให้สามารถแยกส่วนของสารประกอบแร่ธาตุซึ่งมีสมบัติชอบน้ำออกจากถ่านหินได้ ดังนั้นกระบวนการนี้จึงสามารถขจัดเถ้าและกำมะถันออกจากถ่านหิน

งานวิจัยนี้ศึกษาการทำความสะอาดถ่านหินลิกไนต์ เหมือนแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยการรวมกลุ่มกับน้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันเตา ศึกษาผลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการทำความสะอาดถ่านหิน ได้แก่ ชนิดน้ำมัน(น้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันเตา) ปริมาณน้ำมัน(ร้อยละ 10 - 50 โดยน้ำหนักถ่านหิน) ขนาดถ่านหิน(ขนาดต่ำกว่า 75 ไมโครเมตร 75-250 ไมโครเมตร และ 250-500 ไมโครเมตร) ปริมาณถ่านหินในของผสม (ร้อยละ 10 - 50) และเวลาที่ใช้ในการรวมกลุ่มถ่านหิน (5 - 40 นาที) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การรวมกลุ่มถ่านหินด้วยน้ำมันปาล์มดิบสามารถขจัดเถ้าและกำมะถันได้ดีกว่าน้ำมันเตา ภาวะที่ดีที่สุดในการทดลอง คือ การรวมกลุ่มถ่านหินขนาดต่ำกว่า 75 ไมโครเมตรด้วยน้ำมันปาล์มดิบ ปริมาณถ่านหินในของผสมร้อยละ 15 อัตราส่วนระหว่างน้ำมันต่อถ่านหินร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ใช้เวลาในการรวมกลุ่ม 15 นาที ซึ่งให้ผลในการขจัดเถ้าร้อยละ 70.68 ขจัดกำมะถันรวมร้อยละ 73.73 ขจัดกำมะถันไพไรต์ร้อยละ 96.76 ขจัดกำมะถันซัลเฟตร้อยละ 96.76 ขจัดกำมะถันอินทรีย์ร้อยละ 53.68 ได้ผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันร้อยละ 72.45

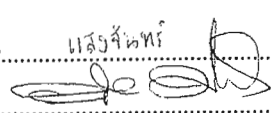
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา เคมีเทคนิค

สาขาวิชา เคมีเทคนิค

ปีการศึกษา 2542

ลายมือชื่อนิติต ปิลันธนา แสงจันทร์

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา 

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

4072316323 MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY
KEY WORD: COAL / AGGLOMERTION / DEASHING / CLEAN COAL

PILUNTANA SANGCHAN : CLEANING OF MAE MOH COAL BY OIL AGGLOMERATION. THESIS

ADVISOR : PROF. PHATTARAPAN PRASASSARAKICH. 10U pp. ISBN 974-332-751-7.

Oil agglomeration is a physical coal cleaning process, which involves the intense mixing of oil and slurry of coal. The difference in surface hydrophobicity causes the oil to agglomerate preferentially with the hydrophobic organic coal material, thus the separation of the organic portion from the hydrophilic inorganic mineral matter occurs. This technique can remove part of ash forming mineral and sulfur from coal.

Cleaning of lignite from Mae Moh mine at Lumpang province by oil agglomeration with crude palm oil and fuel oil was studied. The influence of oil type (crude palm and fuel oil), oil content (oil to coal ratio 10 – 50% by wt.), coal size (pass 75, 75-250, 250-500 microns), coal ratio in slurry (10 – 50% by wt.) and agglomeration time (5 – 40 min) on ash reduction was studied. The optimum conditions of coal cleaning were: less than 75 microns coal agglomerate with palm oil, coal in slurry 15%, oil to coal ratio 30% by wt. and 15 min agglomeration time. The ash reduction was 70.68% with 73.73% total sulfur reduction and 96.46% pyritic sulfur reduction. The sulfate sulfur reduction was 93.10% with 53.68% organic sulfur reduction and the yield was 72.45.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....เคมีเทคนิค
สาขาวิชา.....1A วิชาเทคนิค
ปีการศึกษา.....2542

ลายมือชื่อนิสิต.....ปิ่นชนา.....เสด็จวัชรไต้
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาช่วย.....

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบคุณ ศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลือในการทำงานวิจัยครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่าน ในภาควิชาเคมีเทคนิค ที่ได้ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือ

ขอกราบขอบพระคุณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่าง ถ่านหินเพื่อใช้ในการทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่และบุคลากรภาควิชาเคมีเทคนิค ทุกท่าน ที่ได้อำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการงานวิจัยสำเร็จลงด้วยดี ขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ให้คำแนะนำ และ ความช่วยเหลือมาโดยตลอด

งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีเนื่องจากได้รับทุนอุดหนุนงานวิจัยจากบัณฑิตวิทยาลัยที่ ให้ทุนอุดหนุนงานวิจัย

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา - มารดา ที่ได้ให้กำลังใจ และการสนับสนุนแก่ผู้วิจัย เสมอมาจนสำเร็จการศึกษา



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 วัตถุประสงค์.....	2
1.2 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
2 ทฤษฎี.....	3
2.1 ถ่านหิน.....	3
2.1.1 โครงสร้างอินทรีย์.....	4
2.1.2 สารประกอบแร่ธาตุ.....	7
2.2 การจำแนกถ่านหิน.....	7
2.3 กำมะถันในถ่านหิน.....	9
2.3.1 กำมะถันไพไรต์.....	9
2.3.2 กำมะถันซัลเฟต.....	9
2.3.3 กำมะถันอินทรีย์.....	9
2.4 เถ้าถ่านหิน.....	10
2.4.1 องค์ประกอบของเถ้าถ่านหิน.....	11
2.4.2 ปัญหาของเถ้าถ่านหินในเตาเผาและหม้อไอน้ำ.....	15
2.5 น้ำมันปาล์ม.....	16
2.5.1 กรรมวิธีในการผลิตน้ำมันปาล์ม.....	16
2.5.2 สารเจือปนในน้ำมันปาล์ม.....	16
2.5.3 สมบัติทางกายภาพของน้ำมันปาล์ม.....	17
2.6 น้ำมันเตา.....	18
2.6.1 องค์ประกอบน้ำมันเตาและส่วนผสม.....	18

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2.6.2 สมบัติของน้ำมันเตา.....	20
2.7 การรวมกลุ่มถ่านหินกับน้ำมัน.....	20
2.7.1 กลไกการรวมกลุ่มถ่านหินด้วยน้ำมัน.....	21
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	22
3 การดำเนินงานทดลอง.....	26
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	26
3.1.1 อุปกรณ์ในการเตรียมตัวอย่างถ่านหิน.....	26
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการรวมกลุ่มถ่านหินกับน้ำมัน.....	26
3.2 ตัวอย่างถ่านหินที่ใช้ในการทดลอง.....	28
3.3 ขั้นตอนการทดลอง.....	29
3.4 วิธีการทดลอง.....	30
3.5 การคำนวณ.....	32
4 ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลอง.....	34
4.1 การวิเคราะห์ถ่านหินและกำมะถันในถ่านหิน.....	34
4.2 สมบัติของน้ำมันที่ใช้ในการรวมกลุ่มถ่านหิน.....	36
4.3 ผลของน้ำมันที่ใช้ในการรวมกลุ่มถ่านหิน.....	40
4.3.1 การเปลี่ยนแปลงปริมาณเถ้าและกำมะถัน.....	40
4.3.2 ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการรวมกลุ่มถ่านหินกับน้ำมัน.....	46
4.4 ผลของปริมาณถ่านหินในของผสม.....	47
4.5 ผลของเวลาที่ใช้ในการรวมกลุ่มถ่านหิน.....	52
4.6 ผลของขนาดถ่านหินที่ใช้ในการรวมกลุ่ม.....	55
4.7 การวิเคราะห์องค์ประกอบเถ้าถ่านหิน.....	62
4.8 การจำลองภาวะการณ์การทำความสะอาดถ่านหินโดยการรวมกลุ่มกับน้ำมัน.....	64
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	67
รายการอ้างอิง.....	70
ภาคผนวก ก.....	73
ภาคผนวก ข.....	85

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
ภาคผนวก ค.....	89
ประวัติผู้เขียน.....	100



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	อัตราส่วนโดยน้ำหนักอะตอมของธาตุในถ่านหินลำดับต่างๆ.....	5
2.2	การจำแนกถ่านหินตามศักดิ์.....	8
2.3	ลักษณะของ Thermogram ที่ได้จากการวิเคราะห์แร่ด้วย DTA.....	13
2.4	สารประกอบแร่ธาตุที่พบในถ่านหิน.....	14
2.5	สมบัติทางกายภาพของน้ำมันปาล์ม.....	18
2.6	ข้อกำหนดสมบัติของน้ำมันเตาตามประกาศของกระทรวงพาณิชย์.....	19
4.1	ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างถ่านหินแม่เมาะขนาดต่างๆ.....	35
4.2	ปริมาณธาตุองค์ประกอบหลักในถ่านหินแม่เมาะขนาดต่ำกว่า 75 ไมโครเมตร.....	35
4.3	สมบัติของน้ำมันที่ใช้ในการทดลอง.....	37
4.4	การแปรผลวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันที่มีในน้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันเตา.....	37
4.5	สมบัติของผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันเมื่อรวมกลุ่มถ่านหินกับน้ำมันปาล์มดิบ โดยใช้ปริมาณน้ำมันในการรวมกลุ่มถ่านหินต่างกัน.....	41
4.6	สมบัติของผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันเมื่อรวมกลุ่มถ่านหินกับน้ำมันเตา โดยใช้ปริมาณน้ำมันในการรวมกลุ่มถ่านหินต่างกัน.....	42
4.7	สมบัติของผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันปาล์มดิบเมื่อปริมาณของถ่านหินในของผสมต่างกัน.....	48
4.8	สมบัติของผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันเตาเมื่อปริมาณของถ่านหินในของผสมต่างกัน.....	49
4.9	สมบัติของผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันเมื่อใช้เวลาในการรวมกลุ่มถ่านหินกับน้ำมันต่างกัน.....	53
4.10	สมบัติของผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันเมื่อขนาดถ่านหินที่ใช้ในการรวมกลุ่มกับน้ำมันต่างกัน.....	56
4.11	ร้อยละกำมะถันและการขจัดกำมะถันในผลิตภัณฑ์ถ่านหินเมื่อขนาดถ่านหินที่ใช้ในการรวมกลุ่มกับน้ำมันต่างกัน.....	57

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4.12	ร้อยละการขาดขาดต้องประกอบหลักในเก้าผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมัน	63
4.13	ราคาอุปกรณ์ที่ใช้ในหน่วยปฏิบัติการ.....	65
4.14	ราคาสารที่ใช้ในกระบวนการ.....	65



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างถ่านหิน.....	5
2.2 สมมติฐานโครงสร้างโมเลกุลของถ่านหิน.....	6
2.3 การรวมตัวของวงแหวนอะโรมาติกเมื่อศักดิ์ของถ่านหินเพิ่มขึ้น.....	6
2.4 การเกิดถ่านหินขณะเผาไหม้.....	11
2.5 ผลของ x-ray diffraction ถ่านหินในช่วงอุณหภูมิ 400 - 1500 องศาเซลเซียส.....	12
2.6 การรวมกลุ่มถ่านหินกับน้ำมัน.....	22
3.1 ชุดเครื่องมือการทดลองรวมกลุ่มถ่านหินกับน้ำมัน.....	27
3.2 เครื่องปฏิกรณ์ถึงกวน.....	28
3.3 ขั้นตอนการทดลอง.....	31
4.1 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันในน้ำมันปาล์มด้วย FT-IR.....	38
4.2 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันในน้ำมันเตาด้วย FT-IR.....	39
4.3 ร้อยละการจัดเก็บในผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันเมื่อรวมกลุ่มกับน้ำมันโดยใช้ปริมาณน้ำมันในกลุ่มถ่านหินต่างกัน.....	43
4.4 ร้อยละการจัดกัมมะถันในผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันโดยใช้ปริมาณน้ำมันในกลุ่มถ่านหินต่างกัน.....	43
4.5 ร้อยละการจัดกัมมะถันรูปแบบต่างๆในผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันปาล์มดิบโดยใช้ปริมาณน้ำมันในกลุ่มถ่านหินต่างกัน.....	45
4.6 ร้อยละการจัดกัมมะถันรูปแบบต่างๆในผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันเตาโดยใช้ปริมาณน้ำมันในกลุ่มถ่านหินต่างกัน.....	45
4.7 ร้อยละผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันเมื่อรวมกลุ่มถ่านหินกับน้ำมันโดยใช้ปริมาณน้ำมันในกลุ่มถ่านหินต่างกัน.....	46
4.8 การเกิดกลุ่มผลิตภัณฑ์ถ่านหินเมื่อปริมาณน้ำมันต่างกัน.....	47
4.9 ร้อยละการจัดเก็บในผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันเมื่อรวมกลุ่มถ่านหินกับน้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันเตา โดยใช้ปริมาณถ่านหินในของผสมต่างกัน....	50

สารบัญรูป (ต่อ)

4.10	ร้อยละการขจัดกำมะถันในผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันเมื่อรวมกลุ่มถ่านหินกับน้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันเตา โดยใช้ปริมาณถ่านหินในของผสมต่างกัน.....	51
4.11	ร้อยละผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันที่ได้จากการรวมกลุ่มถ่านหินกับน้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันเตาโดยใช้ปริมาณถ่านหินในของผสมต่างกัน.....	51
4.12	ร้อยละการขจัดเถ้าและกำมะถันในผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันเมื่อเวลาในการรวมกลุ่มถ่านหินกับน้ำมันต่างกัน.....	54
4.13	ร้อยละผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันเมื่อเวลาในการรวมกลุ่มถ่านหินกับน้ำมันต่างกัน.....	54
4.14	ร้อยละการขจัดเถ้าในผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันเมื่อรวมกลุ่มถ่านหินขนาดต่างๆกับน้ำมันต่างกัน.....	58
4.15	ร้อยละการขจัดกำมะถันในผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันเมื่อรวมกลุ่มถ่านหินขนาดต่างๆกับน้ำมันต่างกัน.....	58
4.16	ร้อยละการขจัดกำมะถันไฟโรตีในผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันเมื่อรวมกลุ่มถ่านหินขนาดต่างๆกับน้ำมันต่างกัน.....	60
4.17	ร้อยละการขจัดกำมะถันซัลเฟตในผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันเมื่อรวมกลุ่มถ่านหินขนาดต่างๆกับน้ำมันต่างกัน.....	60
4.18	ร้อยละการขจัดกำมะถันอินทรีย์ในผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันเมื่อรวมกลุ่มถ่านหินขนาดต่างๆกับน้ำมันต่างกัน.....	61
4.19	ร้อยละผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันที่ได้จากการรวมกลุ่มถ่านหินขนาดต่างๆกับน้ำมันต่างชนิด.....	61
4.20	ร้อยละการขจัดธาตุองค์ประกอบหลักในเถ้าผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมัน	63
4.21	กระบวนการทำความสะอาดถ่านหินโดยการรวมกลุ่มกับน้ำมัน.....	66



บทที่ 1

บทนำ

พลังงานมีความสำคัญต่อการดำรงชีพของมนุษย์ คือใช้ในอุตสาหกรรม เกษตรกรรม และอื่นๆ แต่ประเทศไทยไม่มีแหล่งพลังงานเพียงพอภายในประเทศ จึงมีการนำเข้าน้ำมันดิบจากต่างประเทศ เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับอุตสาหกรรมต่างๆ โดยที่ราคาน้ำมันในอนาคตมีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งเกิดจากปัญหาปริมาณน้ำมันของโลกค่อยหมดไปเป็นเหตุให้เกิดการขาดแคลนขึ้น รวมทั้งความต้องการในการใช้น้ำมันของประเทศต่างๆทั่วโลกได้เพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว การหาแหล่งพลังงานอื่นมาทดแทนจึงมีความจำเป็นมาก ด้วยเหตุนี้ประเทศไทยจึงต้องเร่งหาแหล่งพลังงานชนิดอื่นภายในประเทศเพื่อทดแทนน้ำมันเชื้อเพลิง

ถ่านหินจัดเป็นพลังงานที่สำคัญแหล่งหนึ่งของประเทศไทย นอกเหนือจากพลังงานของปิโตรเลียม ในปัจจุบันมีการพัฒนานำถ่านหินมาใช้มากขึ้น เนื่องจากเมื่อเปรียบเทียบการใช้พลังงานจากถ่านหินกับพลังงานจากปิโตรเลียมโดยเทียบค่าความร้อนที่เท่ากันแล้ว การใช้พลังงานจากถ่านหินมีราคาถูกกว่าเพียงหนึ่งในสาม ดังนั้น ถ่านหินที่ผลิตได้ภายในประเทศส่วนใหญ่ประมาณร้อยละ 80 จะถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันเตาในการผลิตกระแสไฟฟ้า ดังเช่นการนำถ่านหินมาใช้เป็นเชื้อเพลิงผลิตไอน้ำเพื่อปั่นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของโรงจักรไฟฟ้าพลังไอน้ำของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ซึ่งต้องใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิงประมาณ 30,400 ตันต่อวัน เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าปริมาณ 2,625 เมกะวัตต์ ให้เพียงพอแก่ความต้องการใช้กระแสไฟฟ้าของประชาชน (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2539)

แหล่งถ่านหินที่พบในประเทศไทยส่วนใหญ่จะเป็นถ่านหินลิกไนต์ซึ่งมีคุณภาพต่ำ มีปริมาณเถ้า และกำมะถันสูง เมื่อนำถ่านหินจากเหมืองแร่ไปใช้งานโดยไม่ได้ผ่านขั้นตอนการทำความสะดวกสิ่งสกปรกที่เจือปนอยู่ในถ่านหิน เช่น ดิน หิน แร่ธาตุต่างๆ ก่อให้เกิดปัญหาในการใช้งาน เพราะเมื่อใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้นั้น จะทำให้เกิดเถ้าซึ่งเป็นกากของเหลือจากการเผาไหม้ของถ่านหินเป็นปริมาณร้อยละ 20-30 ของน้ำหนักถ่านหินที่ใช้ทั้งหมด เนื่องจากอุณหภูมิขณะเกิดการเผา

ไหม้ของถ่านหินอยู่ในช่วง 1,500 – 2,000 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่าจุดหลอมตัวของแร่ธาตุที่มีอยู่ในถ่านหิน ส่งผลให้แร่ธาตุเหล่านี้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติต่างๆ ทั้งทางเคมี และกายภาพ

ด้วยเหตุนี้จึงมีความพยายามที่จะปรับปรุงคุณภาพถ่านหินเพื่อให้ถ่านหินมีสมบัติที่ดีขึ้น โดยใช้เทคนิคต่างๆ มาปรับปรุงคุณภาพของถ่านหิน ได้แก่ เทคนิคทางกล ทางชีวภาพ หรือทางเคมี แล้วแต่ความเหมาะสมของแต่ละกระบวนการ การทำความสะอาดถ่านหินโดยการรวมตัวเป็นกลุ่มกับน้ำมัน (oil agglomeration) เป็นเทคนิคทางกายภาพที่สามารถทำความสะอาดถ่านหินโดยใช้หลักความแตกต่างของสมบัติพื้นผิวของอนุภาคถ่านหิน (surface properties) ซึ่งสามารถจับกำมะถันไพไรต์และเถ้าออกจากถ่านหิน ทำให้ถ่านหินมีคุณภาพดีขึ้น

1.1 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาการขจัดเถ้าจากถ่านหินโดยการรวมตัวเป็นกลุ่มกับน้ำมันเตาและน้ำมันปาล์มดิบ
2. ศึกษาผลของชนิดและปริมาณน้ำมัน ขนาดถ่านหิน อัตราส่วนของน้ำมันและถ่านหินที่มีผลต่อการขจัดเถ้า

1.2 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ถ่านหินที่มีสมบัติดีขึ้นและลดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมเมื่อนำไปใช้งาน
2. เป็นแนวทางในการปรับปรุงคุณภาพถ่านหินในระดับอุตสาหกรรม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 ถ่านหิน (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2539)

ถ่านหินคือหินตะกอนชนิดหนึ่งสามารถติดไฟได้ มีส่วนประกอบที่เป็นสารคาร์บอนไม่น้อยกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนักหรือร้อยละ 70 โดยปริมาตร ถ่านหินเกิดจากการเปลี่ยนแปลงตามธรรมชาติของพืชพันธุ์ไม้ต่าง ๆ ที่สลายตัวและสะสมตัวอยู่ในพื้นที่ที่เป็นแอ่ง หนอง บึงขนาดใหญ่ เมื่อเวลาผ่านไปหลายสิบล้านปีเกิดการเปลี่ยนแปลงของผิวโลก เช่น เกิดแผ่นดินไหว ภูเขาไฟระเบิด การพังทลายของชั้นหินดินทรายเกิดการทับถมของตะกอนมากขึ้น จนทำให้แหล่งสะสมตัวนั้นได้รับความร้อนและความกดดันเพิ่มมากขึ้นและในที่สุดซากพืชพันธุ์ไม้เหล่านั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงกลายเป็นถ่านหินประเภทต่าง ๆ

โดยทั่วไปถ่านหินมีองค์ประกอบหลักคือ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และแร่ธาตุต่างๆที่เป็นสิ่งเจือปน เช่น กำมะถัน ไนโตรเจน เหล็ก แคลเซียม อลูมิเนียม ซิลิคอน แมงกานีส โพแทสเซียม โซเดียม และไทเทเนียม นอกจากนี้ยังมีธาตุอื่นปนอยู่บ้างขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมและกระบวนการการเกิดถ่านหิน (coalification) คาร์บอนเป็นธาตุที่มีมากที่สุดและอยู่เป็นโครงสร้างในโมเลกุลของถ่านหินที่เป็นส่วนอินทรีย์ (organic coal matrix) ซึ่งเป็นส่วนของถ่านหินที่ให้พลังงาน นอกจากนี้ยังมีธาตุไฮโดรเจน ออกซิเจน และกำมะถัน เป็นส่วนประกอบอยู่เล็กน้อย เรียกรวมส่วนนี้ว่า maceral matter นอกจากนี้ธาตุอื่นๆที่รวมกันเป็นสารประกอบอินทรีย์แทรกในเนื้อถ่านหินหรือรวมเป็นก้อนอย่างเห็นได้ชัด เรียกส่วนนี้ว่า mineral matter (crystalline inorganic compound) อยู่กระจัดกระจายทั่วไปในถ่านหิน ธาตุไนโตรเจนส่วนใหญ่ประกอบอยู่ในส่วนของ maceral ธาตุออกซิเจนประกอบอยู่ทั้งในส่วนของ maceral และ mineral เมื่อนำถ่านหินมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสารประกอบอินทรีย์จะเกิดการเผาไหม้ให้ความร้อนและเกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส ส่วนที่เหลือจากการเผาไหม้คือเถ้า (ash) ซึ่งเป็นส่วนของสารประกอบแร่ธาตุ แต่สารประกอบแร่ธาตุบางส่วนเมื่อเกิดการเผาไหม้จะไม่เปลี่ยนเป็นเถ้า เช่น ที่อุณหภูมิสูงๆไฟไรต์ถูกออกซิไดส์ กำมะถันจะสลายตัวให้แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ คาร์บอนเนต

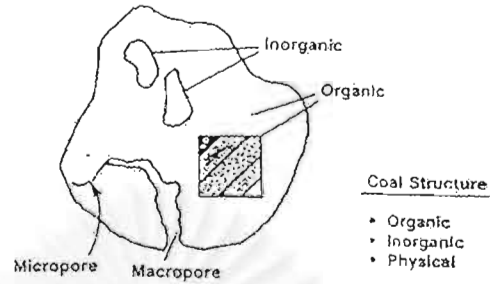
จะสลายตัวให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนเหล็กเปลี่ยนไปอยู่ในรูปสารประกอบออกไซด์ของเหล็ก ซึ่งเป็นส่วนประกอบของถ้ำ

โครงสร้างโมเลกุลของถ่านหินแบ่งออกเป็น 2 ส่วนตามสมบัติทางเคมี คือ ส่วนโครงสร้างอินทรีย์ (organic structure) และส่วนที่เป็นสารประกอบแร่ธาตุ แสดงดังรูปที่ 2.1

2.1.1 โครงสร้างอินทรีย์

โครงสร้างทางเคมีของถ่านหินประกอบด้วยคาร์บอนประมาณ 90-97 ส่วน ไฮโดรเจน 3-5 ส่วน ออกซิเจน 1-2 ส่วน (เมื่อไม่คิดปริมาณกำมะถันและไนโตรเจน) มีกำมะถันและไนโตรเจน 1-2 ส่วน เมื่อคิดจากพื้นฐานของอัตราส่วนโดยน้ำหนักของอะตอมของธาตุ (atomic ratio) พบว่าไฮโดรเจนเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในโครงสร้างถ่านหินดังแสดงในตารางที่ 2.1 ซึ่งเมื่อค่าของถ่านหินสูงขึ้น อัตราส่วนโดยน้ำหนักของอะตอมไฮโดรเจนต่อคาร์บอนและออกซิเจนต่อคาร์บอนจะลดลง ส่วนกำมะถันและไนโตรเจนมีน้อยมากคิดว่าไม่มีความสำคัญ

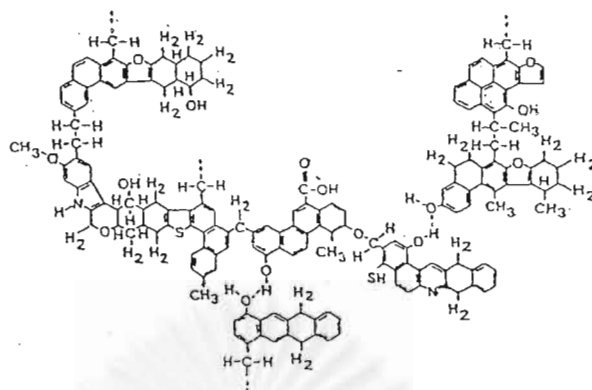
การศึกษาสารประกอบอินทรีย์ในโครงสร้างถ่านหิน โดยใช้ spectroscopy chromatography หรือวิธีทางเคมีอื่นๆ ยังไม่สามารถสรุปได้ว่า โครงสร้างที่แน่นอนของถ่านหินเป็นอย่างไร แต่พอจะทราบได้ว่าสารประกอบอินทรีย์ในโมเลกุลของถ่านหินเป็นสารประกอบพวกเบนซีน ไชโคลเฮกเซน ไชโคลเฮกซาโนน เมทิลีน ฟีนอล ฟีนอลอีเทอร์ พอลิเมทิลีน ฟีนันทริน และสารประกอบไฮโดรอะโรมาติก เช่น คาร์บาโซล เบนซาโทโอฟิน และไพริดีน นอกจากนี้ยังมีกลุ่มฟังก์ชัน คือ ไฮดรอกซี คาร์บอกซี อะมิโน และไทออล แสดงในรูปที่ 2.2 โครงสร้างของสารประกอบอินทรีย์ต่างๆ จะเชื่อมโยงด้วยพันธะเคมีเป็นพอลิเมอร์เชื่อมขวาง (crosslinked polymer) และมีบางส่วนที่ไม่เป็นโครงสร้างพอลิเมอร์ (polymer chain) การวัดความสามารถของการเป็นผลึก (crystallinity) ของถ่านหินโดยใช้ X-ray Scattering technique พบว่า เมื่อลำดับถ่านหินสูงขึ้นวงแหวนอะโรมาติก (aromatic ring) จะเชื่อมกันมากขึ้นและผลึกมีลักษณะคล้ายกราฟิต ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.1 โครงสร้างถ่านหิน (Schlosberg, 1985)

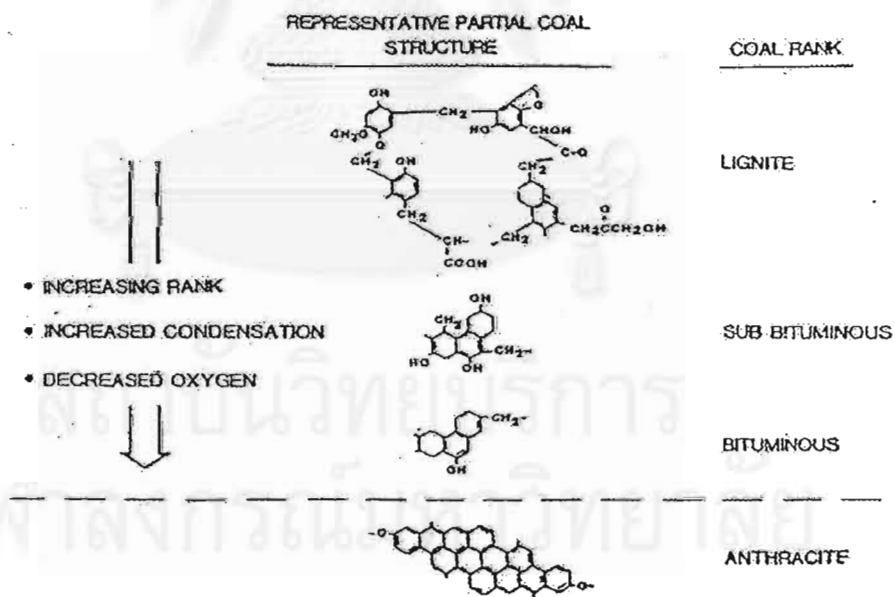
ตารางที่ 2.1 อัตราส่วนโดยน้ำหนักอะตอมของธาตุในถ่านหินลำดับต่างๆ (Meyer, 1981)

ศักดิ์ถ่านหิน	อัตราส่วนโดยน้ำหนักอะตอมของธาตุ				
	C	H	O	N	S
แอนทราไซต์	100	50	2-5	1-2	1/2-1
บิทูมินัส	100	70	4-8	1-2	1/2-1
ซับบิทูมินัส	100	80	10-20	1-2	1/2-1
ลิกไนต์	100	80	20-25	1-2	1/2-1



$\begin{matrix} \text{O} \\ || \\ -\text{C}-\text{OH} \end{matrix}$, $-\text{OH}$, $-\text{O}-\text{CH}_3$, $\begin{matrix} \text{O} \\ || \\ -\text{C}-\text{H} \end{matrix}$ คือ functional groups
 $-\text{CH}_2-$, $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$, $-\text{CH}_2-\underset{\text{CH}_3}{\text{CH}}-$ คือ aliphatic bridges

รูปที่ 2.2 สมมติฐานโครงสร้างโมเลกุลของถ่านหิน (Schlosberg, 1985)



รูปที่ 2.3 การรวมตัวของวงแหวนอะโรมาติกเมื่อศักดิ์ของถ่านหินเพิ่มขึ้น (Challis, 1983)

2.1.2 สารประกอบแร่ธาตุ

ส่วนที่เป็นแร่ธาตุของถ่านหิน ซิลิโคนเป็นแร่ธาตุที่พบบ่อยที่สุด นอกจากนี้ยังมี อลูมิเนียม เหล็ก แคลเซียมและโพแทสเซียม ธาตุเหล่านี้รวมตัวกันเป็นสารประกอบหรือรวมกับอะตอมของธาตุอื่นๆ ให้สารประกอบต่างๆ และสามารถแบ่งกลุ่มของสารประกอบได้คือ

- ก. กลุ่มซิลิเกต (silicate) มี อิลไลต์ (illite) เคโอลินไนต์ (kaolinite) เป็นต้น
- ข. กลุ่มคาร์บอเนต (carbonate) มี แคลไซต์ (calcite) โดโลไมต์ (dolomite) ซิเดอไรต์ (siderite) เป็นต้น
- ค. กลุ่มซัลเฟต (sulphate) มี ยิปซัม (gypsum) แอนไฮไดรต์ (anhydrite) เป็นต้น
- ง. กลุ่มซัลไฟด์ (sulfide) ที่พบบ่อยคือ มาร์คาไซต์ (marcasite) และไพไรต์
- จ. แร่ธาตุอื่นๆ เช่น ควอตซ์ (quartz) เฟลด์สปาร์ (feldspar) เป็นต้น

2.2 การจำแนกถ่านหิน

การจำแนกถ่านหินที่นิยมใช้กันอยู่ในปัจจุบัน คือ ระบบมาตรฐานอเมริกา (American Standards for Testing and Materials, ASTM) จำแนกถ่านหินตามค่าคาร์บอนคงตัวและค่าความร้อน โดยจัดให้ถ่านหินมี 4 ลำดับ เรียงจากศักดิ์สูงไปต่ำคือ แอนทราไซต์, บิทูมินัส, ซับบิทูมินัส และลิกไนต์ ดังตารางที่ 2.2

ก. แอนทราไซต์ (Anthracite) เป็นถ่านหินคุณภาพสูงที่สุด มีลักษณะแข็งเปราะ มีสีดำและเป็นเนื้อเดียวกัน มีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูง สารระเหยต่ำ ทำให้ติดไฟยาก เมื่อติดไฟแล้วให้ค่าความร้อนสูงมากและติดไฟอยู่นาน

ข. บิทูมินัส (Bituminous) เป็นถ่านหินเนื้อแน่นมีลักษณะแข็งและมีสีดำเป็นมันวาว เยิ้มและเกาะตัวเป็นก้อนเมื่อถูกความร้อน มีปริมาณคาร์บอนคงตัวน้อยกว่าแอนทราไซต์ (น้อยกว่า 86%) แต่มีสารระเหยมากกว่า ให้ค่าความร้อนสูงและติดไฟได้ง่าย

ค. ซับบิทูมินัส (Sub-bituminous) เป็นถ่านหินลักษณะผิวหน้าเรียบ ไม่เป็นชั้น มีสีน้ำตาล ความชื้นประมาณ 15-30% ให้ค่าความร้อน 8,300-11,500 บีทียู / ปอนด์

ง. ลิกไนต์ (Lignite) เป็นถ่านหินคุณภาพต่ำสุด มีสีน้ำตาล กำเนิดมาจากถ่านพีต โครงสร้างเป็นแบบแผ่น มีความแข็งพอประมาณ มีปริมาณออกซิเจนค่อนข้างสูง สารระเหยและความชื้นสูง ให้ค่าความร้อนต่ำ

ตารางที่ 2.2 การจำแนกถ่านหินตามศักดิ์ (ASTM D 388)

Class	Group	Fixed Carbon Limits, % (Dry, Mineral-Matter-Free Basis)		Volatile Matter Limits, % (Dry, Mineral-Matter-Free Basis)		Gross Calorific Value Limits, Cal/g (Moist, ^a Mineral-Matter-Free Basis)		Agglomerating Character
		Equal or Greater Than	Less Than	Greater Than	Equal or Less Than	Equal or Greater Than	Less Than	
I. Anthracitic	1. Meta-anthracite	98	2	} nonagglomerating
	2. Anthracite	92	98	2	8	...	...
	3. Semianthracite ^c	86	92	8	14	...	...
II. Bituminous	1. Low volatile bituminous coal	78	86	14	22	} commonly agglomerating ^f
	2. Medium volatile bituminous coal	69	78	22	31	...	...
	3. High volatile A bituminous coal	...	69	31	...	7 777 ^d	...	
	4. High volatile B bituminous coal	...	...	...	...	7 222 ^d	7 777
	5. High volatile C bituminous coal	...	...	...	...	6 389	7 222
III. Subbituminous	1. Subbituminous A coal	5 833	6 389	} nonagglomerating
	2. Subbituminous B coal	...	...	...	...	5 277	5 833
	3. Subbituminous C coal	...	...	...	...	4 611	5 277
IV Lignite	1. Lignite A	3 500	4 611	}
	2. Lignite B	...	...	...	...	...	3 500

^a This classification does not apply to certain coals, as discussed in Note 1.

^b Moist refers to coal containing its natural inherent moisture but not including visible water on the surface of the coal.

^c If agglomerating, classify in low-volatile group of the bituminous class.

^d Coals having 69 % or more fixed carbon on the dry, mineral-matter-free basis shall be classified according to fixed carbon, regardless of gross calorific value.

^e It is recognized that there may be nonagglomerating varieties in these groups of the bituminous class, and that there are notable exceptions in high volatile C bituminous group.

2.3 กำมะถันในถ่านหิน (Lowry, 1963)

กำมะถันเป็นธาตุที่ไม่ต้องการในถ่านหิน เพราะทำให้เกิดการกัดกร่อนอุปกรณ์การเผาไหม้และก่อให้เกิดมลภาวะเป็นพิษภายหลังการเผาไหม้ถ่านหิน ปริมาณกำมะถันรวมที่มีอยู่ในถ่านหินพบตั้งแต่ 0.1-10% โดยน้ำหนัก กำมะถันในถ่านหินมีรูปแบบต่างๆมากมายกระจายอยู่ทั้งส่วนของโครงสร้างอินทรีย์และส่วนประกอบแร่ธาตุ สามารถแบ่งกำมะถันในถ่านหินออกเป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ คือ

2.3.1 กำมะถันไพไรต์ (pyrite sulfur)

กำมะถันไพไรต์ในถ่านหินพบในลักษณะของสารประกอบโลหะซัลไฟด์ คือ แร่ไพไรต์ (pyrite) และแร่มาร์คาไซต์ (marcasite) แร่ทั้งสองชนิดนี้มีสูตรทางเคมี FeS_2 เหมือนกัน แต่สมบัติทางกายภาพต่างกัน คือ แร่ไพไรต์มีรูปผลึกแบบ cubic มีความถ่วงจำเพาะ 5 ในขณะที่แร่มาร์คาไซต์ มีรูปผลึกแบบ rhombic มีความถ่วงจำเพาะ 4.87 แร่มาร์คาไซต์จะเริ่มเปลี่ยนรูปเป็นไพไรต์และสลายตัวให้ FeS และ S ที่อุณหภูมิสูงกว่า 420 องศาเซลเซียส โดยปกติมักเรียกแร่ทั้งสองชนิดรวมกันว่า เป็นไพไรต์

โดยทั่วไปวิธีทางกลสามารถขจัดกำมะถันไพไรต์ที่มีขนาดใหญ่ได้ แต่กำมะถันไพไรต์ที่มีขนาดเล็กมากจะขจัดได้ยาก ต้องใช้วิธีการทางเคมีในการขจัด

2.3.2 กำมะถันซัลเฟต (sulfate sulfur)

ในถ่านหินจะพบกำมะถันซัลเฟตอยู่ในรูปโลหะซัลเฟต เช่น สารประกอบแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) สารประกอบซัลเฟตของเหล็ก (FeSO_4) ทองแดง (CuSO_4) แมกนีเซียม (MgSO_4) หรืออาจพบในลักษณะแร่ เช่น ยิปซัม (gypsum) แต่ส่วนใหญ่มักพบในรูปของ FeSO_4 และ CaSO_4 ปกติพบว่า กำมะถันซัลเฟตในถ่านหินจะมีปริมาณน้อยมาก เมื่อเทียบกับปริมาณกำมะถันไพไรต์และกำมะถันอินทรีย์

2.3.3 กำมะถันอินทรีย์ (organic sulfur)

กำมะถันอินทรีย์มีกระจุกกระจายทั่วไปในถ่านหินประมาณร้อยละ 30 – 70 % ของปริมาณกำมะถันรวมในถ่านหิน ประกอบอยู่ในลักษณะที่เป็นโครงสร้างพันธะเคมีหลายรูป

แบบที่สลับซับซ้อน กำมะถันอินทรีย์ที่พบในถ่านหินส่วนมากจะอยู่ในรูปสารประกอบ sulfide (R-S-R), thioether (=CH-S-CH=), mercaptan (R-S-R) และ thiophenol (C-S-H)

การวิเคราะห์ปริมาณกำมะถันอินทรีย์ไม่สามารถวิเคราะห์ได้โดยตรง เนื่องจากโครงสร้างพันธะเคมีที่สลับซับซ้อน ดังนั้นปริมาณกำมะถันอินทรีย์จึงคำนวณจากปริมาณกำมะถันรวมหักออกด้วยปริมาณกำมะถันไฟไรต์และกำมะถันซัลเฟต

$$\text{กำมะถันอินทรีย์} = \text{กำมะถันรวม} - \text{กำมะถันไฟไรต์} - \text{กำมะถันซัลเฟต}$$

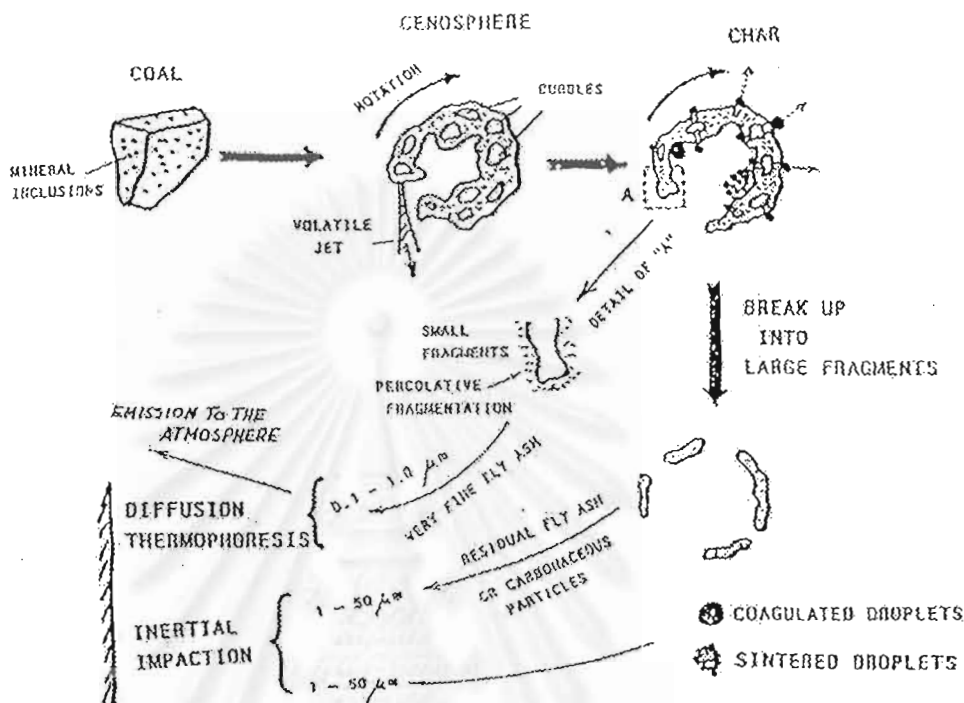
2.4 ถ้ำถ่านหิน (Beer, 1987)

ถ้ำถ่านหินเป็นส่วนที่เหลือของ mineral matter ในถ่านหิน ภายหลังจากเผาไหม้ของถ่านหิน ถ่านหินจะปล่อยสารระเหย (volatile) ออกมาเป็นอันดับแรก มีรูปพ่นเกิดขึ้นโดยรอบๆ ถ่านหิน และมีแก๊สบางส่วนเหลืออยู่ภายใน ซึ่งเป็นไอของสารอินทรีย์ของเหล็ก แมกนีเซียม โซเดียม และซิลิคอนไม่สามารถดันออกมาได้ จึงทำให้เกิดรูกลวงในลักษณะของ cenosphere ขึ้นภายในอนุภาคของถ่านหิน และเมื่อไอของสารอินทรีย์ถูกปล่อยออกมาในรูปของหยดของเหลว การแตกออกของอนุภาคถ่านหินจึงเกิดขึ้น ได้เป็นชิ้นส่วนเล็กๆ มีขนาดต่างๆกัน ตั้งแต่ 0.1 – 50 ไมโครเมตร และได้ละอองเล็กประมาณ 0.05 ไมโครเมตร อนุภาคเหล่านี้เรียกว่าถ้ำ ถ้ำบางส่วนที่ได้สะสมอยู่บนผิวหน้าของตัวถ่ายโอนความร้อน และมีบางส่วนปล่อยสู่บรรยากาศดังรูปที่ 2.4 ขนาดของถ้ำขึ้นอยู่กับขนาดถ่านหินที่ใช้ ถ่านหินที่มีเม็ดใหญ่จะทำให้ได้ถ้ำขนาดใหญ่ ส่วนถ่านหินที่บดละเอียด (pulverized coal) จะทำให้ได้ถ้ำขนาดเล็กลง ดังนั้นถ้ำจาก pulverized coal fired boiler ซึ่งใช้ถ่านหินบดละเอียด จึงมีอนุภาคเล็กกว่าถ้ำจาก spreader stoker fired boiler

ถ้ำถ่านหินแบ่งได้เป็น 2 ชนิด ตามลักษณะการเกิดของสารประกอบแร่ธาตุในถ่านหิน คือ

ก. ถ้ำที่เกิดจากสารอินทรีย์ในถ่านหิน (intrinsic ash) เกิดจากสารอินทรีย์ที่พืชดูดซึมไว้ในขณะที่พืชยังมีชีวิตอยู่ ถ้ำส่วนนี้ไม่สามารถขจัดออกได้ด้วยการทำความสะอาด ได้แก่ ซิลิคอนไดออกไซด์ แคลเซียมออกไซด์ อลูมิเนียมออกไซด์ เป็นต้น

ข. ถ้ำที่เกิดจากสารอินทรีย์ภายนอก (extrinsic ash) เกิดจากสารอินทรีย์ที่น้ำพัดมาขณะเกิดการสะสมของถ่านหิน ได้แก่ ตะกอนดิน ไฟไรต์ ยิปซัม ดิน เป็นต้น ถ้ำชนิดนี้สามารถขจัดออกได้ด้วยการทำความสะอาดได้บ้าง



รูปที่ 2.4 การเกิดเถ้าถ่านหินขณะเผาไหม้ (Gilbert, 1963)

2.4.1 องค์ประกอบของเถ้าถ่านหิน

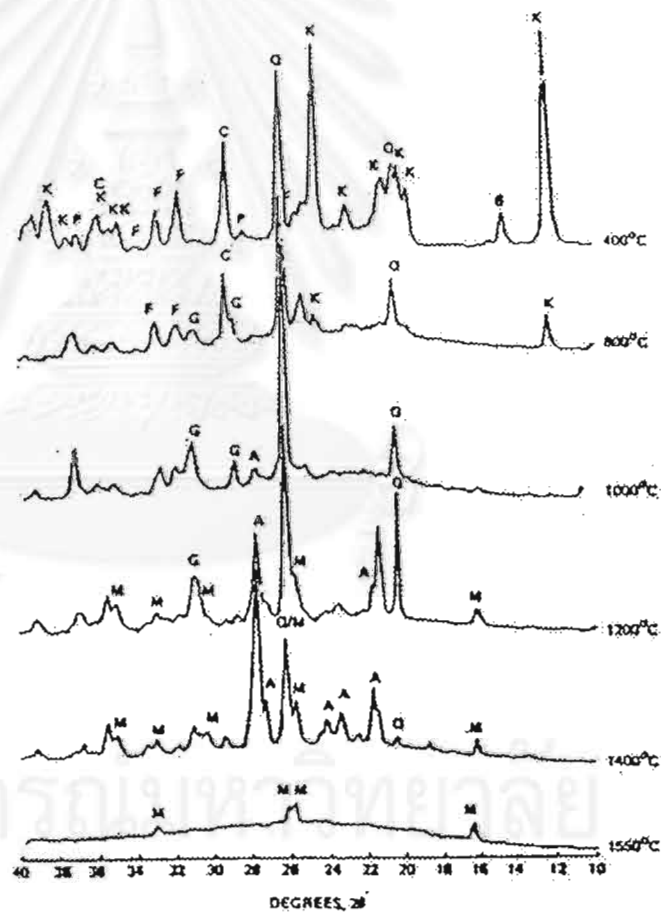
สารประกอบแร่ธาตุที่พบในเถ้าถ่านหิน จากการวิเคราะห์เถ้าถ่านหินด้วย x-ray diffraction ในช่วงอุณหภูมิ 400 – 1500 องศาเซลเซียสของ Unsworth J. F ,1988 แสดงให้เห็นสารประกอบแร่ธาตุที่พบได้แก่ ควอร์ตซ์ เคโอลิไนต์ อิลไลต์ โคควิมไบต์ (coquimbite) โดโลไมต์ แคลไซต์ บัสแซนไนต์ (bussanite) ดังรูปที่ 2.5

Unuma, 1986 และผู้ร่วมงาน ได้ใช้ x-ray diffraction ศึกษาเถ้าถ่านหินในช่วงอุณหภูมิ 200 – 1200 องศาเซลเซียส พบองค์ประกอบเถ้าคือ ควอร์ตซ์ ดินขาว (kaolin) โดโลไมต์ แคลไซต์ แอนไฮไดรต์ เฟลด์สปาร์ ไพไรต์ ซิเดอไรต์ ซีมาไทต์ และมุลไลต์

Warne, 1965 และ Gorman, 1973 ได้ใช้เครื่องวิเคราะห์ทางความร้อน differential thermal analysis (DTA) เพื่อตรวจสอบประกอบแร่ธาตุในถ้ำถ่านหิน จากกราฟที่ออกมาตามช่วงของการเปลี่ยนแปลง ดังตารางที่ 2.3

ดังนั้นสารประกอบแร่ธาตุที่พบในถ้ำถ่านหินจึงแบ่งได้ 6 กลุ่ม ดังตารางที่ 2.4

K = KAOLINITE	B = BASSANITE
C = CALCITE	A = ANOHTHITE
G = GEHLENTIE	M = MULLITE
F = FLUORAPATITE	Q = QUARTZ
P = PYRITE	



รูปที่ 2.5 ผลของ x-ray diffraction ถ้ำถ่านหินในช่วงอุณหภูมิ 400 – 1500 องศาเซลเซียส

(Unsworth, 1988)

ตารางที่ 2.3 ลักษณะของ Thermogram ที่ได้จากการวิเคราะห์แร่ด้วย DTA

Mineral	Chemical formula (idealized)	Endothermic effects			Exothermic effects		
		Peak temp range (C)	Intensity	Interpretation	Peak temp range (C)	Intensity	Interpretation
Kaolin	$Al_2Si_4O_{10}(OH)_6$	100-200	Small	Release of adsorbed water	950-1000 (980)	Intense	Phase transformation to Al_2O_3 and nucleation of mullite
		500-600 (580)	Intense	Dehydroxylation			
Illite		50-150 (135)	Small	Release of interlayer water	940-950	Small	Phase transformation to Spinal
		370-620 (535)	Moderate	Dehydroxylation			
Montmorillonite		850-900	Small	Lattice destruction	900-920	Small	Phase transformation to Spinal phase
		100-150 (137)	Moderate	Release of interlayer water			
		600-730 (685)	Moderate	Dehydroxylation			
Prochlorite	$Mg_9Si_4O_{10}(OH)_8$	850-900	Small	Lattice destruction	860-900 (870)	Small	Formation of olivine (Mg,Fe) $_2SiO_4$
		550-750 (650)	Intense	Decomposition of brucite layer			
		750-820 (795)	Small	Dehydration of talc layer			
Mixed-layer illite- montmorillonite		820-880 (842)	Small	Dehydration	900-950 (945)	Small	Phase transformation
		50-150 (115)	Small	Release of adsorbed and interlayer water			
		(137)					
		450-680 (630)	Small	Dehydroxylation			
		600-650 (640)	Small	Dehydroxylation			
Calcite	$CaCO_3$	950-1000	Small	Lattice destruction			
Dolomite	$CaMg(CO_3)_2$	710-950 (915)	Moderate	Decarbonation			
		815-910 (890)	Intense	Decarbonation			
Siderite	$FeCO_3$	425-610	Moderate	Decarbonation			
Quartz	SiO_2	570	Very small	Quartz			
		(570)		Inversion			
Gypsum	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	100-150 (145)	Intense	Dehydration	350-370	Very small	Phase transformation - $CaSO_4$
		150-200 (174)	Intense	Dehydration			

ตารางที่ 2.4 สารประกอบแร่ธาตุที่พบในถ้ำถ่านหิน (Gorman, 1973)

Group	Typical Species and Approximate formula	
Shale	Muscovite (common potash mical), $K_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$	
	Illite (soda mical), $Na_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$	
	Montmorillonite (clay), $(Mg,Ca)O \cdot Al_2O_3 \cdot 5SiO_2 \cdot nH_2O$	
Kaolin	Kaolinite (clay), $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$	
	Matahalloysite, $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 4H_2O$	
Sulfide	Pyrite and Marcacite, FeS_2	
Carbonite	Calcite (limestone), $CaCO_3$	
	Dolomite, $CaCO_3 \cdot MgCO_3$	
	Ankerite, $2CaCO_3 \cdot MgCO_3 \cdot FeCO_3$	
Chloride	Halite (common salt), $NaCl$	
	Sylvite, KCl	
Accessory Mineral	Occurring in minor quantities associated with the Shell Group	
Mineral	Quartz, SiO_2	Apatite, $9CaO \cdot 3P_2O_5 \cdot CaF_2$
	Felspar, $(K,Na)O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$	Zircon, $ZrSiO_4$
	Garnet, $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3SiO_2$	Diaspore, $Al_2O_3 \cdot H_2O$
	Hornblende, $CaO \cdot 3FeO \cdot 4SiO_2$	Magnetite, Fe_3O_4
	Gypsum, $CaSO_4 \cdot 2H_2O$	Hematite, Fe_2O_3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.4.2 ปัญหาของเถ้าถ่านหินในเตาเผาและหม้อไอน้ำ (Meyer, 1981)

เตาเผาและหม้อไอน้ำที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง มักพบปัญหาของเถ้าถ่านหินเกาะติดตามผนังของเตาเผา และผิวของท่อไอน้ำ ซึ่งเป็นสาเหตุของการทำให้เกิดการกัดกร่อนและสึกกร่อนของเตาเผาในเวลาต่อมาที่ส่วนต่างๆของเครื่องมือ ดังนี้

ก. เกาะสะสมบนเตาเผา (furnace epistite) มักเกิดบนส่วนของท่อไอน้ำที่อยู่ตามผนังเตา ทำให้เกิดการลดการถ่ายโอนความร้อน จากเปลวไฟที่ไปยังผนังท่อที่ต่อไปยังท่อน้ำไอน้ำเกิดขึ้นน้อย และแก๊สที่ปล่อยออกจากเตามีอุณหภูมิสูง ทำความเสียหายแก่เทอร์ไบน์ (turbine) อาจใช้พัดลม (blower) ช่วยขจัดเถ้าที่สะสมบนผนังเตาได้ แต่ถ้าเถ้าหลอมเหลวเป็นของแข็งสะสม พัดลมจะไม่สามารถช่วยขจัดได้ การสะสมของเถ้าหลอมเหลวนบนผนังนี้เรียกว่า การเกิดสแล็ก (slagging)

ข. การสะสมบนซูเปอร์ฮีตเตอร์และรีฮีตเตอร์ (superheater/reheater deposits) เกิดขึ้นในส่วนของผิวท่อที่เป็นทางผ่านของเถ้า เรียกการสะสมชนิดนี้ว่า ฟาวลิงก์ (fouling) ซึ่งคล้ายเป็นฉนวนกั้นการถ่ายโอนความร้อนจากแก๊สร้อน และลดอัตราการถ่ายโอนความร้อนทำให้ความดันของแก๊สเพิ่มขึ้น อัตราการไหลของอากาศลดลง และอัตราการเผาไหม้ลดลง

ค. การกัดกร่อนของผนังท่อ (wall-tube corrosion) พบในส่วนของผนังท่อที่มีการสะสมของเถ้าหนาแน่น ถ้ามีปฏิกิริยาระหว่างเหล็ก(Fe) กับ Na_2SO_4 หรือ K_2SO_4 เกิดเป็น $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_7$ และ $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_7$ หรือ $\text{Na}_3\text{Fe}(\text{SO}_4)_3$ และ $\text{K}_3\text{Fe}(\text{SO}_4)_3$ ซึ่งทำให้เกิดการกัดกร่อนของผนัง

ง. การกัดกร่อนของซูเปอร์ฮีตเตอร์และรีฮีตเตอร์ (superheater / reheater corrosion) เกิดจากการสะสมของ $\text{Na}_3\text{Fe}(\text{SO}_4)_3$ และ $\text{K}_3\text{Fe}(\text{SO}_4)_3$ ที่เกิดขึ้นทำให้เกิดการกัดกร่อนของผิวท่อส่วนที่มาจากเกาะของเถ้าบนผิวโลหะ

จ. การกัดกร่อนของเครื่องอุ่นอากาศ (air preheater corrosion) การกัดกร่อนนี้เกิดจาก H_2SO_4 ที่ได้จาก H_2O และ SO_3 ที่มาจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของซัลเฟอร์ไดออกไซด์

ฉ. การสึกกร่อน (corrosion) เป็นผลต่อเนื่องจากการสะสมและกัดกร่อนที่มากขึ้นบนผิวโลหะที่เป็นส่วนต่างๆของเตา รวมทั้งที่แผ่นซูเปอร์ฮีตเตอร์ รีฮีตเตอร์ และอีคอนอมิเซอร์ (Economizer)

2.5 น้ำมันปาล์ม (Cuiew, n.d.)

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชเศรษฐกิจในเขตร้อน สามารถให้ผลผลิตน้ำมันปาล์ม เพื่อใช้ในการปรุงอาหาร ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น เนยเทียม ผงซักฟอก สบู่ และน้ำมันหล่อลื่น เป็นต้น

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชในตระกูล Palmae มีถิ่นกำเนิดในทวีปอาฟริกา สามารถเจริญเติบโตได้ดีในเขตร้อนที่มีความชื้นสูงพอควร ผลปาล์มน้ำมันประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นเนื้อของผล ซึ่งจะให้น้ำมันปาล์ม (palm oil) และ ส่วนที่เป็นเมล็ดซึ่งจะให้น้ำมันเมล็ดปาล์ม (palm kernel oil)

2.5.1 กรรมวิธีในการผลิตน้ำมันปาล์ม

กรรมวิธีการผลิตน้ำมันปาล์มในกระบวนการอุตสาหกรรมแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนใหญ่ ๆ คือ

ก. ขั้นตอนการแปรรูปขั้นต้นได้แก่ ขั้นตอนเตรียมวัตถุดิบและสกัดหรือหีบเอาน้ำมันออกจากเปลือกผลปาล์ม ซึ่งน้ำมันที่ได้เรียกว่า น้ำมันปาล์มดิบ (crude palm oil – CPO) และน้ำมันจากเมล็ดในปาล์ม (crude palm kernel oil – CPKO)

ข. ขั้นตอนแปรรูปขั้นที่สอง เป็นการนำน้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันเมล็ดในมากลั่นทำให้บริสุทธิ์โดยแยกเอาสิ่งที่ไม่เจือปนออกจากรูปธรรมดิบเพื่อนำไปใช้ในการอุปโภคและบริโภค

ค. ขั้นตอนแปรรูปขั้นสุดท้าย เป็นการนำเอาส่วนต่าง ๆ ที่ได้จากการกลั่นมาใช้ประโยชน์ในรูปแบบต่าง ๆ กัน

2.5.2 สารเจือปนในน้ำมันปาล์ม

สารเจือปนต่าง ๆ ในน้ำมันปาล์มแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ

ก. กลุ่มไฮโดรไลติก (hydrolytic) ประกอบด้วยความชื้น สิ่งสกปรก กรดไขมันอิสระ กลีเซอไรด์ และเอนไซม์ต่าง ๆ

ข. กลุ่มออกซิเดทีฟ (oxidative) ประกอบด้วยเศษผงโลหะ สารออกซิเดชันต่าง ๆ เม็ดสีโทโคเฟอรอล (tocopherols) และฟอสฟาไทด์ (phosphatide)

ค. สารที่เป็นตัวเร่งให้เกิดสารพิษ ได้แก่ สารประกอบพวกไนโตรเจน กำมะถัน และเฮไลเจน ตลอดจนฟอสฟาไทด์ และสารออกซิเดชันต่าง ๆ ด้วย

2.5.3 สมบัติทางกายภาพของน้ำมันปาล์ม

ในทางการค้า น้ำมันที่ใช้ในการบริโภค (edible oil) จะมีค่าคงที่ต่าง ๆ ที่ใช้บอกคุณภาพและลักษณะของน้ำมัน ซึ่งค่าคงที่ต่าง ๆ ที่สำคัญมีดังนี้

ก. Acid Value เป็นค่าคงที่ซึ่งบ่งถึงปริมาณกรดไขมันอิสระที่มีอยู่ในน้ำมัน สามารถนิยามว่า คือจำนวนมิลลิกรัมของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ต้องใช้ในการทำให้กรดไขมันอิสระเป็นกลางในน้ำมัน 1 กรัม

ข. Saponification Value เป็นค่าคงที่ที่บ่งถึงจำนวนมิลลิกรัมของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในการสaponify น้ำมัน 1 กรัม ค่านี้จะบ่งให้ทราบถึงขนาดโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ด้วย

ค. Unsaponifiable matter เป็นค่าคงที่ที่บ่งถึงปริมาณของสารที่ถูกแยกได้โดยไดเอทิลอีเทอร์ (diethyl ether) จากการสaponify น้ำมันซึ่งสารที่ได้จะต้องไม่ระเหย (non-volatile) ที่ 100 องศาเซลเซียส ปริมาณของ unsaponifiable matter จะมีค่าน้อยมากสำหรับน้ำมันเกือบทุกชนิด (ตัวอย่างเช่น 0.2 เปอร์เซ็นต์) แต่สำหรับน้ำมันบางชนิด เช่น Whale oil จะมีค่าสูงถึง 17%

ง. Iodine Value เป็นค่าคงที่ที่บ่งถึงปริมาณของความไม่อิ่มตัวในน้ำมันและสามารถนิยามได้คือจำนวนกรัมของไอโอดีนที่ถูกดูดซับโดยน้ำมัน 100 กรัม วิธีการวิเคราะห์มีหลายวิธีแต่ที่นิยมใช้คือวิธีของวิจส์ (Wijs) และฮานัส (Hanus) วิธีของวิจส์อาศัยเทคนิคที่เติมไอโอดีนมอนอคลอไรด์ (Iodine monochloride) ในปริมาณที่มากเกินไปแล้วอาศัยเทคนิคการไทเทรตย้อนกลับ (Back titration) ด้วยโซเดียมไทโอซัลเฟต (sodium thiosulfate) วิธีการของฮานัส มีหลักการคล้ายคลึงกับวิธีการของวิจส์ แต่ใช้สารละลายมอนอโบรมด์ (monobromide solution) แทนไอโอดีนมอนอคลอไรด์ (Iodine monochloride)

จ. Peroxide Value เป็นค่าคงที่ซึ่งแสดงถึงมิลลิอิควิวาเลนต์ (milliequivalent) ของไอโอดีนที่เกิดจากน้ำมัน 1 กิโลกรัม Peroxide value ใช้เป็นอินดิเคเตอร์ในการบอกความเหม็นหืน เมื่อน้ำมันเกิดการออกซิเดชัน (oxidation) จะเกิดไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (hydro - peroxide) ซึ่งมีสมบัติไม่มีสีและไม่มีกลิ่น แต่สามารถสลายตัวได้เป็น อัลดีไฮด์ (aldehyde) ไฮโดรคาร์บอน (hydrocarbon) คีโตน (ketone) และสารเคมีประเภทอื่นที่สามารถระเหยได้ง่าย เปอร์ออกไซด์ จะทำปฏิกิริยากับโพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) ได้ไอโอดีนอิสระซึ่งสามารถตรวจวัดด้วยการไทเทรต

ตารางที่ 2.5 สมบัติทางกายภาพของน้ำมันปาล์ม (Cuiew, n.d.)

Specific gravity at 99 °/15.5 °C	0.860-0.873
Refractive index at 40 °C	1.449-1.452
Iodine number	14-22
Saponification number	245-255
Unsaponifiable matter	Not over 0.8"
Melting point	24-26 °C
Setting point	20-26 °C

2.6 น้ำมันเตา (ปราโมทย์, 2537)

น้ำมันเตาจัดเป็นเชื้อเพลิงที่สำคัญที่สุดในอุตสาหกรรมเพราะราคาถูก ใช้งาน ให้ค่าความร้อนสูงและไม่มีเถ้า ในบรรดาผลิตภัณฑ์ต่างๆ จากน้ำมันปิโตรเลียม น้ำมันเตามีราคาต่ำที่สุด

น้ำมันเตาส่วนใหญ่จะใช้กับหม้อไอน้ำ เตาเผา เตาหลอมในอุตสาหกรรมต่างๆ โดยมีสถานะเป็นของเหลว จึงขนถ่ายง่าย เก็บง่ายและใช้งาน จัดเป็นคู่แข่งที่สำคัญกับเชื้อเพลิงประเภทอื่นๆ เช่น แก๊ส ซึ่งมีราคาแพงและขนถ่ายยาก หรือถ่านหินและเชื้อเพลิงแข็งอื่นๆ ซึ่งใช้ยากกว่าและประสิทธิภาพไม่ดีเท่า

2.6.1 องค์ประกอบน้ำมันเตาและส่วนผสม

น้ำมันเตาได้จากกากที่เหลือในการกลั่น ซึ่งอาจมาจากการกลั่นน้ำมันดิบโดยตรง การกลั่นภายใต้สูญญากาศ กากน้ำมันพวกนี้มักเหนียวมากจึงผสมกับสารทำให้เจือจาง (diluent) เพื่อให้ได้ความหนืดและปริมาณกำมะถันตามความต้องการ สารที่ใช้เจือจางได้แก่ น้ำมันเชื้อเพลิงดีเซล หรือ องค์ประกอบ หรือน้ำมันก๊าดประเภทเบา

น้ำมันเตาสามารถแบ่งได้เป็นชนิดต่างๆ คือน้ำมันเตาประเภทใส (Light fuel oil) ประเภทปานกลาง (Medium fuel oil) และประเภทข้น (Heavy fuel oil) ข้อกำหนดสมบัติของ น้ำมันเตาแสดงไว้ในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ข้อกำหนดสมบัติของน้ำเตาตามประกาศของกระทรวงพาณิชย์ (ปราโมทย์, 2537)

สมบัติ	เกรด						วิธีทดสอบ
	LFO	LFO	MFO	MFO	HFO	HFO	
	เกรด 1	เกรด 2	เกรด 3	เกรด 4	เกรด 5	เกรด 6	
1 ความถ่วงจำเพาะที่ @15.6°C/15.6°C(สูงสุด)	0.985	0.985	0.99	0.99	0.995	0.995	1298
2 ความหนืดที่ @ 50°C (Cst)	สูงสุด	สูงสุด	สูงสุด	สูงสุด	สูงสุด	สูงสุด	445
RW1 ที่ @100°F (ค่าโดยประมาณ)	80	80	145	180	230	280	
	600	600	1200	1500	2000	2500	
3 จุดวาบไฟ PMCC, °C (ค่าต่ำสุด)	60	60	60	60	60	60	93
4 จุดไหลเท, °C (ค่าสูงสุด)	24	24	24	24	30	30	97
5 ปริมาณกำมะถัน (% โดยน้ำหนัก)	3.0	3.2	3.5	3.5	3.5	3.5	129
6 ค่าความร้อนเชื้อเพลิงค่าทางสูง (kcal/kg)	10,000	10,000	10,000	9,000	9,000	9,000	240
7 เถ้า (% โดยน้ำหนัก) ค่าสูงสุด	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	482
8 น้ำและตะกอน (%โดยน้ำหนัก) ค่าสูงสุด	1.0	1.0	1.2	1.5	1.5	1.5	1796
9 สี ASTM (ค่าต่ำสุด)	8.0	8.0	-	-	-	-	1500

2.6.2 สมบัติของน้ำมันเตา

ก. ค่าความหนืด เป็นสมบัติที่สำคัญที่สุดของน้ำมันเตา นอกจากจะใช้แบ่งเกรด และกำหนดราคาน้ำมันแล้ว ความหนืดยังมีความสำคัญยิ่งต่อการใช้งานของน้ำมันเตา

ข. ปริมาณกำมะถัน เมื่อเผาไหม้ น้ำมันเตาที่มีกำมะถันจะเกิด SO_2 ออกทางปล่องซึ่งก่อให้เกิดมลพิษ จึงต้องมีการควบคุมปริมาณกำมะถันให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม ปริมาณกำมะถันขึ้นอยู่กับแหล่งน้ำมันดิบ และเกรดของน้ำมันเตา

ค. ปริมาณเถ้า สารประกอบที่จะทำให้เกิดเถ้าในน้ำมันเตา จะมาจากพวกเกลือของโลหะที่มีอยู่ในน้ำมันดิบตามธรรมชาติหรือจากพวกของแข็งต่างๆที่อาจติดมากับน้ำมันเตา ในระหว่างกรรมวิธีผลิตน้ำมัน

ง. จุดวาบไฟ เป็นเครื่องชี้ถึงอันตรายอันอาจเกิดจากไฟไหม้น้ำมัน โดยทั่วไปแล้ว น้ำมันเตาจะมีจุดวาบไฟไม่ต่ำกว่า 150 องศาเซลเซียส ฉะนั้นจึงนับได้ว่าน้ำมันเตาเป็นน้ำมันที่ไม่มีอันตราย เพราะการเก็บ การสูบน้ำมัน กระทำในแบบที่มีระบบระบายอากาศ ณ อุณหภูมิบรรยากาศ ซึ่งต่ำกว่าจุดวาบไฟของน้ำมันมาก

จ. ค่าความร้อนเชื้อเพลิงและค่าความหนาแน่น เป็นค่ากำหนดปริมาณความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้น้ำมัน ส่วนค่าความหนาแน่น จะกำหนดอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนและไฮโดรเจนในเชื้อเพลิงไม่ให้สูงเกินไป

2.7 การรวมกลุ่มถ่านหินกับน้ำมัน (Coleman, et. al., 1995)

กระบวนการรวมกลุ่มถ่านหินด้วยน้ำมันเป็นวิธีการทางกลอีกวิธีหนึ่งที่สามารถปรับปรุงคุณภาพของถ่านหินให้ดีขึ้น และสามารถทำได้ง่าย การปรับปรุงคุณภาพถ่านหินด้วยการรวมกลุ่มกับน้ำมันนี้อาศัยหลักการพื้นฐานความแตกต่างกันของสมบัติทางพื้นผิวของถ่านหิน

สมบัติทางพื้นผิวของถ่านหิน (coal surface properties) สามารถแบ่งได้เป็น

- ส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic) ส่วนของอนุภาคถ่านหินที่มีสมบัติชอบน้ำได้แก่ ส่วนของสารประกอบแร่ธาตุและสิ่งเจือปนต่างๆ เช่น สารประกอบซัลไฟด์, สารประกอบออกไซด์ และ ดินเหนียว เป็นต้น
- ส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ได้แก่ส่วนของเนื้อถ่านหิน (coal matrix)

การรวมกลุ่มถ่านหินกับน้ำมันทำให้สามารถแยกองค์ประกอบของถ่านหินในส่วนของกำมะถันไฟโรต์และส่วนประกอบแร่ธาตุออกจากส่วนของเนื้อถ่านหินได้ เนื่องจากองค์ประกอบเหล่านี้จะรวมตัวกับน้ำในขณะที่ส่วนของเนื้อถ่านหินจะรวมตัวกับน้ำมันที่เติมลงไป และจับตัวเป็นกลุ่ม ลอยอยู่บริเวณผิวหน้าของของผสม เมื่อทำการกรองของผสมด้วยตะแกรงกลุ่มของถ่านหินที่ดูดซับน้ำมันเอาไว้จะติดค้างอยู่บริเวณด้านบนของตะแกรง ในขณะที่ส่วนของกำมะถันไฟโรต์และส่วนประกอบแร่ธาตุของถ่านหินจะรวมตัวกับน้ำและไหลผ่านลงสู่เบื้องล่างของการกรอง

ส่วนของ agglomerate ที่ได้จากการกรองนี้จึงมีปริมาณของกำมะถันไฟโรต์และส่วนประกอบแร่ธาตุของถ่านหินน้อยลง เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณเริ่มต้นในถ่านหินก่อนการรวมกลุ่ม ดังนั้นเมื่อนำกลุ่มของ agglomerate นี้ไปใช้ในการเผาไหม้ จึงทำให้มีปริมาณเถ้าคงเหลือในปริมาณต่ำลง และโอกาสในการปล่อยกำมะถันออกมากับฟลูแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้ในรูปของ SO_x น้อยลงด้วย

2.7.1 กลไกการรวมกลุ่มถ่านหินกับน้ำมัน

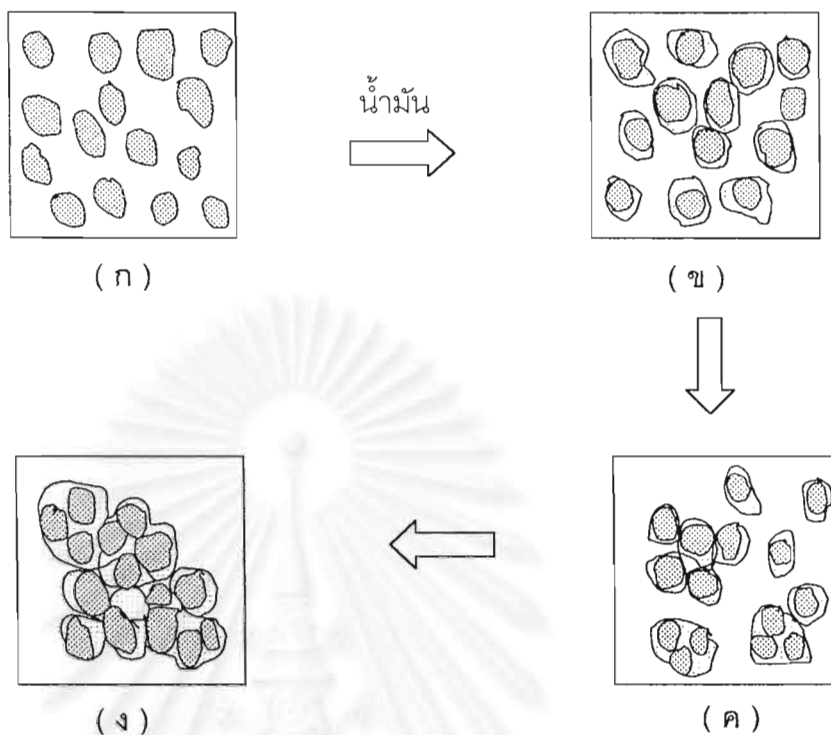
การรวมกลุ่มถ่านหินกับน้ำมันมีกลไกต่างๆ สามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 2.7

ก. กระจายอนุภาคถ่านหินในน้ำ โดยกวนของผสมระหว่างถ่านหินและน้ำ องค์ประกอบที่ชอบน้ำในถ่านหินจะเกิดการละลายในน้ำ แยกออกมาจากส่วนของเนื้อถ่านหิน (รูปที่ 2.7 ก)

ข. เติมน้ำมันลงในของผสมระหว่างถ่านหินและน้ำ เมื่อกวนของผสมถ่านหิน-น้ำมันและน้ำ ทำให้อนุภาคของน้ำมันเกิดการกระจายอยู่บนผิวหน้าของน้ำ อนุภาคของถ่านหินส่วนที่ไม่ชอบน้ำจะดูดซับน้ำมันที่กระจายตัวบริเวณผิวหน้าของน้ำ (รูปที่ 2.7 ข)

ค. อนุภาคของถ่านหินที่ดูดซับน้ำมันกระจายบนพื้นผิวเกิดการรวมตัว สะสมเป็นผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันในของผสม (รูปที่ 2.7 ค และ 2.7 ง)

จากกลไกดังกล่าวทำให้เราสามารถแยกอนุภาคถ่านหินที่มีการรวมกลุ่มกับน้ำมันได้โดยการกรองผ่านตะแกรง หรือใช้เทคนิคการลอยตัว



รูปที่ 2.7 การรวมกลุ่ม Stärn กับน้ำมัน

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Petela, R. (1991) ศึกษาขนาดของกลุ่มผลิตภัณฑ์ Stärn ที่ได้จากการรวมกลุ่ม Stärn กับน้ำมัน โดยตั้งสมมติฐานว่า อนุภาคของ Stärn ที่ใช้เป็นทรงกลม การทดลองพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อขนาดของกลุ่มอนุภาคผลิตภัณฑ์ ได้แก่ อันตรกิริยาระหว่างแรงตึงผิวของน้ำมันที่ใช้เป็นตัวกลาง และ แรงสู่ศูนย์กลางของการกวนเพื่อกระจายตัวกลางที่ใช้ในการรวมกลุ่ม, ปริมาณน้ำมันที่ใช้ในการรวมกลุ่ม, ความหนาแน่นของอนุภาค Stärn แรงตึงผิวระหว่างวัฏภาคน้ำกับน้ำมัน, ขนาดของ Stärn เริ่มต้น และ ความเร็วรอบของการกวน

Garcia, A. B., Martinez-Tarazona, M. R., Vega, J. M. G. และ Spears, D. A. (1994) ศึกษาผลของชนิด Stärn ที่มีต่อการขจัดธาตุองค์ประกอบรอง (trace element) และธาตุองค์ประกอบหลัก (major element) โดยการรวมกลุ่มของ Stärn แอนทราไซต์ 3 แหล่งของสเปนด้วย

นอร์มัลเฮฟเทน วิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์โดยใช้ X-ray fluorescence spectrometry พบว่าสามารถลดองค์ประกอบของถ่านหินทั้ง 3 ชนิดในส่วนธาตุองค์ประกอบรองและธาตุองค์ประกอบหลัก 10 – 55% การขจัดอะลูมิเนียม(Al), แคลเซียม(Ca), โพแทสเซียม(K), แมกนีเซียม(Mg) และ ซิลิกา(Si) ในธาตุองค์ประกอบหลักมีแนวโน้มใกล้เคียงกับการขจัดแบเรียม(Ba), แมงกานีส(Mn), รูบิเดียม(Rb) และเซอร์โคเนียม(Zr) ในธาตุองค์ประกอบรอง นอกจากนั้นแนวโน้มการขจัดโซเดียม(Na), ฟอสฟอรัส(P), ไทเทเนียม(Ti) ในธาตุองค์ประกอบหลักคล้ายกับทองแดง(Cu), โครเมียม(Cr), นิกเกิล(Ni), ตะกั่ว(Pb) และสังกะสี(Zn) ในธาตุองค์ประกอบรอง

Garcia, A. B., Martinez-Tarazona, M. R. และ Vega, J. M. G. (1995) ศึกษาการรวมกลุ่มของถ่านหินแอนทราไซต์ 3 แหล่งของสเปนด้วยนอร์มัลเฮฟเทน โดยวัดปริมาณธาตุ สารอินทรีย์และกำมะถันที่ปล่อยออกมาหลังการเผาไหม้ และพิจารณาผลของความเข้มข้นของนอร์มัลเฮฟเทนและขนาดของถ่านหินที่มีผลต่อกระบวนการรวมกลุ่มของถ่านหิน พบว่า เมื่อความเข้มข้นของนอร์มัลเฮฟเทนเพิ่มขึ้นการได้กลับคืนของสารอินทรีย์ (organic matter recovery) จะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งความเข้มข้นของนอร์มัลเฮฟเทนมีค่า ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักถ่านหิน การได้กลับคืนของสารอินทรีย์มีค่ามากที่สุด เมื่อเลยค่านี้แล้วการเผาไหม้จะลดลง นอกจากนั้นขนาดของถ่านหินมีผลต่อการทำความสะอาดถ่านหินมากกว่าความเข้มข้นของนอร์มัลเฮฟเทน โดยถ่านหินขนาดเล็ก (20 – 45 ไมโครเมตร) สามารถลดปริมาณธาตุในถ่านหินได้มากที่สุด

Boni, A., N'kpomin, A., Francois, O. และ Antonini, G.(1995) ศึกษาผลของตัวแปรต่างๆที่มีต่อการรวมกลุ่มของถ่านชาร์จากชีวมวล (biomass) กับน้ำมัน โดยศึกษาชนิดของน้ำมันที่ใช้เป็นตัวกลางในการรวมกลุ่ม (น้ำมันเตาและน้ำมันปาล์มดิบ) ผลของการเติมกรดในการรวมกลุ่มกับน้ำมัน อัตราส่วนระหว่างน้ำมันต่อถ่านหิน และเวลาที่ใช้ในการรวมกลุ่ม พบว่า ถ่านชาร์ที่มีปริมาณสารระเหยสูงจะมีเถ้าคงเหลือภายหลังการรวมกลุ่มกับน้ำมันในปริมาณน้อย เมื่อเติมกรดไฮโดรคลอริก(HCl) สามารถขจัดเถ้าและสารประกอบอินทรีย์ได้ดีขึ้น อัตราส่วนระหว่างน้ำมันกับถ่านหินที่เหมาะสมควรสูงกว่า 0.15 โดยน้ำหนัก และเมื่อใช้เวลาในการกวนของผสมถ่านหินกับน้ำภายหลังการเติมน้ำมันนานส่งผลให้ปริมาณเถ้าลดลงมากขึ้น จากการศึกษาพบว่าการทดลองโดยใช้อัตราส่วนระหว่างกรดกับถ่านหินมีค่า 0.002 โดยน้ำหนัก และใช้เวลาในการกวนของผสมถ่านหินกับน้ำภายหลังการเติมน้ำมันนาน 15 นาที

สามารถขจัดได้ในถ่านหินที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 ไมโครเมตร ให้เหลือปริมาณได้ในผลิตภัณฑ์เพียงร้อยละ 0.8 โดยน้ำหนัก

Garcia, A. B., Martinez-Tarazona, M. R. และ Vega, J. M. G. (1996) ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการรวมกลุ่มของถ่านหินกับน้ำมันพืช โดยใช้ถ่านหินแอนทราไซต์ 3 ชนิดจากแหล่งบริเวณตะวันออกเฉียงเหนือของสเปน บดผ่านตะแกรงร่อนขนาด 500 ไมโครเมตร ภาวะในการทดลอง คือ ถ่านหินปริมาณ 16 กรัม น้ำกลั่น 400 มิลลิลิตร ความเร็วรอบของเครื่องกวน 11,000 rpm เวลาที่ใช้ในการรวมกลุ่มถ่านหิน 60 วินาที วิเคราะห์ปริมาณแก้ว สารอินทรีย์ ปริมาณกำมะถันรวม ที่คงเหลือภายหลังการรวมกลุ่ม โดยใช้ตัวกลางในการรวมกลุ่ม คือ น้ำมันถั่วเหลืองและน้ำมันจากเมล็ดดอกทานตะวัน พบว่าเมื่อใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำมันกับถ่านหิน 20:80 โดยน้ำหนักถ่านหินจะให้ผลในการขจัดสารประกอบอินทรีย์ในถ่านหินได้ดี แต่เมื่ออัตราส่วนระหว่างน้ำมันกับถ่านหินเพิ่มขึ้น จะให้ผลการทดลองที่ไม่แตกต่างกันมากนัก

Cebeci, Y. และ Eroglu, N. (1998) ทำการทดลองเพื่อศึกษาชนิดของตัวกลางที่เหมาะสมสำหรับการรวมกลุ่มของถ่านหินลิกไนต์ โดยใช้ถ่านหินลิกไนต์จากแหล่ง Yozgat Ayridam บดผ่านตะแกรงร่อนขนาด 75 ไมโครเมตร ทำการรวมกลุ่มด้วยน้ำมันก๊าด, น้ำมันดีเซล, น้ำมันเตา, spindle oil, heavy neutral, bright stock และ light stock พบว่า ได้ผลการทดลองที่ดีที่สุดเมื่อใช้ของผสมระหว่างน้ำมันเตา 70% Acorga M5640 15% และ 2-ethyl hexanol 15% เป็นตัวกลางในการรวมกลุ่ม สามารถลดปริมาณแก้วในถ่านหินจาก 35.27% ให้เหลือ 17% และให้ส่วนที่สามารถเผาไหม้ได้ของถ่านหิน 90% เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิขณะทำการทดลอง (20 - 90 องศาเซลเซียส) พบว่า ให้ผลในการขจัดแก้วไม่แตกต่างกันมากนัก นอกจากนั้น ยังทำการศึกษาผลของความเป็นกรด-เบสเมื่อใช้น้ำมันต่างๆ เป็นตัวกลางในการรวมกลุ่ม (pH 3-12) พบว่าปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการรวมกลุ่มไม่ต่างกันมากนัก แต่ในภาวะที่เป็นกลาง-เบสเล็กน้อย (pH 7-8) จะได้ผลิตภัณฑ์ปริมาณมากที่สุด

จากงานวิจัยที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่ากระบวนการทำความสะอาดถ่านหินด้วยการรวมกลุ่มกับน้ำมัน เป็นกระบวนการทางกล เทคนิคในการปฏิบัติการไม่ยุ่งยากซับซ้อน แต่สามารถขจัดแก้วและกำมะถันในถ่านหินได้ในปริมาณสูง นอกจากนั้นกระบวนการทำความสะอาดถ่าน

หินด้วยการรวมกลุ่มกับน้ำมันไม่มีการนำสารเคมีราคาแพงเข้ามาใช้ในกระบวนการ แต่ใช้น้ำมันซึ่งเป็นสารที่มีราคาไม่แพงและหาได้ง่าย ในงานวิจัยการทำความสะอาดถ่านหินด้วยการรวมกลุ่มกับน้ำมันส่วนใหญ่นิยมใช้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนประเภทน้ำมันปิโตรเลียมเป็นตัวกลางในการรวมกลุ่มถ่านหิน ในขณะที่งานวิจัยของ Garcia และคณะ (1996) พบว่ามีความเป็นไปได้ที่มีการนำน้ำมันจากพืชประยุกต์ใช้ในกระบวนการรวมกลุ่มถ่านหิน

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้นเป็นจุดสนใจที่จะประยุกต์ใช้กระบวนการทำความสะอาดถ่านหินโดยการรวมกลุ่มด้วยน้ำมัน เพื่อทำความสะอาดถ่านหินในประเทศไทย งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ถ่านหินแหล่งแม่เมาะซึ่งมีปริมาณแถ้าและกำมะถันในถ่านหินสูง เป็นตัวอย่างถ่านหินสำหรับงานวิจัย ในส่วนของน้ำมันซึ่งเป็นตัวกลางที่ใช้ในการรวมกลุ่ม น้ำมันปาล์มดิบเป็นน้ำมันที่มีราคาถูกและมีปริมาณการผลิตภายในประเทศสูง หากมีการประยุกต์เพื่อนำน้ำมันปาล์มดิบใช้ในกระบวนการทำความสะอาดถ่านหิน อาจเป็นการส่งเสริมในด้านเกษตรกรรมปาล์มน้ำมันอีกทางหนึ่งด้วย จึงทำการวิจัยเปรียบเทียบสมบัติของผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันที่ได้จากการรวมกลุ่มถ่านหินกับน้ำมันปาล์มดิบ และน้ำมันเตา ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

การดำเนินงานทดลอง

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 อุปกรณ์ในการเตรียมตัวอย่างถ่านหิน

- ตะแกรงร่อน ASTM standard sieves เบอร์ 35, 60, 200
- เครื่องบดถ่านหินชนิด hammer mill
- เครื่องบดถ่านหินชนิด cross beater mill

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการรวมกลุ่มถ่านหินกับน้ำมัน

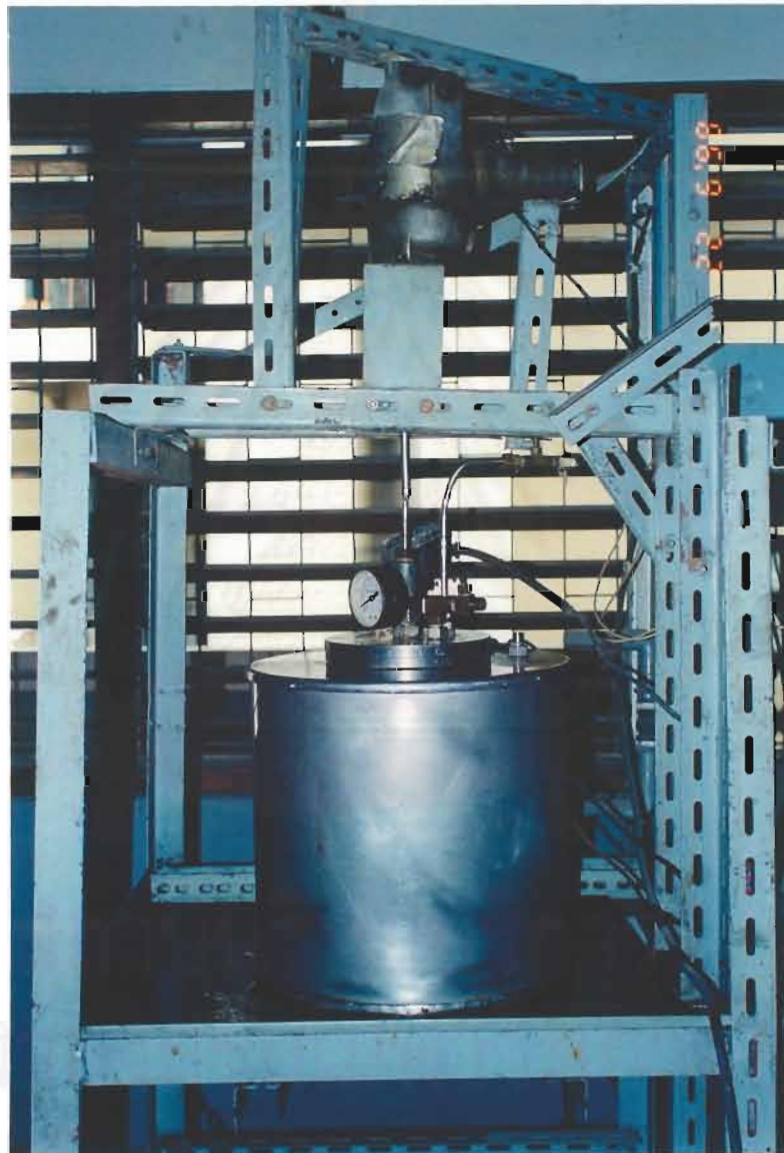
ในงานวิจัยรวมกลุ่มถ่านหินกับน้ำมันใช้ชุดการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.1 โดยมีเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนไม่ต่อเนื่อง (batch stirred tank reactor) ซึ่งมีลักษณะเป็นถังกวนที่มีฝาปิดแน่น บรรจุอยู่ในอ่างน้ำมัน (oil bath) ที่เป็นตัวให้ความร้อน ในการดำเนินการทดลองได้จัดเครื่องมืออุปกรณ์ดังต่อไปนี้

ก. อ่างน้ำมัน ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel) มีความสูง 34 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 33 เซนติเมตร มีฉนวนทำด้วยใยแก้วหนา 2.54 เซนติเมตร หุ้มอ่างน้ำมันเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน ภายในอ่างน้ำมันบรรจุน้ำมัน Essotherm ปริมาตร 10 ลิตร มีขดลวดไฟฟ้า ขนาด 2500 วัตต์เพื่อให้ความร้อนแก่น้ำมันจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการ และมีเทอร์โมมิเตอร์เสียบติดอยู่เพื่อวัดอุณหภูมิของน้ำมัน มีเทอร์โมคัปเปิลแบบ K (K type thermometer) และเครื่องควบคุมอุณหภูมิ (temperature controller) แบบ proportional ควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ตามที่ต้องการ

ข. เครื่องปฏิกรณ์ถังกวน เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลองมีขนาด 1 ลิตร ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม หนา 0.6 เซนติเมตร สูง 15.7 เซนติเมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10.4 เซนติเมตร บริเวณขอบบนของถังกวนมีลักษณะเป็นหน้าแปลน (flange) หนา 1.21 เซนติเมตร สำหรับประกอบกับส่วนของฝาปิดถังกวน ซึ่งยึดติดกันด้วยนอต ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ฝาปิดถังกวนทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิมหนา 1.1 เซนติเมตร มีแผ่นกั้น (baffle) 4 แผ่นเชื่อมติดอยู่ด้านล่างของฝาปิด ตรงกึ่งกลางของฝาปิดมีถังกวน (stirrer) ที่สั่นปลายเป็นใบพัด 4 แฉก รอบถังกวนมีท่อดูดสารละลาย

นอกจากถังกวน ท่อปรับความดันภายในถังกวน อุปกรณ์วัดความดันภายในถังกวนแบบบูร์ดอง (Bourdon pressure gauge) และเทอร์โมมิเตอร์ที่ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิภายในถังกวน

ค. มอเตอร์ ที่ใช้ในการหมุนใบพัดกวนเป็นมอเตอร์ขนาด 1/8 แรงม้า ติดตั้งอยู่กับแกนเหล็กด้านบน การหมุนของใบพัดกวนจะอาศัยแรงขับจากมอเตอร์ ความเร็วของใบพัดกวนปรับได้ ตั้งแต่ 200 – 800 rpm ดังรูปที่ 3.1 แสดงให้เห็นมอเตอร์ที่ต่ออยู่ข้างบนเครื่องปฏิกรณ์ถังกวน



รูปที่ 3.1 ชุดเครื่องมือการทดลองรวมกลุ่มถ่านหินกับน้ำมัน



รูปที่ 3.2 เครื่องปฏิกรณ์ถึงกวน

3.2 ตัวอย่างถ่านหินที่ใช้ในการทดลอง

ใช้ตัวอย่างถ่านหินจากเหมืองแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ที่มีปริมาณแฉะในตัวอย่างถ่านหินสูง บดละเอียด ร่อนแยกขนาด 250 – 500 ไมโครเมตร 75 – 250 ไมโครเมตร และต่ำกว่า 75 ไมโครเมตร

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

1. เตรียมตัวอย่างถ่านหินเพื่อนำไปวิเคราะห์
2. ทดสอบสมบัติเบื้องต้นของน้ำมันที่ใช้ในการทดลอง
3. ทดลองรวมกลุ่มถ่านหินกับน้ำมันในภาวะต่างๆ
 - ก. น้ำมันเตา และ น้ำมันปาล์มดิบ
 - ข. ขนาดถ่านหินต่ำกว่า 75 ไมโครเมตร, 75- 250 ไมโครเมตร และ 250 – 500 ไมโครเมตร
 - ค. ปริมาณถ่านหินในน้ำร้อยละ 10, 15, 20, 25, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก
 - ง. ปริมาณน้ำมันที่ใช้อยู่ละ 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนักถ่านหิน
 - จ. เวลาที่ใช้ในการรวมกลุ่มถ่านหินกับน้ำมัน 10, 15, 20, 30 และ 40 นาที
4. วิเคราะห์สมบัติของถ่านหินและผลิตภัณฑ์ที่ได้
 - ก. การหาปริมาณความชื้นในตัวอย่างถ่านหิน (Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample Coal and Coke), ASTM D 3173
 - ข. การหาปริมาณเถ้าในตัวอย่างถ่านหิน (Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample Coal and Coke from Coal), ASTM D 3174
 - ค. การหาปริมาณสารระเหยในตัวอย่างถ่านหิน (Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample Coal and Coke), ASTM D 3175
 - ง. การหาปริมาณกำมะถันรวม (Standard Test Method for Total Sulfur in the Analysis Sample Coal and Coke), ASTM D 3177 และรูปแบบกำมะถันในตัวอย่างถ่านหิน (Standard Test Method for form of Sulfur in Coal), ASTM D 2492
 - จ. วิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบในเถ้าถ่านหิน และเถ้าผลิตภัณฑ์ถ่านหินผสมน้ำมัน ที่ได้จากการทดลองที่ดีที่สุด ด้วยเครื่องมือ x- ray fluorescence spectrometer
5. วิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อสรุปภาวะและตัวแปรที่มีผลต่อการทำความสะอาดถ่านหินด้วยการรวมกลุ่มกับน้ำมัน

3.4 วิธีการทดลอง

1. การเตรียมตัวอย่างถ่านหินเพื่อนำมาวิเคราะห์สมบัติ

บดตัวอย่างถ่านหินด้วย Hammer mill จากนั้นนำตัวอย่างมาบดละเอียดด้วย Cross beater mill ร่อนแยกขนาดโดยใช้ตะแกรงร่อนแยกขนาด เพื่อให้ได้อนุภาคที่มีขนาดตามต้องการ

2. ทำการวิเคราะห์เชิงประมาณ (Proximate Analysis) วิเคราะห์หาปริมาณกำมะถันรวม และรูปแบบกำมะถันในถ่านหินก่อนการทดลอง

3. ทดสอบสมบัติเบื้องต้นของน้ำมันที่ใช้ในการทดลอง

4. ทดลองรวมกลุ่มถ่านหินกับน้ำมันตามขั้นตอนการทดลองดังนี้

ก. ชั่งตัวอย่างถ่านหินที่ได้จากการเตรียมตามข้อ 3.4.1 ปริมาณ 45 ± 0.1 กรัมบรรจุลงในเครื่องปฏิกรณ์ หลังจากนั้นเติมน้ำกลั่น 300 มิลลิลิตร

ข. เปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิอ่างน้ำมันที่ 30 องศาเซลเซียส

ค. เปิดสวิตช์มอเตอร์เครื่องกวน ควบคุมความเร็วรอบที่ 700 rpm นาน 5 นาที

ง. เติมน้ำมันตามชนิดและอัตราส่วนที่ต้องการศึกษาได้แก่

— น้ำมันปาล์มและน้ำมันเตา

— ปริมาณน้ำมันในถ่านหินร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนักถ่านหิน

จ. กวนของผสมถ่านหิน - น้ำ - น้ำมันนาน 15 นาที ปิดเครื่องกวน

ฉ. แยกถ่านหินออกจากของผสมด้วยตะแกรงขนาดเหมาะสม อบแห้งถ่านหินในเตาอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส นาน 1 คืน ชั่งน้ำหนักถ่านหิน

ช. กรองส่วนของเหลวที่ผ่านการกรองด้วยตะแกรง จากข้อ ฉ ด้วยการกรองสุญญากาศ เพื่อแยกอนุภาคถ่านหินที่ปนอยู่ในของเหลวส่วนนี้ อบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส นาน 1 คืน ชั่งน้ำหนักถ่านหิน

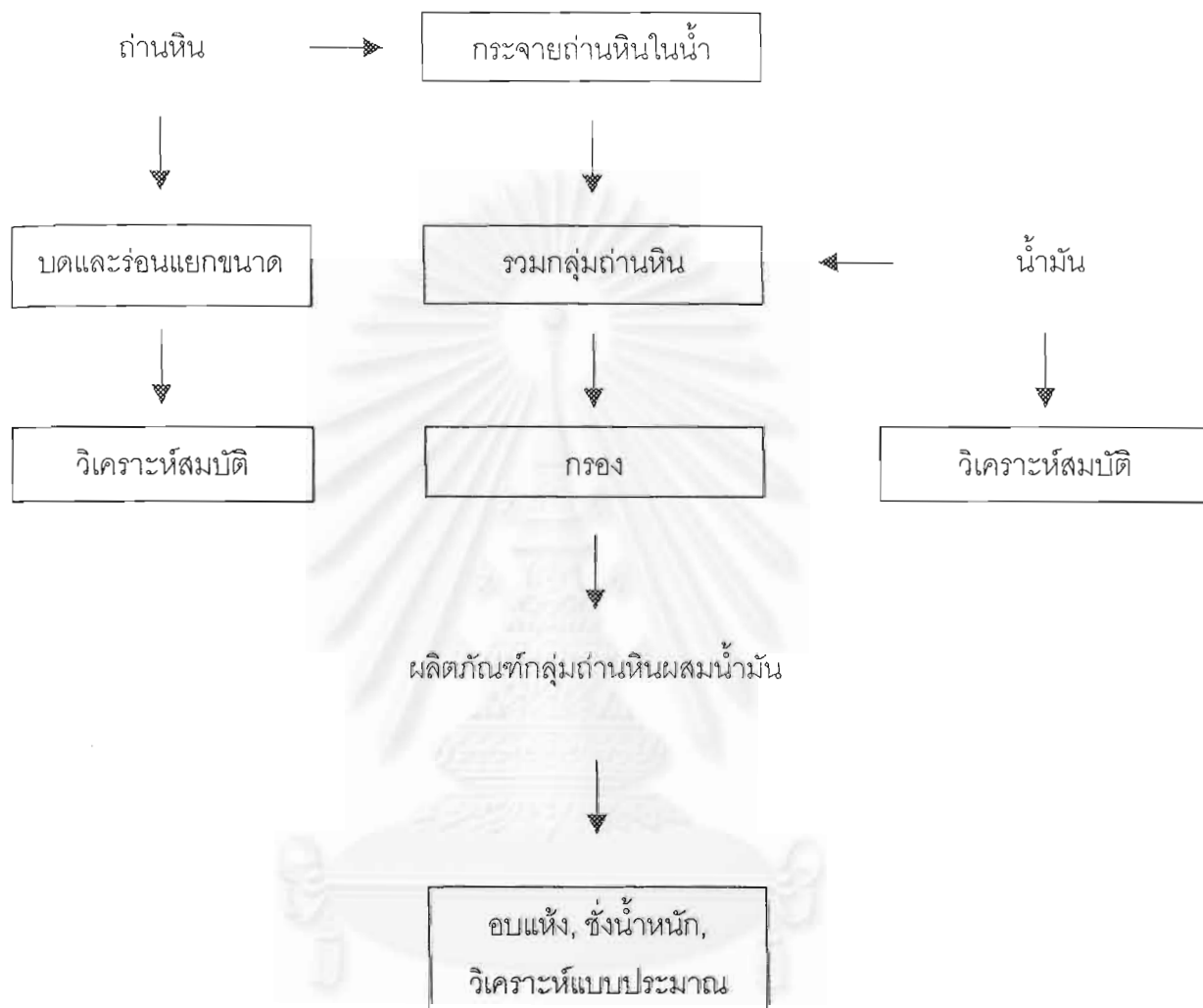
ซ. หากภาวะที่เหมาะสมในการทดลอง โดยศึกษาตัวแปรต่างๆ ได้แก่

— ปริมาณถ่านหินในของผสมร้อยละ 10, 15, 20, 25, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก

— เวลาที่ใช้ในการรวมกลุ่มถ่านหิน 10, 20, 30 และ 40 นาที

— ขนาดถ่านหิน ต่ำกว่า 75 ไมโครเมตร, 75 - 250 ไมโครเมตร และ 250 - 500

ไมโครเมตร



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการทดลอง

3.5 การคำนวณ

1. ร้อยละผลิตภัณฑ์ (% yield)

$$\text{yield} = 100 \left(\frac{wt_{\text{agglomerate}}}{wt_{\text{coal}} + wt_{\text{oil}}} \right)$$

2. ร้อยละการได้กลับคืนของสารอินทรีย์ (% organic matter recovery, OMR)

$$\text{OMR} = 100(\text{yield}) \left(\frac{100 - \%ash_{\text{agglomerate}}}{100 - \%ash_{\text{coal}}} \right)$$

3. ร้อยละการขจัดเถ้า (% ash rejection, AR)

$$\text{AR} = 100 \frac{[\%ash_{\text{coal}} - (\%ash_{\text{agglomerate}} \times \text{yield})]}{\%ash_{\text{coal}}}$$

4. ร้อยละการขจัดกำมะถันรวม (% total sulfur rejection, TSR)

$$\text{TSR} = 100 \frac{[\%s_{\text{coal}} - (\%s_{\text{agglomerate}} \times \text{yield})]}{\%s_{\text{coal}}}$$

5. ร้อยละการขจัดกำมะถันไพไรต์ (% pyrite sulfur rejection, PSR)

$$\text{PSR} = 100 \frac{[\%ps_{\text{coal}} - (\%ps_{\text{agglomerate}} \times \text{yield})]}{\%ps_{\text{coal}}}$$

6. ร้อยละการขจัดกำมะถันซัลเฟต (% sulfate sulfur rejection, SSR)

$$\text{SSR} = 100 \frac{[\%ss_{\text{coal}} - (\%ss_{\text{agglomerate}} \times \text{yield})]}{\%ss_{\text{coal}}}$$

7. ร้อยละการกำจัดกำมะถันอินทรีย์ (% organic sulfur rejection, OSR)

$$OSR = 100 \frac{[\%OS_{coal} - (\%OS_{agglomerate} \times yield)]}{\%OS_{coal}}$$

โดยที่

$w_{t_{coal}}$	คือ	น้ำหนักของถ่านหินเริ่มต้น (กรัม)
$w_{t_{oil}}$	คือ	น้ำหนักของน้ำมันที่ใช้ (กรัม)
$w_{t_{agglomerate}}$	คือ	น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการรวมกลุ่ม (กรัม)
ash_{coal}	คือ	ร้อยละของเถ้าในถ่านหินเริ่มต้น
$ash_{agglomerate}$	คือ	ร้อยละของเถ้าในผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมัน
S_{coal}	คือ	ร้อยละของกำมะถันรวมของถ่านหินเริ่มต้น
$S_{agglomerate}$	คือ	ร้อยละของกำมะถันรวมของผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมัน
PS_{coal}	คือ	ร้อยละของกำมะถันไพไรต์ของถ่านหินเริ่มต้น
$PS_{agglomerate}$	คือ	ร้อยละของกำมะถันไพไรต์ของผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมัน
SS_{coal}	คือ	ร้อยละของกำมะถันซัลเฟตของถ่านหินเริ่มต้น
$SS_{agglomerate}$	คือ	ร้อยละของกำมะถันซัลเฟตของผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมัน
OS_{coal}	คือ	ร้อยละของกำมะถันอินทรีย์ของถ่านหินเริ่มต้น
$OS_{agglomerate}$	คือ	ร้อยละของกำมะถันอินทรีย์ของผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลอง

4.1 การวิเคราะห์ถ่านหินและกำมะถันในถ่านหิน

การวิเคราะห์ถ่านหินแบบประมาณ เป็นการวิเคราะห์สมบัติถ่านหินเบื้องต้นตามมาตรฐาน ASTM D 3173 – 3175 ประกอบด้วยการวิเคราะห์ความชื้น สารระเหย เถ้า และคาร์บอนคงตัว ส่วนปริมาณกำมะถันรวมและรูปแบบกำมะถันในตัวอย่างถ่านหินได้แก่ กำมะถันซัลเฟต กำมะถันไพไรต์ กำมะถันอินทรีย์ ได้ทำการวิเคราะห์ตาม ASTM D 3177 และ 2492 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังทำการวิเคราะห์องค์ประกอบถ่านหินแบบแยกธาตุโดยใช้เครื่องวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (CHNS analyzer) แสดงดังตารางที่ 4.1

ผลการวิเคราะห์พบว่า ตัวอย่างถ่านหินที่ใช้มีเถ้า สารระเหยและกำมะถันในปริมาณสูง โดยมีปริมาณเถ้าสูงกว่าร้อยละ 20 และ ตัวอย่างถ่านหินที่มีขนาดต่ำกว่า 75 ไมโครเมตรมีปริมาณเถ้าสูงถึงร้อยละ 36.06 ส่วนปริมาณกำมะถันรวมมีค่าสูงกว่าร้อยละ 4.80 และมีค่าสูงสุดร้อยละ 5.98 เมื่อถ่านหินมีขนาดต่ำกว่า 75 ไมโครเมตร เมื่อพิจารณารูปแบบกำมะถันที่พบในตัวอย่างถ่านหิน กำมะถันส่วนใหญ่อยู่ในรูปกำมะถันซัลเฟต เมื่อเปรียบเทียบสมบัติของถ่านหินที่มีขนาดต่างกันพบว่า ถ่านหินขนาดเล็กมีเถ้าและปริมาณกำมะถันรวมสูง แต่มีแนวโน้มลดลงเมื่อขนาดถ่านหินใหญ่ขึ้น ในขณะที่ปริมาณคาร์บอนคงตัวในถ่านหินมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อถ่านหินขนาดใหญ่ขึ้น

เมื่อทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุในถ่านหินด้วยเครื่องมือ Wavelength Dispersive x-ray fluorescence spectrometer แสดงดังตารางที่ 4.2 พบว่า ซิลิกอนเป็นธาตุที่มีปริมาณมากที่สุด ในถ่านหิน รองลงมาคือ ธาตุเหล็ก กำมะถัน อะลูมิเนียม และ แคลเซียม ตามลำดับ นอกจากนี้ยังประกอบด้วยธาตุแมกนีเซียม โพแทสเซียม และ โซเดียม บ้างเป็นส่วนน้อย

จากผลการวิเคราะห์ข้างต้นสรุปได้ว่า ตัวอย่างถ่านหินแม่เมาะที่ใช้มีคุณภาพต่ำ เพราะมีคาร์บอนคงตัวต่ำ เถ้าและกำมะถันในปริมาณสูง เนื่องจากตัวอย่างถ่านหินที่ได้จากเหมืองแม่เมาะจังหวัดลำปาง ไม่ได้ผ่านกระบวนการทำความสะอาดใดๆ ดังนั้นตัวอย่างถ่านหินนี้จึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในงานวิจัยการทำความสะอาดถ่านหินเพื่อเพิ่มคุณภาพถ่านหิน

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างถ่านหินแม่เมาะขนาดต่างๆ

องค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก (ไม่คิดความชื้น)		
	ขนาดต่ำกว่า 75 ไมโครเมตร	ขนาด 75 – 250 ไมโครเมตร	ขนาด 250 – 500 ไมโครเมตร
การวิเคราะห์แบบประมาณ			
ถ้ำ	36.06	30.31	20.72
สารระเหย	43.0	45.42	44.91
คาร์บอนคงตัว (ผลต่าง)	20.94	24.27	34.38
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ			
คาร์บอน	48.65	47.66	47.04
ไฮโดรเจน	3.20	3.42	3.82
ไนโตรเจน	0.83	1.16	1.04
ออกซิเจน (ผลต่าง)	5.28	11.64	22.55
รูปแบบกำมะถัน			
กำมะถันรวม	5.98	5.81	4.83
กำมะถันไพไรต์	0.67	0.50	0.31
กำมะถันซัลเฟต	2.31	2.02	1.88
กำมะถันอินทรีย์ (ผลต่าง)	3.00	3.29	2.64

ตารางที่ 4.2 ปริมาณธาตุองค์ประกอบหลักในถ้ำถ่านหินแม่เมาะขนาดต่ำกว่า 75 ไมโครเมตร
วิเคราะห์โดยเครื่องมือ x-ray fluorescence spectrometer

ธาตุ	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
ร้อยละ โดยน้ำหนัก	24.28	16.92	20.09	13.67	19.54	2.4	0.8	2.3

หมายเหตุ : ปริมาณธาตุที่วิเคราะห์ได้อยู่ในรูปของออกไซด์ของธาตุนั้นๆ

4.2 สมบัติของน้ำมันที่ใช้ในการรวมกลุ่มถ่านหิน

งานวิจัยได้ทำการทดลองรวมกลุ่มถ่านหินกับน้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันเตา จึงทำการวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของน้ำมันทั้งสองชนิด ได้แก่ ความหนาแน่น ความหนืดของน้ำมันด้วยเครื่องวัดความหนืด Brookfield viscometer แรงตึงผิวระหว่างวัฏภาคของน้ำกับน้ำมันด้วยวิธี ring method โดยใช้ KSV tensiometer และปริมาณเถ้าในน้ำมัน สมบัติต่างๆ ของน้ำมัน ดังตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า ความหนาแน่น และ แรงตึงผิวระหว่างวัฏภาคน้ำกับน้ำมันของน้ำมันปาล์มมีค่าต่ำกว่าน้ำมันเตาเพียงเล็กน้อย ในขณะที่ความหนืดของน้ำมันปาล์มต่ำกว่าน้ำมันเตามาก ซึ่งความหนืดของน้ำมันจะมีผลต่อการกระจายตัวเป็นหยดเล็กๆของน้ำมัน ในน้ำขณะทำการรวมกลุ่มถ่านหิน เมื่อกวนของผสมระหว่างน้ำมันปาล์มกับน้ำ น้ำมันปาล์มซึ่งมีความหนืดต่ำจะสามารถแตกออกเป็นหยดเล็กๆได้ง่ายเมื่อถูกแรงกระทำจากการกวน ส่งผลให้การกระจายตัวของหยदन้ำมันปาล์มในน้ำเป็นไปได้ง่ายทั่วถึงกว่าน้ำมันเตา เมื่อพิจารณาปริมาณเถ้าที่มีอยู่ในน้ำมันพบว่า น้ำมันปาล์มมีปริมาณเถ้าต่ำกว่าน้ำมันเตา

นอกจากนั้นได้ทำการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันที่มีในน้ำมันปาล์มและน้ำมันเตาด้วยเครื่องมือ FT-IR ผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 จากการแปรผลการวิเคราะห์พบหมู่ฟังก์ชันต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.4 หมู่ฟังก์ชันที่พบในน้ำมันปาล์มสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ กลุ่มของ alkyl groups และ aliphatic hydrocarbons ซึ่งไม่สามารถละลายในน้ำได้ ในขณะที่กลุ่มของ ester และ carbonyl compounds เป็นกลุ่มของหมู่ฟังก์ชันที่สามารถละลายในน้ำได้บ้าง แต่หมู่ฟังก์ชันที่พบในน้ำมันเตา ได้แก่ alkyl groups aliphatic hydrocarbons และ normal alkane เป็นกลุ่มของหมู่ฟังก์ชันที่ไม่สามารถละลายน้ำได้เลย

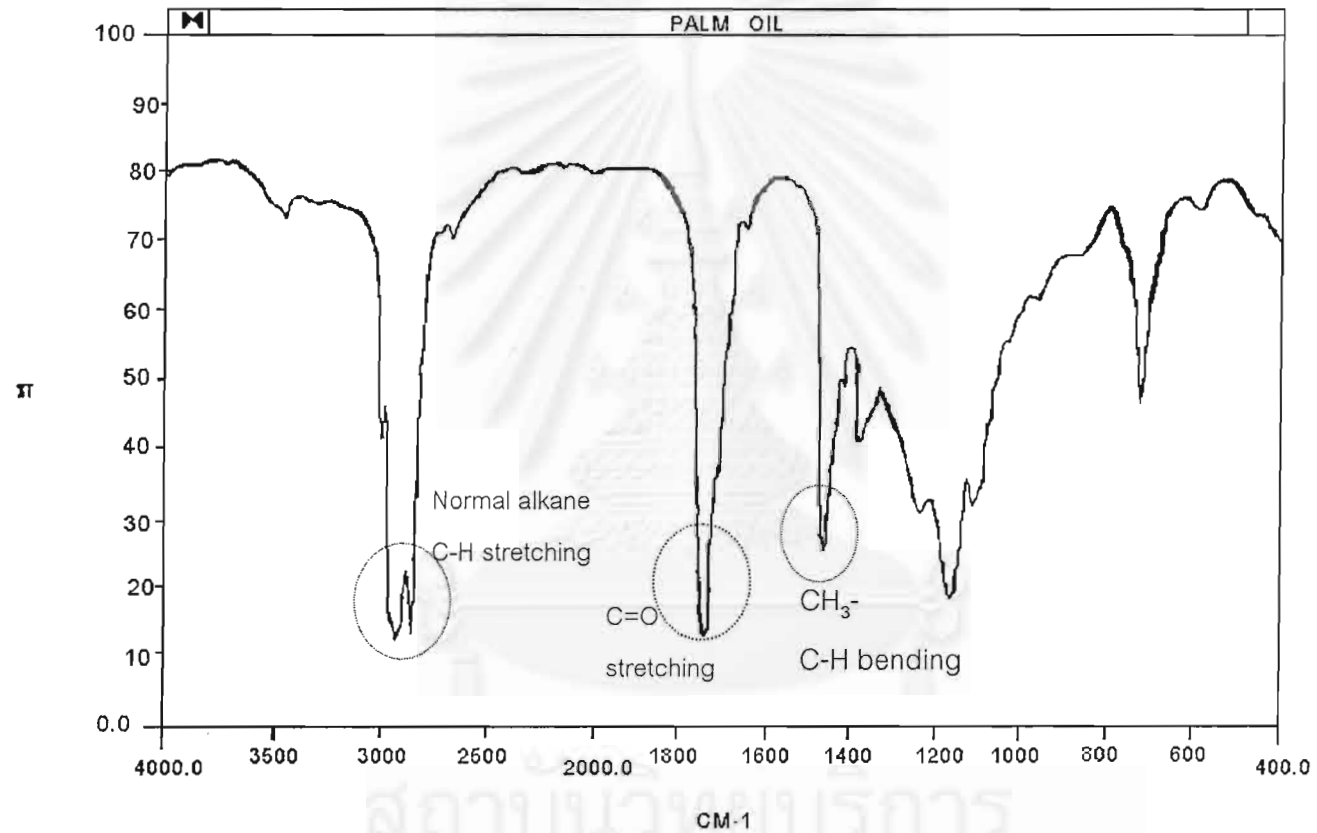
จากสมบัติของน้ำมันและหมู่ฟังก์ชันที่พบในน้ำมันทั้งสองชนิด สรุปได้ว่า น้ำมันปาล์มสามารถเกิดการกระจายตัวในน้ำได้ดีกว่าน้ำมันเตา เนื่องจากสมบัติในด้านความหนืดและหมู่ฟังก์ชันที่พบในน้ำมัน

ตารางที่ 4.3 สมบัติของน้ำมันที่ใช้ในการทดลอง

สมบัติน้ำมัน	น้ำมันปาล์มดิบ	น้ำมันเตา
ความหนาแน่น (g cm^{-3})	0.867	0.915
ความหนืด (cps)	12.7	268
แรงตึงผิวระหว่างผิวภาคน้ำกับน้ำมัน (mN m^{-1})	32.1	35.2
ร้อยละของกำมะถันในน้ำมัน	0.0009	0.005

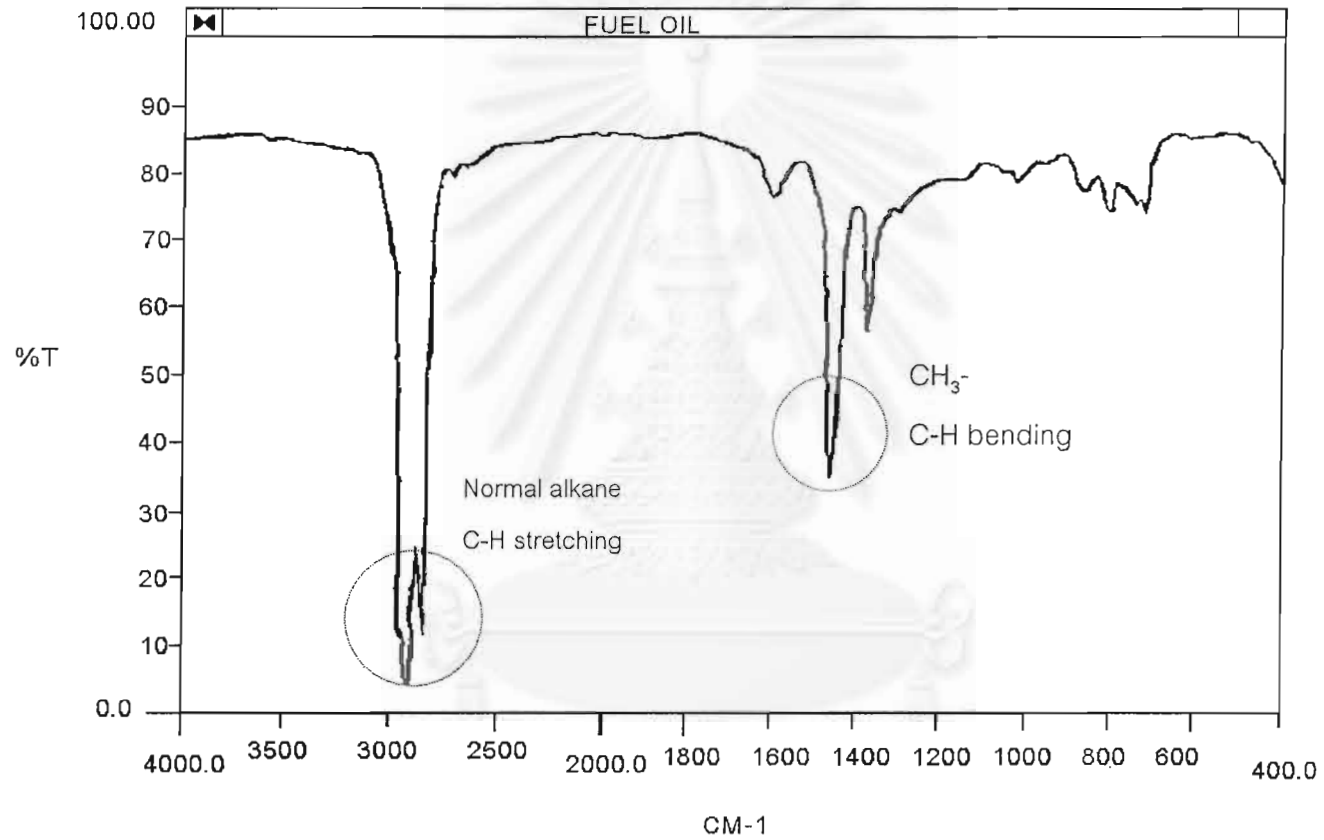
ตารางที่ 4.4 การแปรผลวิเคราะห์หุ่มู่ฟังก์ชันที่มีในน้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันเตา
(วิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ FT-IR ผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.1 และ 4.2)

น้ำมันปาล์มดิบ	น้ำมันเตา
alkyl groups :	alkyl groups :
- general 202 cm^{-1}	- general 202 cm^{-1}
- long chain 204 cm^{-1}	
ester 1402 cm^{-1}	
aliphatic hydrocarbons 2116 cm^{-1}	aliphatic hydrocarbons 2116 cm^{-1}
carbonyl compounds :	normal alkane 2950 cm^{-1}
- ester 4925 cm^{-1}	
- aliphatic 4920 cm^{-1}	



รูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันในน้ำมันปาล์มดิบ ด้วยเครื่องมือ FT-IR

สถาบันวิจัยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันในน้ำมันเตาด้วยเครื่องมือ FT-IR

4.3 ผลของน้ำมันต่อการปรับปรุงคุณภาพถ่านหิน

การทำความสะดวกถ่านหินโดยการรวมกลุ่มกับน้ำมัน ทำการทดลองโดยรวมกลุ่มถ่านหินขนาดต่ำกว่า 75 ไมโครเมตร ในเครื่องปฏิกรณ์ดังกล่าวแบบไม่ต่อเนื่องขนาด 1 ลิตร ความคุมอุณหภูมิขณะทดลองที่ 30 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบของการกวน 700 rpm ใช้น้ำกลั่น 400 มิลลิลิตร ถ่านหิน 60 กรัม (ถ่านหินในของผสมร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก) ตัวกลางในการรวมกลุ่มถ่านหินคือน้ำมันปาล์มดิบหรือน้ำมันเตา แปรปริมาณน้ำมันที่เติมลงในระบบ

4.3.1 การเปลี่ยนแปลงปริมาณเก่าและกำมะถัน

ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันเตาแบบประมาณแสดงดังตารางที่ 4.5 และ ตารางที่ 4.6 ตามลำดับ เมื่อนำผลการทดลองเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการขจัดเก่าในผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันกับร้อยละน้ำมันในกลุ่มถ่านหินดังรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมันในระบบ ร้อยละของการขจัดเก่ามีค่าสูงขึ้น และให้ค่าสูงสุดที่ร้อยละน้ำมันในกลุ่มถ่านหินค่าหนึ่ง หลังจากนั้น เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมันมากขึ้นให้ผลในการขจัดเก่าได้ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก จากผลการทดลองรวมกลุ่มถ่านหินกับน้ำมันปาล์มและน้ำมันเตา พบว่า การรวมกลุ่มถ่านหินด้วยน้ำมันปาล์มสามารถลดเก่าในถ่านหินได้มากกว่าการรวมกลุ่มถ่านหินด้วยน้ำมันเตา ภาวะการทดลองที่ให้ผลในการขจัดเก่าได้มากที่สุดคือ การรวมกลุ่มถ่านหินด้วยน้ำมันปาล์ม ปริมาณน้ำมันในกลุ่มถ่านหินร้อยละ 30 สามารถขจัดเก่าได้ร้อยละ 70.68

จากความความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการขจัดกำมะถันในผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันกับร้อยละน้ำมันในกลุ่มถ่านหินดังรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมันในการรวมกลุ่มถ่านหินกับน้ำมันปาล์มดิบ ร้อยละของการขจัดกำมะถันมีค่าสูงขึ้น จนกระทั่งถึงร้อยละน้ำมันในกลุ่มถ่านหินที่เหมาะสม จะให้ผลในการขจัดกำมะถันสูงสุด หลังจากนั้น เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมันมากขึ้นสามารถขจัดกำมะถันได้น้อยลง ในขณะที่การรวมกลุ่มถ่านหินกับน้ำมันเตา โดยใช้ปริมาณน้ำมันมากขึ้น จะให้ผลในการขจัดกำมะถันเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ แต่คาดว่า หากรวมกลุ่มถ่านหินกับน้ำมันเตาที่ร้อยละน้ำมันในกลุ่มถ่านหินสูงกวานี้ อาจให้ผลในการขจัดกำมะถันต่ำลงเช่นเดียวกับการรวมกลุ่มถ่านหินกับน้ำมันปาล์มดิบ

ตารางที่ 4.5 สมบัติของผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันเมื่อรวมกลุ่มถ่านหินกับน้ำมันปาล์มดิบ
โดยใช้ปริมาณน้ำมันในกลุ่มถ่านหินต่างกัน

ภาวะในการทดลอง :

ขนาดถ่านหิน	ต่ำกว่า 75 ไมโครเมตร
ปริมาณถ่านหินในของผสม	ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก
อุณหภูมิ	30 องศาเซลเซียส
ความเร็วรอบในการกวน	700 rpm
เวลาในการรวมกลุ่ม	15 นาที

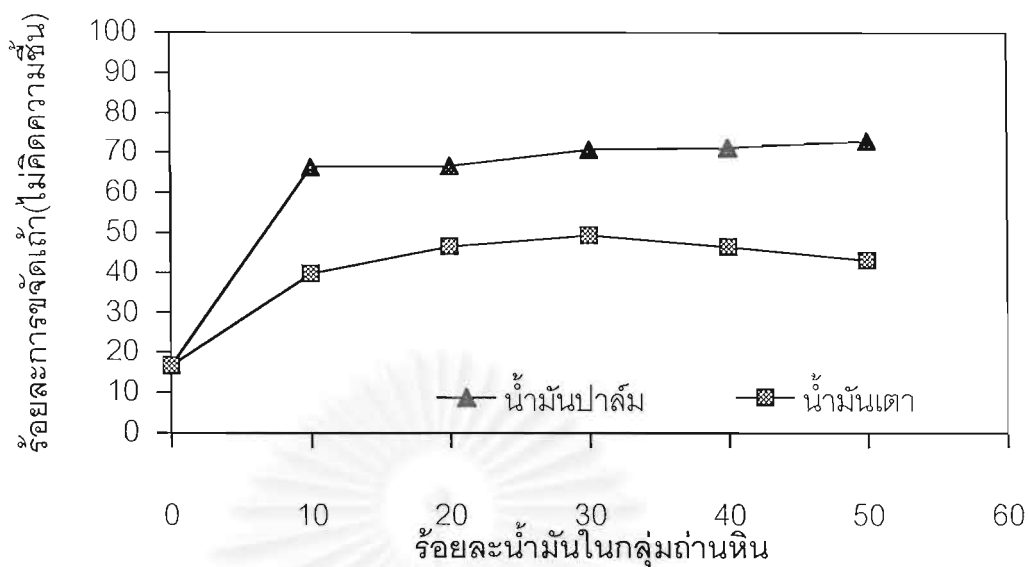
สมบัติ	ถ่านหิน เริ่มต้น	ร้อยละน้ำมันในกลุ่มถ่านหิน					
		0	10	20	30	40	50
<u>การวิเคราะห์แบบประมาณ</u> (ร้อยละ, ไม่คิดความชื้น)							
สารระเหย	43.00	38.35	47.96	43.40	46.20	47.42	51.67
เถ้า	36.06	30.02	18.96	17.02	14.59	15.86	16.29
คาร์บอนคงตัว	20.94	31.63	33.09	39.58	39.21	36.72	32.05
ปริมาณกำมะถันรวม	5.98	4.45	3.45	2.15	2.17	3.65	3.84
กำมะถันไพไรต์	0.67	0.44	0.13	0.09	0.03	0.07	0.12
กำมะถันซัลเฟต	2.31	1.49	0.54	0.27	0.22	0.35	0.64
กำมะถันอินทรีย์	3.00	2.52	2.78	1.92	1.92	2.23	2.09
ร้อยละผลิตภัณฑ์		-	63.85	70.66	72.45	65.24	60.05
ร้อยละการได้กลับคืนของสารอินทรีย์		-	80.92	91.69	96.77	85.85	78.61
ร้อยละการขจัดเถ้า		16.74	66.43	66.65	70.68	71.31	72.88
ร้อยละการขจัดกำมะถันรวม		25.54	63.16	74.63	73.73	71.06	71.48
ร้อยละการขจัดกำมะถันไพไรต์		34.33	87.61	90.83	96.76	93.29	89.60
ร้อยละการขจัดกำมะถันซัลเฟต		35.50	85.07	91.60	93.10	90.12	83.39
ร้อยละการขจัดกำมะถันอินทรีย์		15.90	40.83	57.95	53.68	51.42	58.27

ตารางที่ 4.6 สมบัติของผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันเมื่อรวมกลุ่มถ่านหินกับน้ำมันเตา
โดยใช้ปริมาณน้ำมันในกลุ่มถ่านหินต่างกัน

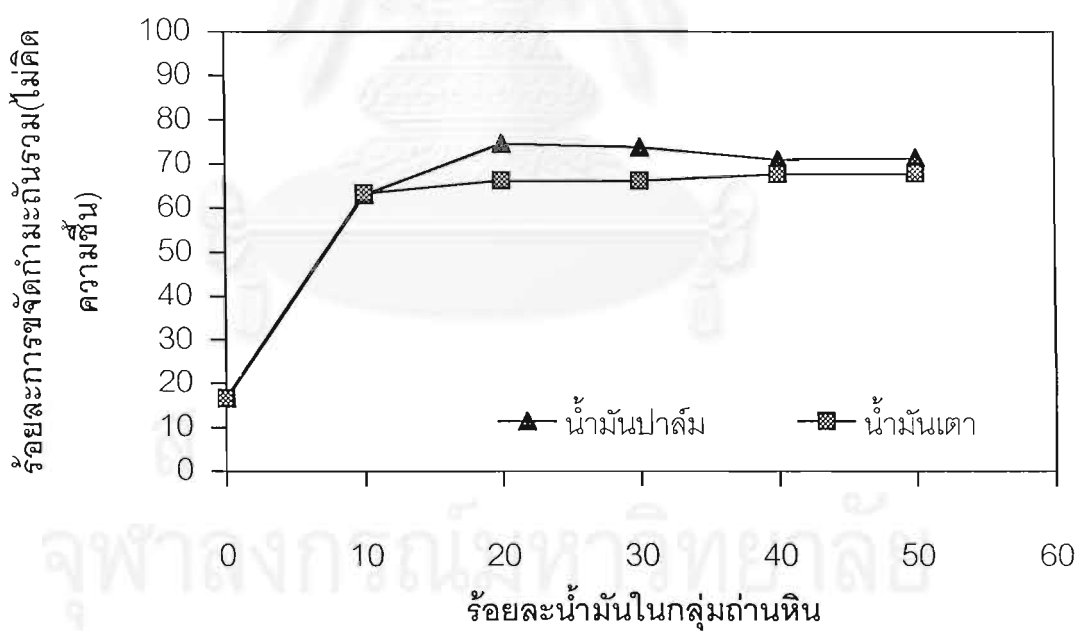
ภาวะในการทดลอง :

ขนาดถ่านหิน	ต่ำกว่า 75 ไมโครเมตร
ปริมาณถ่านหินในของผสม	ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก
อุณหภูมิ	30 องศาเซลเซียส
ความเร็วรอบในการกวน	700 rpm
เวลาในการรวมกลุ่ม	15 นาที

สมบัติ	ถ่านหิน เริ่มต้น	ร้อยละน้ำมันในกลุ่มถ่านหิน					
		0	10	20	30	40	50
<u>การวิเคราะห์แบบประมาณ</u> (ร้อยละ, ไม่คิดความชื้น)							
สารระเหย	43.00	38.35	37.60	39.16	41.31	47.28	39.52
เถ้า	36.06	30.02	31.16	28.53	25.81	27.55	29.98
คาร์บอนคงตัว	20.94	31.63	31.24	32.32	32.89	25.17	30.50
ปริมาณกำมะถันรวม	5.98	4.45	3.15	2.99	2.86	2.75	2.80
กำมะถันไพไรต์	0.67	0.44	0.26	0.30	0.28	0.32	0.31
กำมะถันซัลเฟต	2.31	1.49	0.88	0.76	0.71	0.86	0.92
กำมะถันอินทรีย์	3.00	2.52	2.01	1.93	1.87	1.56	1.57
ร้อยละผลิตภัณฑ์		-	69.62	67.42	70.64	70.06	68.44
ร้อยละการได้กลับคืนของสารอินทรีย์		-	74.95	75.35	81.96	79.38	74.94
ร้อยละการขจัดเถ้า		16.74	39.83	46.66	49.44	46.46	43.10
ร้อยละการขจัดกำมะถันรวม		25.54	63.33	66.29	66.22	67.83	67.98
ร้อยละการขจัดกำมะถันไพไรต์		34.33	72.57	69.41	70.48	66.12	68.33
ร้อยละการขจัดกำมะถันซัลเฟต		35.50	73.60	77.94	78.29	73.92	72.89
ร้อยละการขจัดกำมะถันอินทรีย์		15.90	53.35	56.63	55.97	63.52	64.11



รูปที่ 4.3 ร้อยละการขจัดไขมันในผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันเมื่อรวมกลุ่มถ่านหินกับน้ำมันโดยใช้ปริมาณน้ำมันในกลุ่มถ่านหินต่างกัน

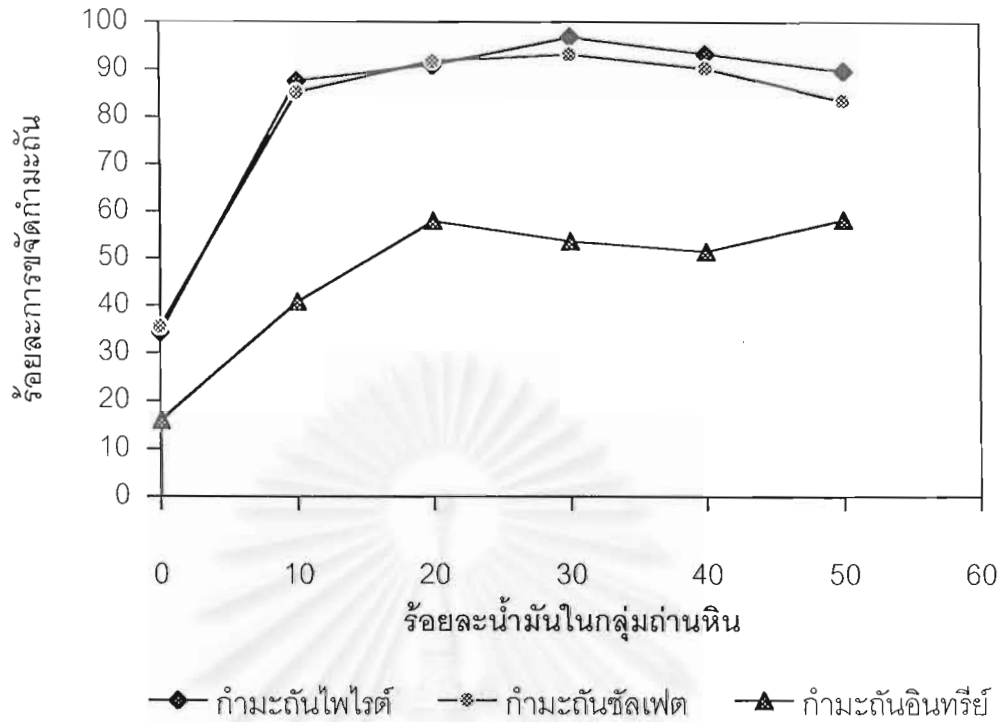


รูปที่ 4.4 ร้อยละการขจัดไขมันรวมในผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันเมื่อรวมกลุ่มถ่านหินกับน้ำมันโดยใช้ปริมาณน้ำมันในกลุ่มถ่านหินต่างกัน

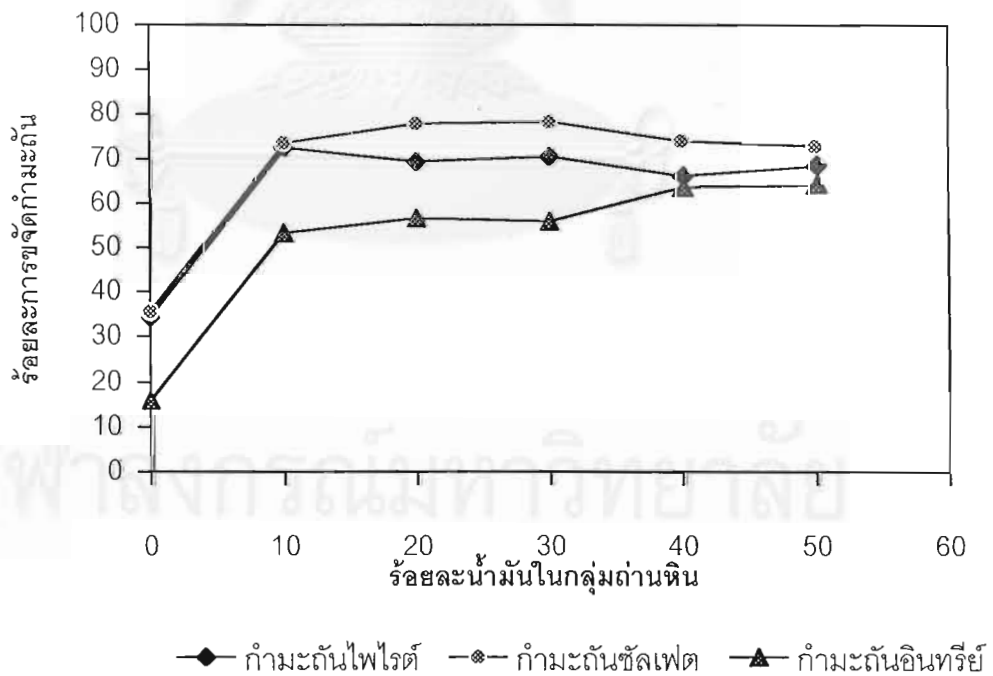
เมื่อพิจารณาถึงรูปแบบของกำมะถันที่ถูกขจัดโดยวิธีนี้ (รูปที่ 4.5 และ 4.6) พบว่าสามารถขจัดกำมะถันไพไรต์ได้มากกว่ากำมะถันซัลเฟต และกำมะถันอินทรีย์จะถูกขจัดได้ในปริมาณน้อยที่สุด โดยสามารถขจัดกำมะถันไพไรต์และกำมะถันซัลเฟตได้สูงกว่าร้อยละ 90 ในขณะที่สามารถขจัดกำมะถันอินทรีย์ได้เพียงร้อยละ 50

Garcia, Martinez-Tarazona และ Vega (1996) ได้อธิบายการลดเถ้าและกำมะถันในถ่านหินด้วยกระบวนการรวมกลุ่มถ่านหินกับน้ำมันไว้ว่า เกิดขึ้นได้เนื่องจากในอนุภาคถ่านหินมีส่วนประกอบแร่ธาตุกระจายปะปนอยู่ทั่วไปในส่วนของเนื้อถ่านหิน เมื่อปริมาณน้ำมันที่ใช้ในการรวมกลุ่มถ่านหินน้อยไม่พอเพียงกับการรวมกลุ่มของถ่านหิน จึงเกิดการแข่งขันกันระหว่างอนุภาคถ่านหิน ถ่านหินที่มีปริมาณของเนื้อถ่านหินมาก(organic coal matrix) ซึ่งมีสมบัติทางพื้นผิวเป็นพวกไม่ชอบน้ำจะเกิดการรวมกลุ่มกับน้ำมันได้ดีกว่า ถ่านหินประเภทนี้จะมีปริมาณของสารประกอบแร่ธาตุน้อย ดังนั้นการรวมกลุ่มถ่านหินกับน้ำมันที่ร้อยละน้ำมันในกลุ่มถ่านหินต่ำ ถ่านหินที่เกิดการรวมกลุ่มในช่วงนี้จึงเป็นถ่านหินที่มีสารประกอบแร่ธาตุน้อย การขจัดเถ้าและกำมะถันจึงมีปริมาณน้อยด้วย เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมันในระบบให้มากขึ้น เป็นการเพิ่มโอกาสให้ถ่านหินเกิดการรวมกลุ่มได้มากขึ้น ปริมาณสารประกอบแร่ธาตุจากถ่านหินซึ่งเป็นส่วนที่ชอบน้ำ จึงถูกขจัดออกมาในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลให้เถ้าและกำมะถันคงเหลือในผลิตภัณฑ์มีปริมาณที่น้อยลง หากพิจารณารูปแบบกำมะถันที่สามารถขจัดได้ จะเห็นว่าสามารถขจัดกำมะถันไพไรต์ได้มากที่สุด เนื่องจากกำมะถันไพไรต์เป็นองค์ประกอบส่วนหนึ่งแทรกอยู่ในส่วนแร่ธาตุของถ่านหิน เมื่อทำการรวมกลุ่มถ่านหินกับน้ำมัน ส่วนของกำมะถันไพไรต์ที่แทรกอยู่ในถ่านหินอย่างไม่เสถียร จึงถูกขจัดออกโดยการละลายน้ำ รวมทั้งส่วนของกำมะถันซัลเฟตบางส่วนที่สามารถละลายน้ำได้ จึงทำให้ปริมาณกำมะถันซัลเฟตในผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันลดต่ำลง ในขณะที่กำมะถันอินทรีย์ซึ่งมีโครงสร้างพันธะเคมีหลายรูปแบบที่ซับซ้อนถูกขจัดด้วยกระบวนการรวมกลุ่มกับน้ำมันได้น้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกำมะถันไพไรต์และกำมะถันซัลเฟต

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



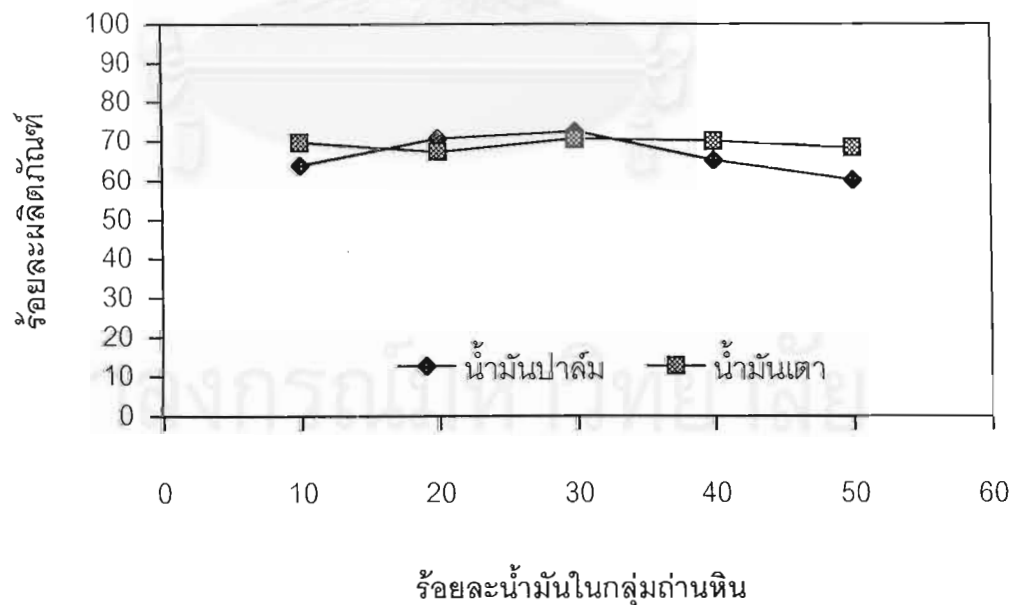
รูปที่ 4.5 ร้อยละการขจัดน้ำมันรูปแบบต่างๆในผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันปาล์มดิบ โดยใช้ปริมาณน้ำมันในกลุ่มถ่านหินต่างกัน



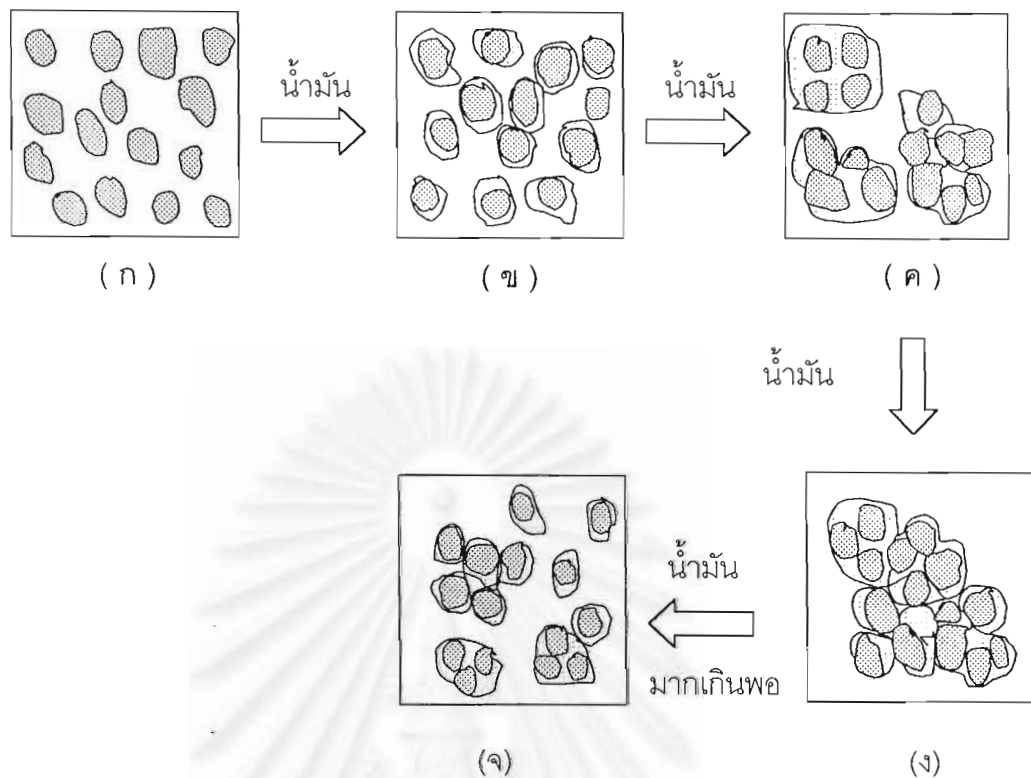
รูปที่ 4.6 ร้อยละการขจัดน้ำมันรูปแบบต่างๆในผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันเตา โดยใช้ปริมาณน้ำมันในกลุ่มถ่านหินต่างกัน

4.3.2 ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการรวมกลุ่มถ่านหินกับน้ำมัน

ร้อยละของผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันที่ได้จากการรวมกลุ่มถ่านหินกับน้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันเตาที่ร้อยละน้ำมันในกลุ่มถ่านหินต่างกัน แสดงดังรูปที่ 4.7 พบว่า เมื่อปริมาณน้ำมันที่ใช้ในการรวมกลุ่มน้อย การรวมกลุ่มถ่านหินจะเกิดขึ้นน้อย แต่ปริมาณผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสม น้ำมันจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆเมื่อปริมาณน้ำมันในระบบเพิ่มมากขึ้นจนถึงร้อยละน้ำมันในกลุ่มถ่านหินที่เหมาะสมกัน จะให้ปริมาณผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันที่มากที่สุด Petela (1991) ซึ่งศึกษาขนาดของกลุ่มถ่านหินภายหลังการรวมกลุ่มกับน้ำมัน อธิบายว่า ขนาดของผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันจะมีขนาดเพิ่มขึ้นเรื่อยๆอย่างต่อเนื่อง เมื่อปริมาณน้ำมันที่ใช้ในการรวมกลุ่มเพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.8ค) และมีขนาดใหญ่ที่สุดเมื่อความเข้มข้นของน้ำมันที่เติมถึงจุดวิกฤต (critical oil concentration) ซึ่งเป็นจุดสมดุลระหว่างปริมาณน้ำมันและถ่านหินที่ใช้ในการรวมกลุ่ม (รูปที่ 4.8ง) เมื่อเพิ่มน้ำมันให้มีปริมาณมากขึ้น ขนาดของกลุ่มถ่านหินยังมีขนาดที่คงที่ระยะหนึ่งจนกระทั่งปริมาณน้ำมันที่เติมลงไปนั้นมากเกินไปจนเกินไป ส่งผลให้อนุภาคถ่านหินที่มีการรวมตัวกันอยู่อย่างหลวมๆ เกิดการแตกกลุ่มออก กระจายปะปนในชั้นของน้ำมันที่กระจายบริเวณผิวหน้าของผสม (รูปที่ 4.8จ) เมื่อทำการกรองของผสมผ่านตะแกรงทำให้อนุภาคถ่านหินเหล่านี้ผ่านลงสู่เบื้องล่าง ไม่ติดค้างบนตะแกรงทำให้การได้กลับคืนมาของผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันมีค่าต่ำ จากผลการทดลองรวมกลุ่มถ่านหินแม่เมาะกับน้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันเตา พบว่า ร้อยละน้ำมันในกลุ่มถ่านหินที่ให้ปริมาณผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันสูงที่สุด คือ ร้อยละ 30



รูปที่ 4.7 ร้อยละของผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันเมื่อรวมกลุ่มถ่านหินกับน้ำมัน โดยใช้ปริมาณน้ำมันในกลุ่มถ่านหินต่างกัน



รูปที่ 4.8 การเกิดกลุ่มถ่านหินเมื่อปริมาณน้ำมันต่างกัน

4.4 ผลของปริมาณถ่านหินในของผสม

จากการทดลองเพื่อศึกษาชนิดของน้ำมันที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงคุณภาพถ่านหิน ด้วยกระบวนการรวมกลุ่มถ่านหินกับน้ำมัน พบว่า การรวมกลุ่มถ่านหินกับน้ำมันปาล์มดิบให้ผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันกลุ่มที่มีปริมาณต่ำและกำมะถันต่ำกว่าการรวมกลุ่มถ่านหินด้วยน้ำมันเตา ในการทดลองส่วนนี้จึงเลือกใช้น้ำมันปาล์มเป็นตัวกลางเพื่อรวมกลุ่มถ่านหิน โดยแปรปริมาณถ่านหินที่ใช้ในของผสมให้มีปริมาณมากขึ้นตั้งแต่ร้อยละ 10 ถึงร้อยละ 50 เพื่อศึกษาปริมาณถ่านหินที่เหมาะสมในกระบวนการทำความสะอาดด้วยการรวมกลุ่มถ่านหินกับน้ำมันปาล์มดิบ ผลการวิเคราะห์สมบัติผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันปาล์มดิบแบบประมาณแสดงดังตารางที่ 4.7 และทำการเปรียบเทียบเพื่อศึกษาแนวโน้มผลของการทดลองรวมกลุ่มถ่านหินกับน้ำมันเตา โดยแปรปริมาณถ่านหินที่ใช้ในของผสมให้มีปริมาณมากขึ้นตั้งแต่ร้อยละ 10 ถึงร้อยละ 25 ผลการวิเคราะห์สมบัติผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันเตาแบบประมาณแสดงดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.7 สมบัติของผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันเมื่อปริมาณถ่านหินในของผสมต่างกัน

ภาวะในการทดลอง :

ขนาดถ่านหิน	ต่ำกว่า 75 ไมโครเมตร	อุณหภูมิ	30 องศาเซลเซียส
ชนิดน้ำมันที่ใช้ในการรวมกลุ่ม	น้ำมันปาล์ม	ความเร็วรอบในการกวน	700 rpm
ปริมาณน้ำมันในการรวมกลุ่ม	ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักถ่านหิน	เวลาในการรวมกลุ่ม	15 นาที

สมบัติถ่านหิน	ถ่านหินเริ่มต้น	ร้อยละถ่านหินในของผสม (โดยน้ำหนัก)						
		10	15	20	25	30	40	50
การวิเคราะห์แบบประมาณ (ร้อยละ, ไม่คิดความชื้น)								
สารระเหย	43.00	46.52	46.20	49.00	49.92	51.29	54.67	54.90
เถ้า	36.06	20.73	14.59	14.92	14.92	15.17	15.46	15.92
คาร์บอนคงตัว	20.94	32.76	39.21	36.08	35.16	33.54	29.87	29.18
ปริมาณกำมะถันรวม	5.98	2.01	2.17	2.25	2.51	2.62	2.67	2.75
ร้อยละผลิตภัณฑ์		73.72	72.45	70.67	68.66	69.31	65.95	63.75
ร้อยละการได้กลับคืนของสารอินทรีย์		91.39	96.77	94.03	91.36	91.95	87.20	83.82
ร้อยละการขจัดเถ้า		57.62	70.68	70.76	71.59	70.84	71.73	71.85
ร้อยละการขจัดกำมะถัน		75.16	73.71	73.42	71.13	69.60	70.56	70.65

ตารางที่ 4.8 สมบัติของผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันเมื่อปริมาณถ่านหินในของผสมต่างกัน

ภาวะในการทดลอง :

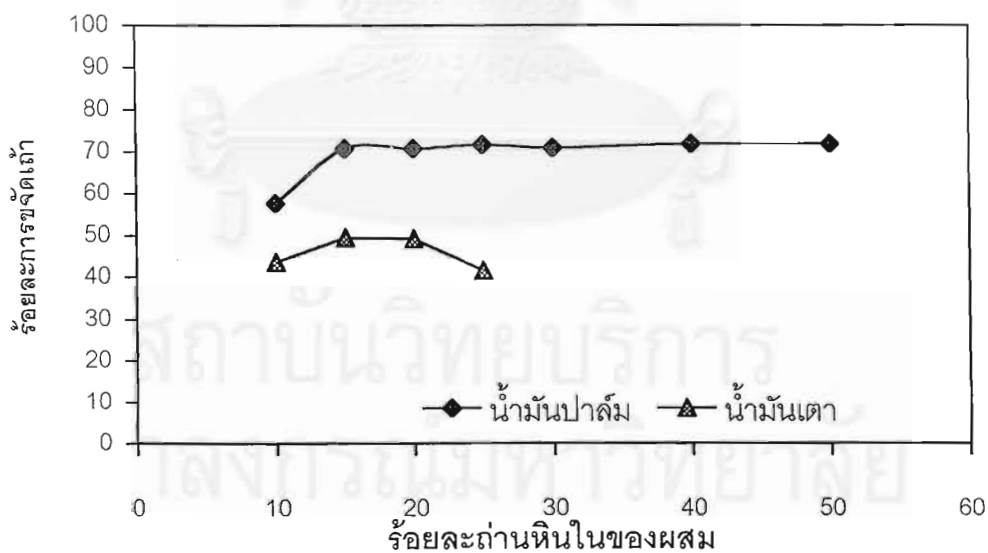
ขนาดถ่านหิน	ต่ำกว่า 75 ไมโครเมตร
น้ำมันที่ใช้ในการรวมกลุ่ม	น้ำมันเตา
ปริมาณน้ำมันที่ใช้ในการรวมกลุ่ม	ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักถ่านหิน
อุณหภูมิ	30 องศาเซลเซียส
ความเร็วรอบในการกวน	700 rpm
เวลาในการรวมกลุ่ม	15 นาที

สมบัติ	ถ่านหินเริ่มต้น	อัตราส่วนถ่านหินในของผสม (โดยน้ำหนัก)			
		10	15	20	25
การวิเคราะห์แบบประมาณ (ร้อยละ, ไม่คิดความชื้น)					
สารระเหย	43.00	41.65	41.31	45.41	44.97
เถ้า	36.06	27.96	25.81	26.89	27.63
คาร์บอนคงตัว	20.94	30.39	32.89	27.70	27.40
ปริมาณกำมะถันรวม	5.98	2.12	1.86	2.05	2.49
ร้อยละผลิตภัณฑ์		72.76	70.64	68.09	66.34
ร้อยละการได้กลับคืนของสารอินทรีย์		81.97	81.96	77.85	76.40
ร้อยละการขจัดเถ้า		43.58	46.44	49.22	41.50
ร้อยละการขจัดกำมะถันรวม		74.21	78.00	76.66	68.21

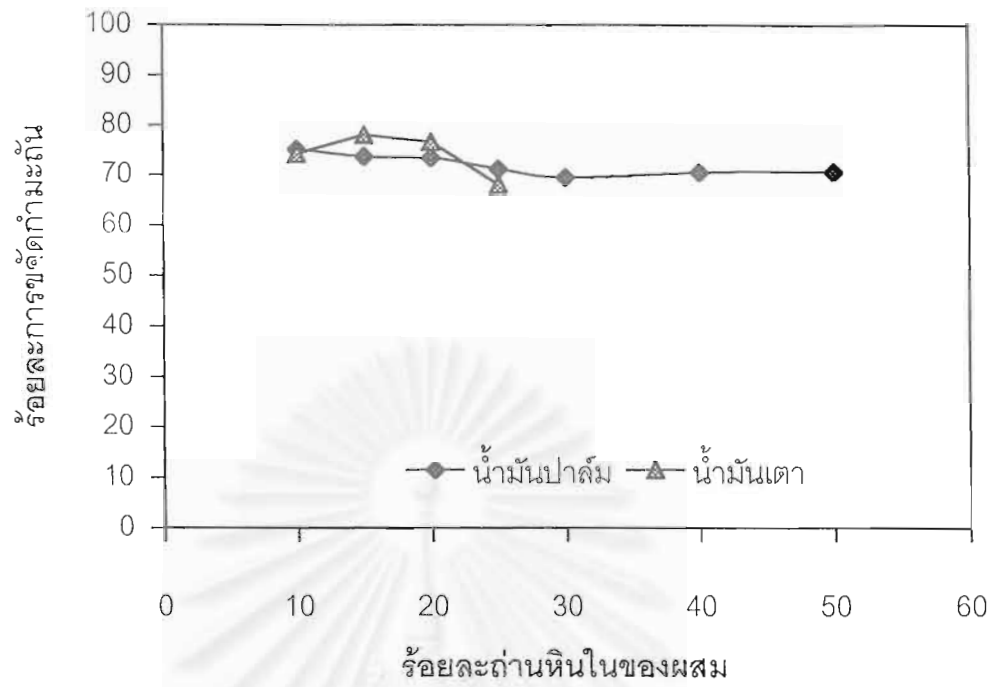
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการทดลองดังรูปที่ 4.9 และ 4.10 แสดงให้เห็นว่า ในช่วงแรกเมื่อเพิ่มปริมาณถ่านหินในของผสมมากขึ้น สามารถขจัดเถ้าและกำมะถันมากขึ้นจนกระทั่งร้อยละถ่านหินในของผสมมีค่าร้อยละ 15 ส่งผลให้ขจัดเถ้าและกำมะถันได้สูงสุด คือ สามารถขจัดเถ้าได้มากกว่าร้อยละ 70 และขจัดกำมะถันได้มากกว่าร้อยละ 60 แต่เมื่อร้อยละถ่านหินในของผสมเพิ่มมากขึ้น พบว่า ให้ผลในการขจัดเถ้าและกำมะถันเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก เมื่อพิจารณาร้อยละของผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันดังแสดงในรูปที่ 4.11 จะเห็นได้ว่าร้อยละของผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันเพิ่มขึ้นเมื่อร้อยละถ่านหินในของผสมเพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งร้อยละถ่านหินในของผสมเท่ากับ 20 หลังจากนั้นร้อยละของผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันจะลดลงเรื่อยๆ ผลการทดลองที่ได้พบว่าภาวะที่ดีที่สุดสำหรับการทดลอง คือ การรวมกลุ่มถ่านหินร้อยละ 15 ในของผสม ให้ผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันร้อยละ 72.45 สามารถขจัดเถ้าร้อยละ 70.68 และขจัดกำมะถันรวมร้อยละ 73.71

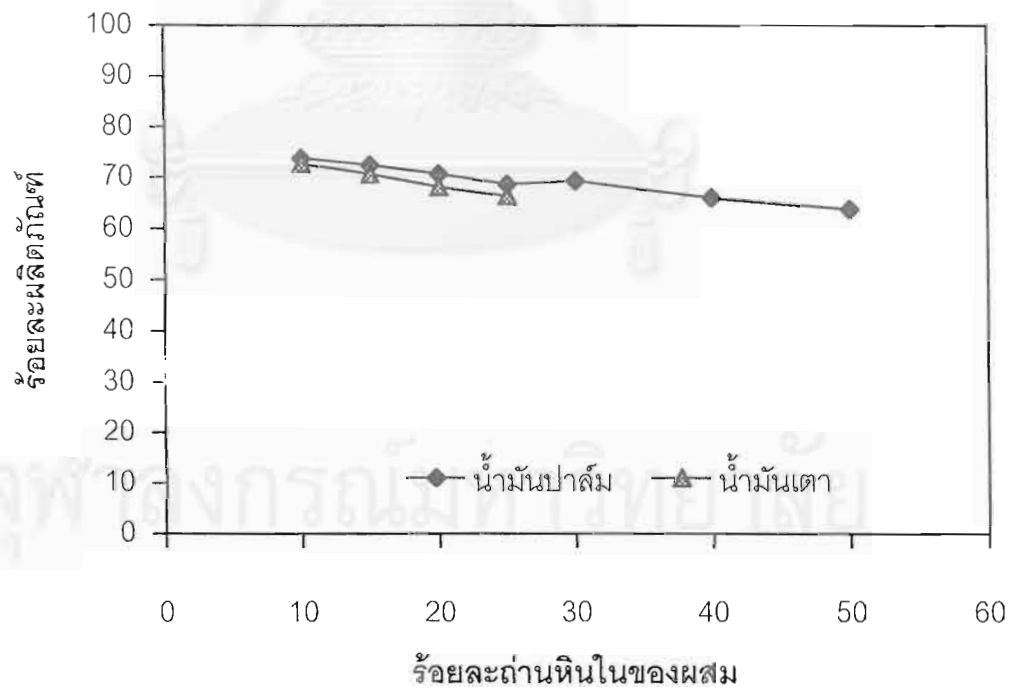
จากผลการทดลองสามารถอธิบายได้ว่า เมื่อร้อยละถ่านหินในของผสมมีค่าน้อย การกวนจะช่วยกระจายอนุภาคของถ่านหินในน้ำได้มาก การรวมกลุ่มถ่านหินกับน้ำมันจึงสามารถเกิดได้ง่ายขึ้น ในขณะที่ร้อยละถ่านหินในของผสมมีค่าสูงเกินไป การกวนไม่สามารถกระจาย อนุภาคถ่านหินได้ทั่วถึง การรวมกลุ่มของถ่านหินกับน้ำมันจึงเกิดขึ้นได้ไม่เต็มที่ ทำให้ร้อยละผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันที่ได้ลดต่ำลง



รูปที่ 4.9 ร้อยละการขจัดเถ้าในผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันเมื่อเมื่อรวมกลุ่มถ่านหินกับน้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันเตา โดยใช้ปริมาณถ่านหินในของผสมต่างกัน



รูปที่ 4.10 ร้อยละการขจัดกำมะถันในผลิตภัณฑ์กลุ่มกำมะถันผสมน้ำมันเมื่อรวมกลุ่มกำมะถันกับน้ำมันปาล์มและน้ำมันเตา โดยใช้ปริมาณกำมะถันในของผสมต่างกัน



รูปที่ 4.11 ร้อยละผลิตภัณฑ์กลุ่มกำมะถันผสมน้ำมันที่ได้จากการรวมกลุ่มกำมะถันกับน้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันเตาโดยใช้ปริมาณกำมะถันในของผสมต่างกัน

4.5 ผลของเวลาที่ใช้ในการรวมกลุ่มถ่านหิน

การทดลองส่วนนี้ศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการรวมกลุ่มถ่านหินกับน้ำมันปาล์มดิบ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันปริมาณมาก และมีค่าและกำมะถันในผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันปริมาณต่ำ แสดงดังตารางที่ 4.9

จากรูปที่ 4.12 พบว่า เวลาที่ใช้ในการรวมกลุ่มถ่านหินกับน้ำมันมีผลในการขจัดเถ้าและกำมะถันในถ่านหิน คือ สามารถขจัดเถ้าและกำมะถันในถ่านหินได้มากที่สุดเมื่อใช้เวลาในการรวมกลุ่มถ่านหินกับน้ำมันนาน 15 นาที หากใช้เวลาในการรวมกลุ่มถ่านหินกับน้ำมันมากกว่านี้จะทำให้ค่าการขจัดเถ้าและกำมะถันต่ำลงเล็กน้อย ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ในขณะที่ปริมาณผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันจะมีผลกระทบเนื่องมาจากเวลาอย่างเห็นได้ชัด ดังรูปที่ 4.13 คือ เมื่อใช้เวลาในการรวมกลุ่มถ่านหินไม่นานนัก (ไม่เกิน 15 นาที) ร้อยละผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันมีค่าสูง แต่เมื่อใช้เวลาในการรวมกลุ่มถ่านหินนานกว่า 15 นาที ทำให้ร้อยละผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันลดต่ำลง จากผลการทดลองพบว่าภาวะที่ดีที่สุดคือ การรวมกลุ่มถ่านหินนาน 15 นาที ได้ผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันร้อยละ 72.45 สามารถขจัดเถ้า ร้อยละ 70.68 และขจัดกำมะถันรวมร้อยละ 73.73

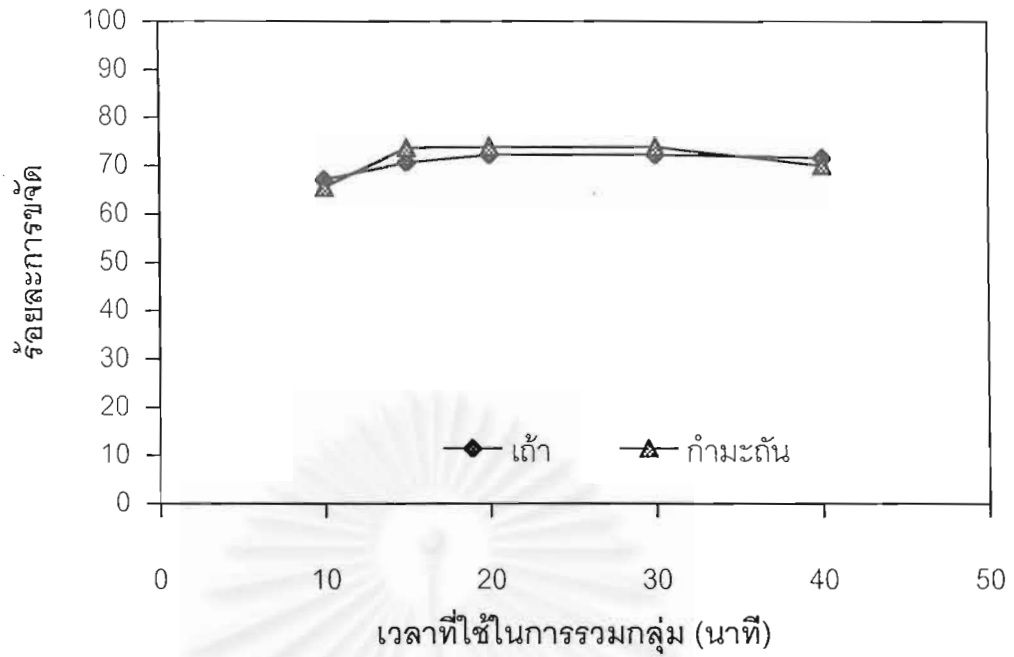
จากการทดลองของ Petela (1991) ศึกษาขนาดกลุ่มผลิตภัณฑ์ถ่านหินผสมน้ำมันภายหลังจากการรวมกลุ่มถ่านหินกับน้ำมัน สามารถอธิบายได้ว่า การใช้เวลาในการรวมกลุ่มถ่านหินนานเกินไป มีผลให้ร้อยละผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันมีค่าลดลง เนื่องจาก ในกระบวนการรวมกลุ่มถ่านหินกับน้ำมัน การกวนจะช่วยให้อนุภาคของถ่านหินที่ดูดซับน้ำมันไว้บริเวณผิวเคลื่อนที่เข้ามาใกล้กันและรวมตัวเป็นกลุ่มจนมีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ แต่เมื่อทำการกวนของผสมไปเรื่อยๆ แรงที่เกิดเนื่องจากการกวนจะไปรบกวนเสถียรภาพของผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันที่มีการเกาะกลุ่มกันอย่างหลวมๆ ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันเกิดการกระจายตัวออกเป็นอนุภาคเล็กๆ ในน้ำอีกครั้ง เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการและทำการแยกผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันออกจากของผสมโดยใช้ตะแกรงกรอง กลุ่มอนุภาคถ่านหินที่เกิดการกระจายตัวออกไปจะลอดผ่านรูตะแกรงลงสู่เบื้องล่าง ผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันถ่านหินที่ยังคงเป็นกลุ่มขนาดใหญ่ที่สามารถติดค้างอยู่บนตะแกรงได้จึงมีปริมาณน้อยลง

ตารางที่ 4.9 สมบัติของผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันเมื่อใช้เวลาในการรวมกลุ่ม
ถ่านหินกับน้ำมันต่างกัน

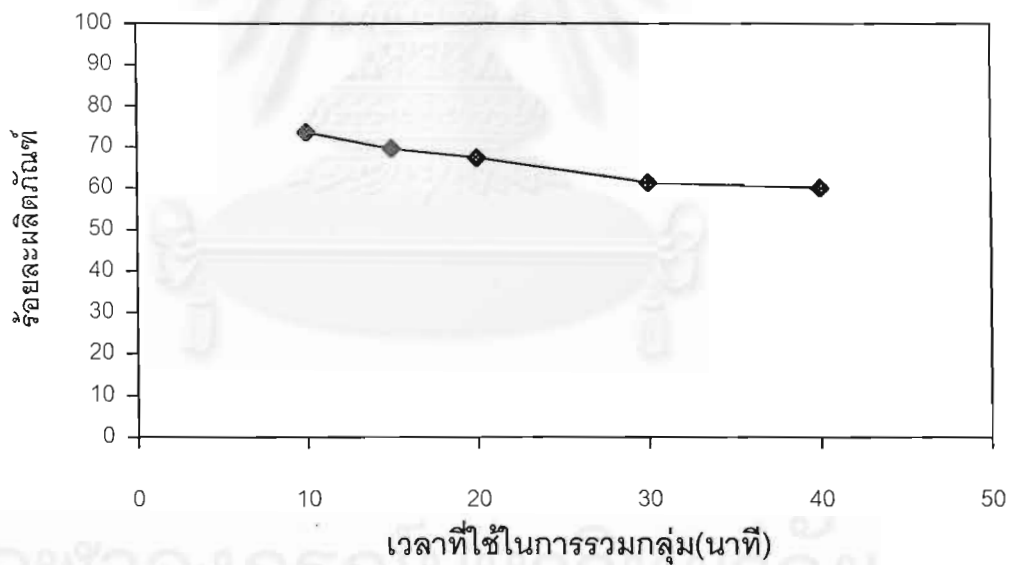
ภาวะในการทดลอง :

ขนาดถ่านหิน	ต่ำกว่า 75 ไมโครเมตร
ปริมาณถ่านหินในของผสม	ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก
น้ำมันที่ใช้ในการรวมกลุ่ม	น้ำมันปาล์มดิบ
ปริมาณน้ำมันที่ใช้ในการรวมกลุ่ม	ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักถ่านหิน
อุณหภูมิ	30 องศาเซลเซียส
ความเร็วรอบในการกวน	700 rpm
เวลาในการรวมกลุ่ม	15 นาที

สมบัติ	ถ่านหิน เริ่มต้น	เวลาที่ใช้ในการรวมกลุ่ม (นาที)				
		10	15	20	30	40
การวิเคราะห์แบบประมาณ (ร้อยละ, ไม่คิดความชื้น)						
สารระเหย	43.00	39.03	46.20	45.85	43.80	43.20
เถ้า	36.06	16.14	14.59	14.85	16.34	14.05
คาร์บอนคงตัว	20.94	44.83	39.21	39.30	39.86	39.75
ปริมาณกำมะถันรวม	5.98	2.81	2.17	2.31	2.56	2.99
ร้อยละผลิตภัณฑ์		73.63	72.45	67.29	61.24	60.05
ร้อยละการได้กลับคืนของสารอินทรีย์		96.56	96.77	89.61	80.12	77.90
ร้อยละการขจัดเถ้า		67.04	70.68	72.29	72.24	71.61
ร้อยละการขจัดกำมะถันรวม		65.45	73.73	73.97	73.81	69.96



รูปที่ 4.12 การขจัดเก็บและก้ามะถันในผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันเมื่อเวลาในการรวมกลุ่มถ่านหินกับน้ำมันต่างกัน



รูปที่ 4.13 ร้อยละของผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันเมื่อเวลาในการรวมกลุ่มถ่านหินกับน้ำมันต่างกัน

4.6 ผลของขนาดถ่านหินที่ใช้ในการรวมกลุ่ม

การทดลองในส่วนนี้ศึกษาผลของขนาดถ่านหินที่ให้ผลในการขจัดเถ้าและกำมะถันดีที่สุดใน การรวมกลุ่มถ่านหินกับน้ำมันปาล์มดิบ และ น้ำมันเตา โดยใช้ภาวะการทดลองที่เหมาะสม คือ ถ่านหินร้อยละ 15 ในของผสม น้ำมันร้อยละ 30 โดยน้ำหนักถ่านหิน เวลาที่ใช้ในการรวมกลุ่ม 15 นาที ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.10 และ 4.11

การศึกษาผลของขนาดถ่านหินที่ใช้ในการรวมกลุ่มกับน้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันเตา ดังรูปที่ 4.14 และ 4.15 พบว่าเมื่อรวมกลุ่มถ่านหินขนาดเล็ก (ต่ำกว่า 75 ไมโครเมตร) ให้ผลในการขจัดเถ้าและกำมะถันสูงกว่าการรวมกลุ่มถ่านหินขนาดกลาง (75 – 250 ไมโครเมตร) และขนาดใหญ่ (250 – 500 ไมโครเมตร) ตามลำดับ Garcia และคณะ (1995) ได้อธิบายว่า เนื่องจากถ่านหินที่มีอนุภาคขนาดเล็ก มีน้ำหนักเบา สามารถกระจายตัวในน้ำได้ดี เมื่อเติมน้ำมันลงในระบบหอยของน้ำมันที่กระจายปะปนอยู่ทั่วไปในของผสมจะมีโอกาสในการสัมผัสกับถ่านหินได้ง่าย ส่งผลให้เกิดการรวมกลุ่มถ่านหินกับน้ำมันได้ปริมาณมาก การขจัดส่วนประกอบแร่ธาตุจากถ่านหินจึงสูงด้วย เมื่อเปรียบเทียบการรวมกลุ่มถ่านหินขนาดกลางและถ่านหินขนาดใหญ่ พบว่า ถ่านหินขนาดใหญ่ให้การขจัดเถ้าและกำมะถันในปริมาณสูงกว่าถ่านหินขนาดกลาง ทั้งนี้เนื่องจากสมบัติของถ่านหินขนาดใหญ่ จะมีส่วนของเนื้อถ่านหิน ซึ่งเป็นส่วนที่ไม่ชอบน้ำอยู่ในปริมาณมาก เมื่อนำถ่านหินมารวมกลุ่มกับน้ำมันจึงเกิดการรวมกลุ่มได้ดี ส่งผลให้ส่วนของสารประกอบแร่ธาตุที่มีอยู่ถูกขจัดออกในปริมาณมากด้วย ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Guy และคณะ (1996) ที่ศึกษาพฤติกรรมการเปียกน้ำและสารละลายอินทรีย์บริเวณพื้นผิวของอนุภาคถ่านหิน อธิบายโดยการพิจารณาอัตราส่วนระหว่างปริมาณคาร์บอนและออกซิเจนในอนุภาคถ่านหิน พบว่า ส่วนของคาร์บอนในถ่านหินจะมีแสดงสมบัติทางพื้นผิวของถ่านหินเป็นแบบไม่ชอบน้ำจึงสามารถรวมกลุ่มกับสารละลายอินทรีย์ได้ดี ในขณะที่ส่วนของออกซิเจนในอนุภาคถ่านหินจะเป็นองค์ประกอบในหมู่ฟังก์ชันฟีนอล (phenolic group) และกลุ่มคาร์บอกซี (carboxylic group) ในส่วนของสารประกอบอินทรีย์ในถ่านหิน ซึ่งจะแสดงสมบัติทางพื้นผิวเป็นแบบชอบน้ำ จากผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของถ่านหินจะเห็นได้ว่า ถ่านหินขนาดใหญ่มีปริมาณออกซิเจนสูงกว่าถ่านหินขนาดกลาง ดังนั้นส่วนของถ่านหินที่มีสมบัติทางพื้นผิวเป็นแบบชอบน้ำจึงมีปริมาณมากกว่าถ่านหินขนาดกลาง เมื่อรวมกลุ่มถ่านหินขนาดใหญ่กับน้ำมันจึงสามารถขจัดส่วนของสารประกอบแร่ธาตุซึ่งสามารถละลายได้ในน้ำออกเป็นปริมาณมาก ส่งผลให้ปริมาณเถ้าและกำมะถันคงเหลือในผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการรวมกลุ่มถ่านหินขนาดกลางกับน้ำมัน

ตารางที่ 4.10 สมบัติของผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันเมื่อขนาดถ่านหินที่ใช้ในการรวมกลุ่มต่างกัน

ภาวะในการทดลอง :

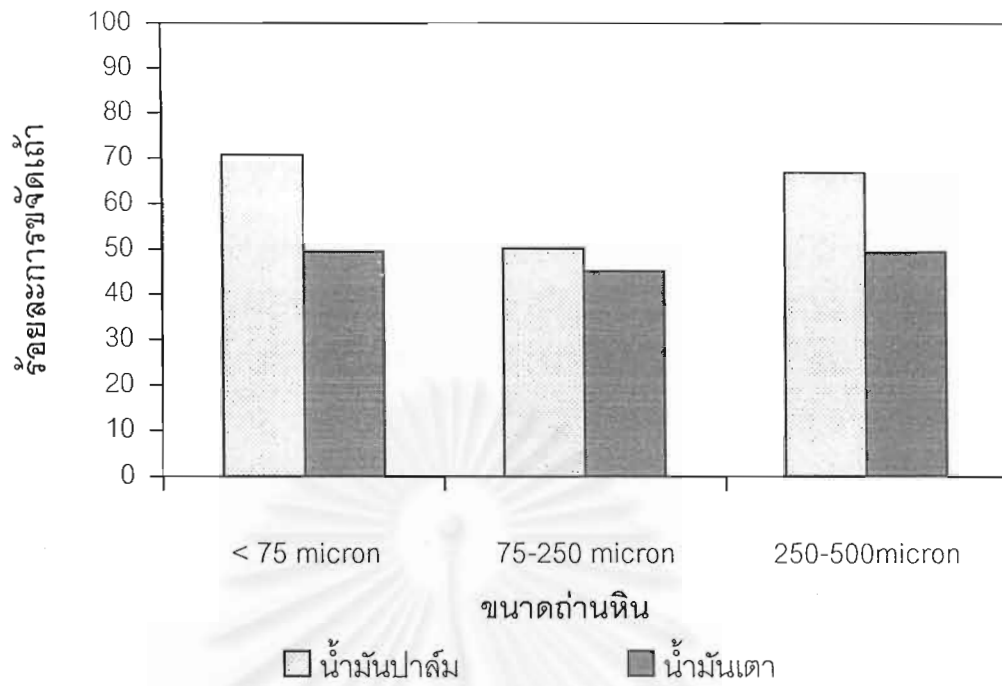
ปริมาณถ่านหินในของผสม	ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก	อุณหภูมิ	30 องศาเซลเซียส
ชนิดน้ำมัน	น้ำมันปาล์ม และ น้ำมันเตา	ความเร็วรอบในการกวน	700 rpm
ปริมาณน้ำมันที่ใช้ในการรวมกลุ่ม	ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักถ่านหิน	เวลาในการรวมกลุ่ม	15 นาที

สมบัติ	ขนาดถ่านหิน (ไมโครเมตร)					
	รวมกลุ่มกับน้ำมันปาล์ม			รวมกลุ่มกับน้ำมันเตา		
	< 75	75 - 250	250 - 500	< 75	75 - 250	250 - 500
การวิเคราะห์แบบประมาณ (ร้อยละ, ไม่คิดความชื้น)						
สารระเหย	46.20	51.67	52.12	41.31	47.70	50.27
เถ้า	14.59	16.29	9.76	25.81	19.47	15.16
คาร์บอนคงตัว	39.21	32.05	38.12	32.89	32.83	34.57
ร้อยละผลิตภัณฑ์	72.45	68.13	70.22	70.64	66.94	69.24
ร้อยละการได้กลับคืนของสารอินทรีย์	96.77	81.84	79.92	81.96	77.35	74.09
ร้อยละการขจัดเถ้า	70.68	50.15	66.91	49.44	45.09	49.33

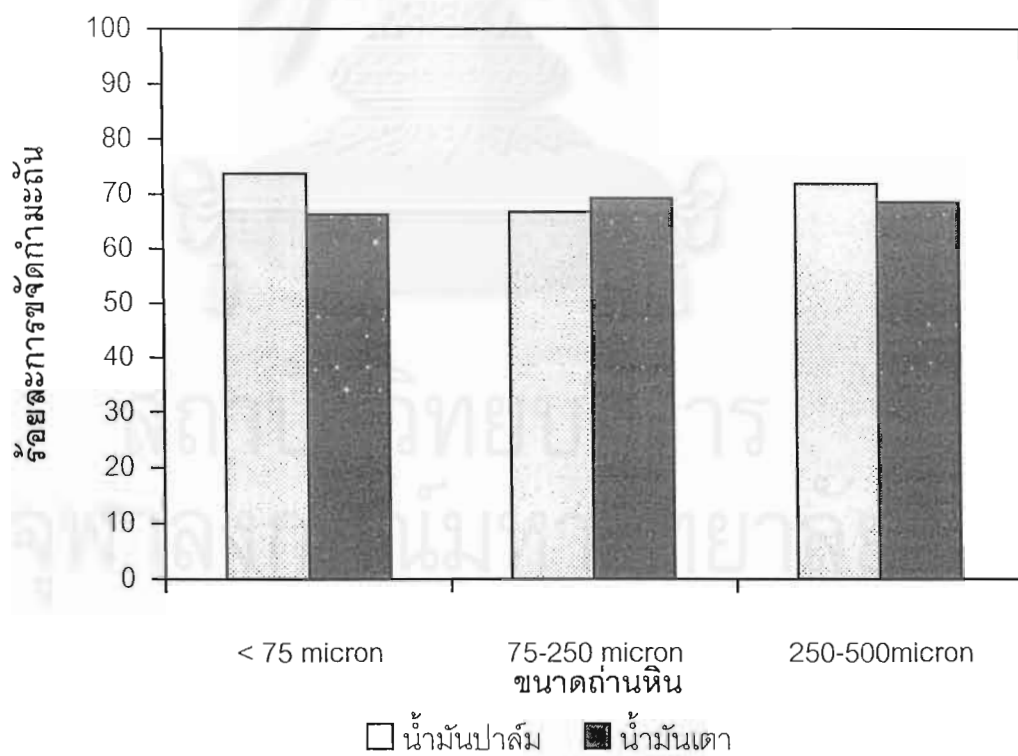
ตารางที่ 4.10 ร้อยละกำมะถันและการขจัดกำมะถันในผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันเมื่อขนาดถ่านหินที่ใช้ในการรวมกลุ่มต่างกัน
ภาวะในการทดลอง :

ปริมาณถ่านหินในของผสม	ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก	อุณหภูมิ	30 องศาเซลเซียส
ชนิดน้ำมัน	น้ำมันปาล์ม และ น้ำมันเตา	ความเร็วรอบในการหมุน	700 rpm
ปริมาณน้ำมันที่ใช้ในการรวมกลุ่ม	ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักถ่านหิน	เวลาในการรวมกลุ่ม	15 นาที

สมบัติ	ขนาดถ่านหิน (ไมโครเมตร)					
	รวมกลุ่มกับน้ำมันปาล์ม			รวมกลุ่มกับน้ำมันเตา		
	< 75	75 - 250	250 - 500	< 75	75 - 250	250 - 500
ปริมาณกำมะถันรวม	2.17	2.84	1.94	2.86	2.68	2.20
กำมะถันไพไรต์	0.03	0.13	0.06	0.28	0.28	0.14
กำมะถันซัลเฟต	0.22	0.49	0.37	0.71	0.85	0.64
กำมะถันอินทรีย์	1.92	2.22	1.51	1.87	1.55	1.42
ร้อยละการขจัดกำมะถันรวม	73.71	66.70	71.78	66.19	69.18	68.42
ร้อยละการขจัดกำมะถันไพไรต์	96.76	82.29	86.41	69.72	62.12	68.29
ร้อยละการขจัดกำมะถันซัลเฟต	93.10	83.47	86.18	77.73	71.50	76.13
ร้อยละการขจัดกำมะถันอินทรีย์	53.68	54.01	59.84	54.84	67.84	62.15



รูปที่ 4.14 ร้อยละการขจัดเง้าในผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันเมื่อรวมกลุ่มถ่านหินขนาดต่างๆกับน้ำมันต่างชนิด

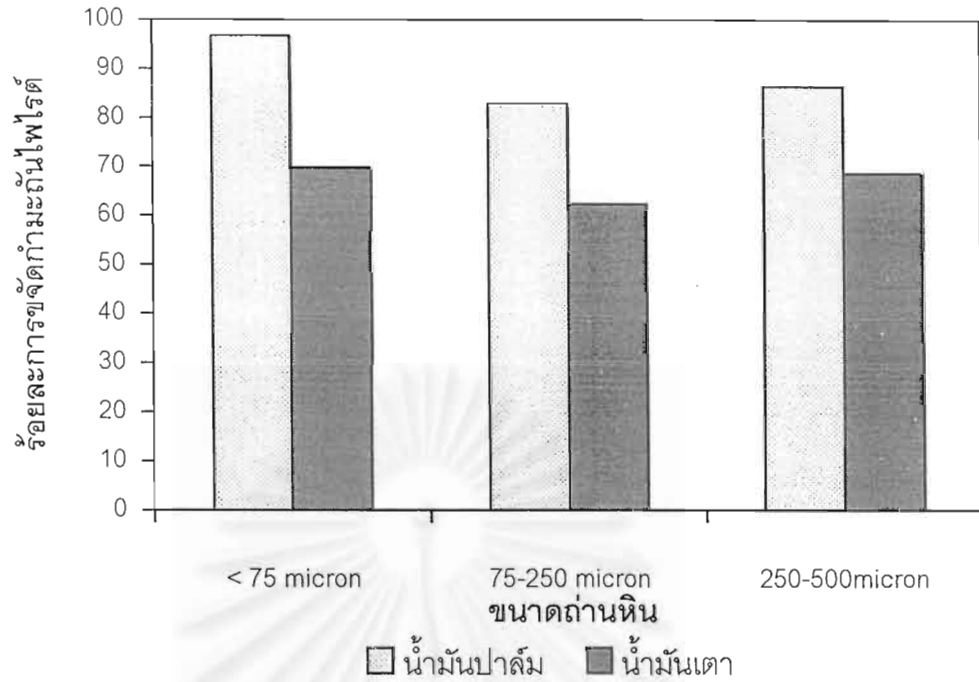


รูปที่ 4.15 ร้อยละการขจัดกำมะถันรวมในผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันเมื่อรวมกลุ่มถ่านหินขนาดต่างๆกับน้ำมันต่างชนิด

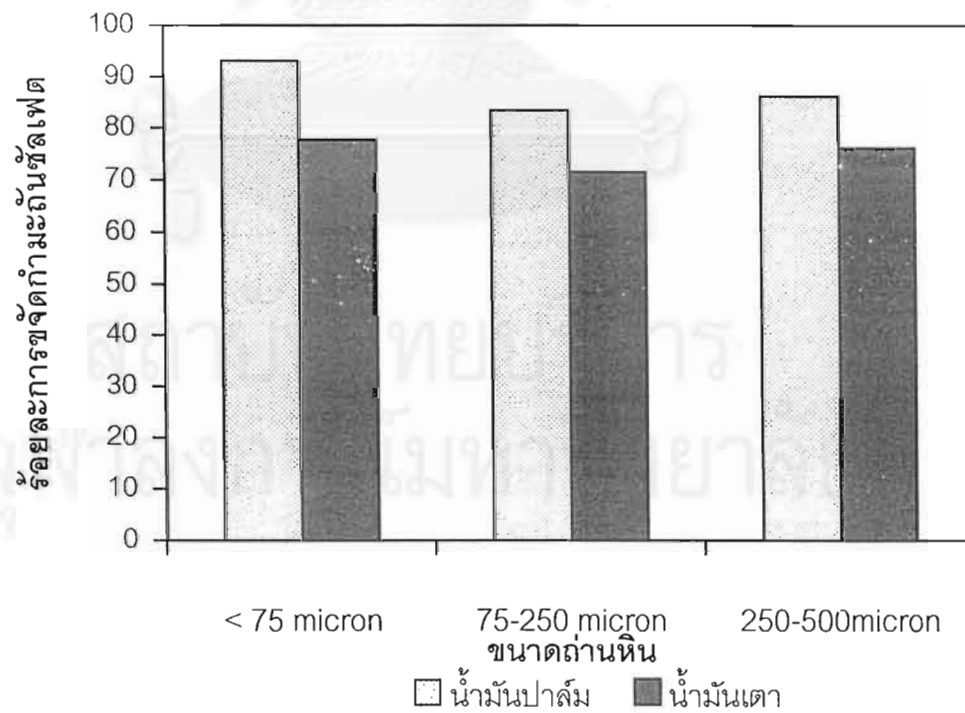
เมื่อพิจารณาร้อยละร้อยละการขจัดกำมะถันไฟโรตีในผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันเมื่อขนาดถ่านหินที่ใช้ในการรวมกลุ่มขนาดต่างกัน แสดงดังรูปที่ 4.16 พบว่า การรวมกลุ่มถ่านหินขนาดเล็กสามารถขจัดกำมะถันไฟโรตีได้ในปริมาณสูงกว่าถ่านหินขนาดใหญ่และถ่านหินขนาดกลาง ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบผลของน้ำมันที่มีต่อการขจัดกำมะถันไฟโรตี พบว่าการรวมกลุ่มถ่านหินด้วยน้ำมันปาล์มจะให้ผลในการขจัดกำมะถันไฟโรตีสูงกว่าน้ำมันเตา สำหรับการขจัดกำมะถันซัลเฟตในผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมัน แสดงดังรูปที่ 4.17 พบว่ามีแนวโน้มในการขจัดกำมะถันซัลเฟตเช่นเดียวกับการขจัดกำมะถันไฟโรตี ในขณะที่การขจัดกำมะถันอินทรีย์ในกลุ่มผลิตภัณฑ์ถ่านหิน ดังรูปที่ 4.18 จะเห็นได้ว่า สามารถขจัดกำมะถันอินทรีย์ได้ในปริมาณใกล้เคียงกัน สามารถอธิบายได้ด้วยงานวิจัยของ Garcia และคณะ (1996) ซึ่งเสนอว่า กำมะถันไฟโรตีเป็นองค์ประกอบส่วนหนึ่งแทรกอยู่ในส่วนแร่ธาตุของถ่านหิน เมื่อทำการรวมกลุ่มถ่านหินกับน้ำมัน ส่วนของกำมะถันไฟโรตีที่แทรกอยู่ในถ่านหินอย่างไม่เสถียรจึงถูกขจัดออกโดยการละลายน้ำ รวมทั้งส่วนของกำมะถันซัลเฟตบางส่วนที่สามารถละลายน้ำได้จึงทำให้ปริมาณกำมะถันซัลเฟตในผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันลดต่ำลง ในขณะที่กำมะถันอินทรีย์ซึ่งมีโครงสร้างพันธะเคมีหลายรูปแบบที่ซับซ้อนถูกขจัดด้วยกระบวนการรวมกลุ่มกับน้ำมันได้น้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกำมะถันไฟโรตีและกำมะถันซัลเฟต

ในขณะที่ร้อยละผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันที่ได้จากการรวมกลุ่มถ่านหินขนาดต่างกัน ดังรูปที่ 4.19 พบว่า ผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันในการรวมกลุ่มถ่านหินขนาดต่างๆ ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ด้วยงานวิจัยของ Guy และคณะ (1996) ซึ่งศึกษาพฤติกรรมการเปียกน้ำและสารละลายอินทรีย์บริเวณพื้นผิวของอนุภาคถ่านหิน โดยพิจารณาปริมาณคาร์บอนในอนุภาคถ่านหิน พบว่า ส่วนของคาร์บอนในถ่านหินจะมีแสดงสมบัติทางพื้นผิวของถ่านหินเป็นแบบไม่ชอบน้ำจึงสามารถรวมกลุ่มกับสารละลายอินทรีย์ได้ดี จากผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของถ่านหินแม่เกาะที่ใช้ในงานวิจัย พบว่า ปริมาณธาตุคาร์บอนที่มีอยู่ในถ่านหินทั้งสามขนาดมีปริมาณใกล้เคียงกัน ดังนั้นโอกาสของถ่านหินที่จะรวมกลุ่มกับน้ำมันจึงมีค่าใกล้เคียงกัน ส่งผลให้ ปริมาณผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันที่ได้มีปริมาณใกล้เคียงกัน

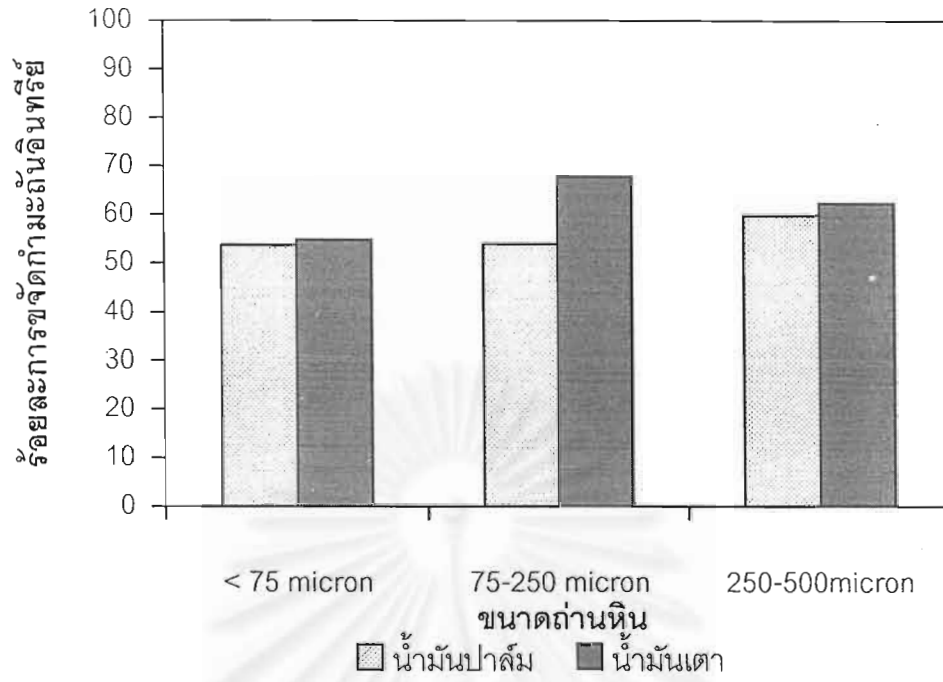
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



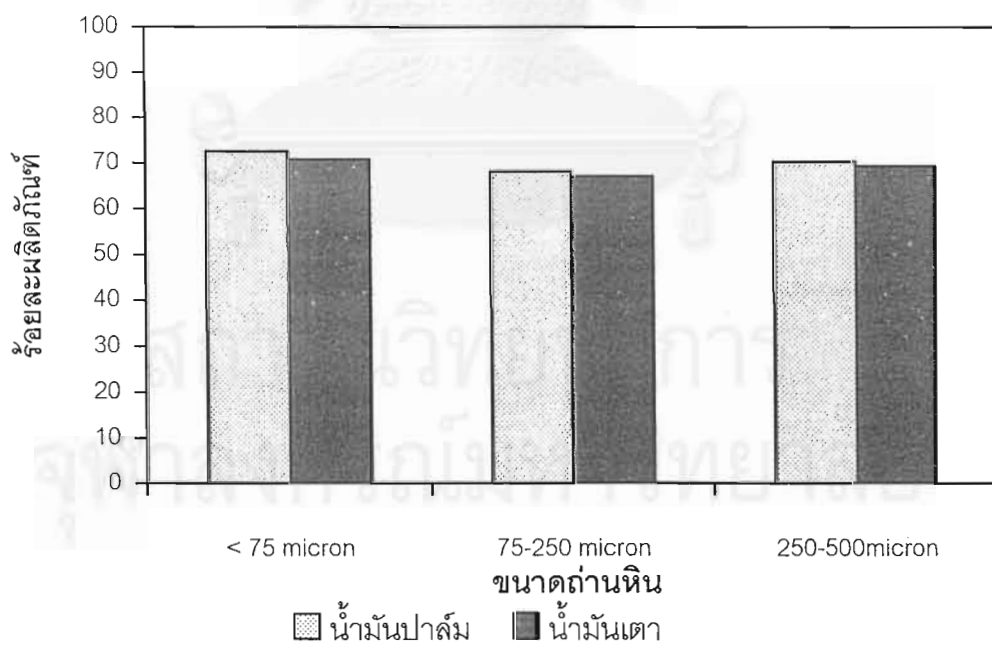
รูปที่ 4.16 ร้อยละการขจัดกัมมะถันไฟโรว์ในผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมัน เมื่อรวมกลุ่มถ่านหินขนาดต่างๆ กับน้ำมันต่างชนิด



รูปที่ 4.17 ร้อยละการขจัดกัมมะถันซัลเฟตในผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมัน เมื่อรวมกลุ่มถ่านหินขนาดต่างๆ กับน้ำมันต่างชนิด



รูปที่ 4.18 ร้อยละการขจัดกัมมะถันอินทรีย์ในผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันเมื่อรวมกลุ่มถ่านหินขนาดต่างๆกับน้ำมันต่างชนิด



รูปที่ 4.19 ร้อยละผลิตกัมมะถันกลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันที่ได้จากการรวมกลุ่มถ่านหินขนาดต่างๆกับน้ำมันต่างชนิด

4.7 การวิเคราะห์องค์ประกอบเก้าถ่านหิน

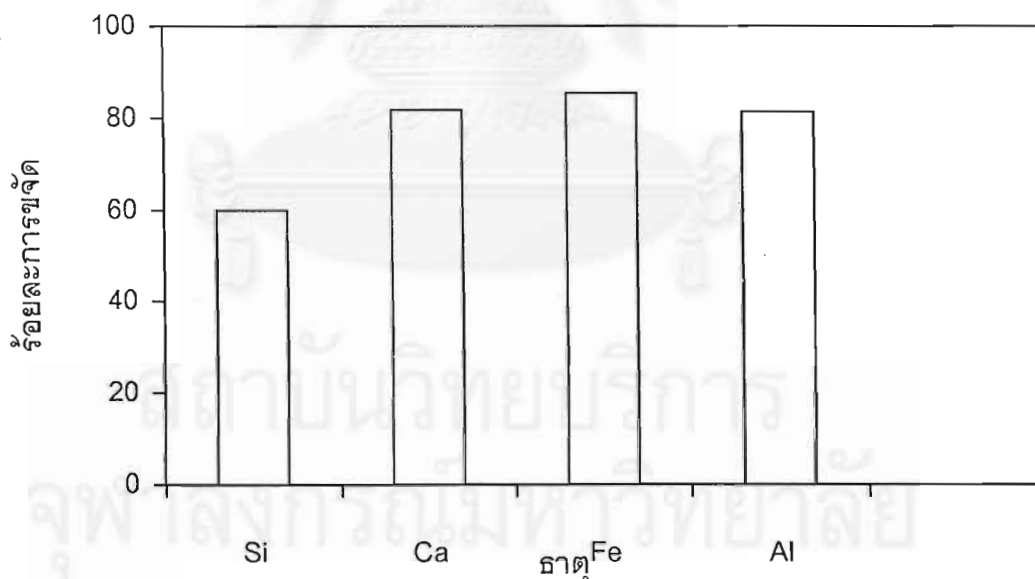
จากผลการทดลองในงานวิจัยรวมกลุ่มถ่านหินกับน้ำมันพบว่าสามารถขจัดเก้าในถ่านหินสูงกว่าร้อยละ 60 จึงทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุในเก้าถ่านหินและผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันถ่านหินด้วยเครื่องมือ Wavelength Dispersive x-ray fluorescence spectrometer โดยเลือกตัวอย่างผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันที่ได้จากการทดลองภาวะเหมาะสม คือ การรวมกลุ่มถ่านหินขนาดต่ำกว่า 75 ไมโครเมตรกับน้ำมันปาล์มดิบ ปริมาณถ่านหินในของผสมร้อยละ 15 น้ำมันร้อยละ 30 โดยน้ำหนักถ่านหิน เวลาในการรวมกลุ่ม 15 นาที ซึ่งให้ปริมาณผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันร้อยละ 72.45 ปริมาณเก้าในผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันร้อยละ 14.92 และสามารถขจัดเก้าได้ร้อยละ 70.68

ผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบหลักในเก้าถ่านหินและเก้าผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันด้วยเครื่องมือ x-ray fluorescence spectrometer แสดงดังตารางที่ 4.12 และสามารถคำนวณร้อยละการขจัดธาตุองค์ประกอบหลักในเก้าผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมัน แสดงในภาคผนวก ข เมื่อพิจารณาการขจัดธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักในเก้าถ่านหินและเก้าผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมัน ดังรูปที่ 4.20 จะเห็นได้ว่า การทำความสะอาดถ่านหินโดยการรวมกลุ่มกับน้ำมัน สามารถขจัดธาตุแคลเซียมได้มากที่สุดร้อยละ 85.38 ธาตุเหล็กร้อยละ 81.74 ธาตุอะลูมิเนียมร้อยละ 81.35 ในขณะที่สามารถขจัดธาตุซิลิกอนได้ในปริมาณต่ำกว่า Garcia และคณะ (1994) ศึกษาการขจัดธาตุองค์ประกอบในถ่านหินสเปนได้เสนอเหตุผลว่า ธาตุแคลเซียมและอะลูมิเนียมอยู่รวมกันเป็นส่วนหนึ่งในส่วนของดินขาวและดินเหนียวในเก้าถ่านหิน ซึ่งเกิดจากสารอนินทรีย์ที่น้ำพัดมาขณะเกิดการสะสมของถ่านหิน จึงสามารถขจัดเก้าส่วนนี้โดยการทำความสะอาดได้ จากผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ทางความร้อน (differential thermal analysis, DTA) เพื่อดูสารประกอบแร่ธาตุในเก้าถ่านหินของ Gorman (1973) พบว่ากลุ่มของ shale ในเก้าถ่านหินประกอบด้วยสารประกอบแร่ธาตุ montmorillonite $((Mg,Ca)O \cdot Al_2O_3 \cdot 5SiO_2 \cdot 2H_2O)$ และสารประกอบแร่ธาตุ kanolinite $(Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O)$ ในกลุ่มดินขาว (kaolin) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของดินเหนียว (clay) และสามารถละลายน้ำได้ ส่งผลให้ปริมาณธาตุแคลเซียมและอะลูมิเนียมในองค์ประกอบเก้าถ่านหินลดลงได้มาก ในขณะที่สามารถขจัดธาตุซิลิกอนได้ในปริมาณน้อย เนื่องจากซิลิกอนเป็นส่วนหนึ่งของสารประกอบแร่ธาตุต่างๆ หลายกลุ่มในเก้าถ่านหิน เช่น quartz ซึ่งเกิดจากสารอนินทรีย์ในถ่านหิน และขจัดออกได้ด้วยการทำความสะอาดได้น้อย

ตารางที่ 4.12 ร้อยละธาตุองค์ประกอบหลักในเถ้าถ่านหินและผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมัน
วิเคราะห์โดยเครื่องมือ x-ray fluorescence spectrometer และร้อยละการขจัด
ธาตุองค์ประกอบหลักในเถ้าผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมัน

ธาตุ	ร้อยละ		ร้อยละ การขจัด
	เถ้าถ่านหินเริ่มต้น	เถ้าผลิตภัณฑ์กลุ่ม ถ่านหินผสมน้ำมัน	
Si	11.35	15.50	59.96
Fe	7.16	8.54	81.74
Ca	9.77	4.87	85.38
Al	4.48	2.85	81.35

* หมายเหตุ : ผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันที่ใช้ในการวิเคราะห์ได้จากการทดลองรวมกลุ่มถ่านหิน
ขนาดต่ำกว่า 75 ไมโครเมตรกับน้ำมันปาล์มดิบ ปริมาณถ่านหินในของผสมร้อยละ 15 น้ำมันร้อยละ 30 โดย
น้ำหนักถ่านหิน ใช้เวลาในการรวมกลุ่ม 15 นาที



รูปที่ 4.20 ร้อยละการขจัดธาตุองค์ประกอบหลักในเถ้าผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมัน*

* หมายเหตุ : ผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันได้จากการทดลองรวมกลุ่มถ่านหินขนาดต่ำกว่า 75
ไมโครเมตรกับน้ำมันปาล์มดิบ ปริมาณถ่านหินในของผสมร้อยละ 15 น้ำมันร้อยละ 30 โดยน้ำหนักถ่านหิน ใช้
เวลาในการรวมกลุ่ม 15 นาที

4.8 การจำลองภาวะการณ์การทำความสะอาดถ่านหินโดยการรวมกลุ่มกับน้ำมัน

งานวิจัยในส่วนนี้เป็นการศึกษาการจำลองภาวะการณ์การทำความสะอาดถ่านหินโดยการรวมกลุ่มกับน้ำมันโดยเลือกภาวะที่ดีที่สุดในการทดลองในห้องปฏิบัติการ คือ ปริมาณถ่านหินร้อยละ 15 ในของผสมรวมกลุ่มกับน้ำมันปาล์มดิบร้อยละ 30 โดยน้ำหนักถ่านหิน จำลองภาวะการณ์ด้วยโปรแกรม SuperPro Designer รุ่น 2.7 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมโดยคำนึงทางด้านเศรษฐศาสตร์

การจำลองภาวะการณ์การทำความสะอาดถ่านหินโดยการรวมกลุ่มกับน้ำมัน กำหนดให้กระบวนการนี้เป็นหน่วยปฏิบัติการหนึ่งในโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งต้องการใช้ถ่านหินวันละ 5 ตัน ในการจำลองภาวะการณ์เพื่อพิจารณาราคาของอุปกรณ์ที่ใช้ในหน่วยปฏิบัติการ (ไม่รวมขั้นตอนการบดและแยกขนาดถ่านหิน) ออกแบบโดยกำหนดให้กระบวนการทำความสะอาดถ่านหินเป็นกระบวนการแบบกะ เวลาที่ใช้ในกระบวนการทั้งสิ้น 2.83 ชั่วโมง ทำการเปรียบเทียบราคาของอุปกรณ์ที่ใช้ในหน่วยปฏิบัติการ โดยถ่านหินที่ป้อนเข้าสู่กระบวนการปริมาณต่างกัน คือ 1 ตันต่อกะ และ 2.5 ตันต่อกะ หน่วยปฏิบัติการเริ่มต้นจากการป้อนถ่านหินที่ผ่านกระบวนการบดและแยกขนาดให้ถ่านหินมีขนาดต่ำกว่า 75 ไมโครเมตร และน้ำสะอาดลงในถังกวนที่ 1 (blending tank, V-101) เพื่อกวนของผสมถ่านหินและน้ำเป็นเวลา 5 นาที ก่อนส่งของผสมระหว่างถ่านหิน-น้ำต่อไปยังถังกวนที่ 2 (blending tank, V-102) ในขั้นตอนนี้มีมีการป้อนน้ำมันปาล์มดิบเข้าสู่ถังกวนเพื่อให้เกิดการรวมกลุ่มกับของผสมถ่านหิน-น้ำ ขั้นตอนนี้ใช้เวลา 15 นาที ผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันที่ได้จะถูกส่งต่อเพื่อแยกน้ำออกจากของผสมถ่านหิน-น้ำ-น้ำมัน ด้วยอุปกรณ์กรอง (belt filter, BFP-101) เป็นเวลา 30 นาที และอบแห้งใน sludge dryer (SLD-101) นาน 2 ชั่วโมง ส่วนของน้ำที่ออกจากกระบวนการกรองส่งไปหน่วย clarifier เพื่อแยกส่วนอนุภาคถ่านหินที่ปนอยู่ออก น้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วสามารถนำกลับไปใช้ในกระแส wash in ในขั้นตอนการกรองของผสมด้วยอุปกรณ์กรองได้อีก แสดงดังรูปที่ 4.21

จากการออกแบบหน่วยปฏิบัติการ พบว่า ราคาของอุปกรณ์สำหรับหน่วยปฏิบัติการสำหรับการรวมกลุ่มถ่านหินปริมาณ 1 ตันต่อกะ มีราคาต่ำกว่าหน่วยปฏิบัติการสำหรับการรวมกลุ่มถ่านหินปริมาณ 2.5 ตันต่อกะเพียงเล็กน้อย แสดงดังตารางที่ 4.13 อาจจะกล่าวได้ว่า การเลือกระบบปฏิบัติการโดยใช้ปริมาณถ่านหิน 2.5 ตันต่อกะ น่าจะมีความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้มากกว่าการเลือกระบบปฏิบัติการโดยใช้ปริมาณถ่านหิน 1 ตันต่อกะ

ตารางที่ 4.12 ราคาอุปกรณ์ที่ใช้ในหน่วยปฏิบัติการ

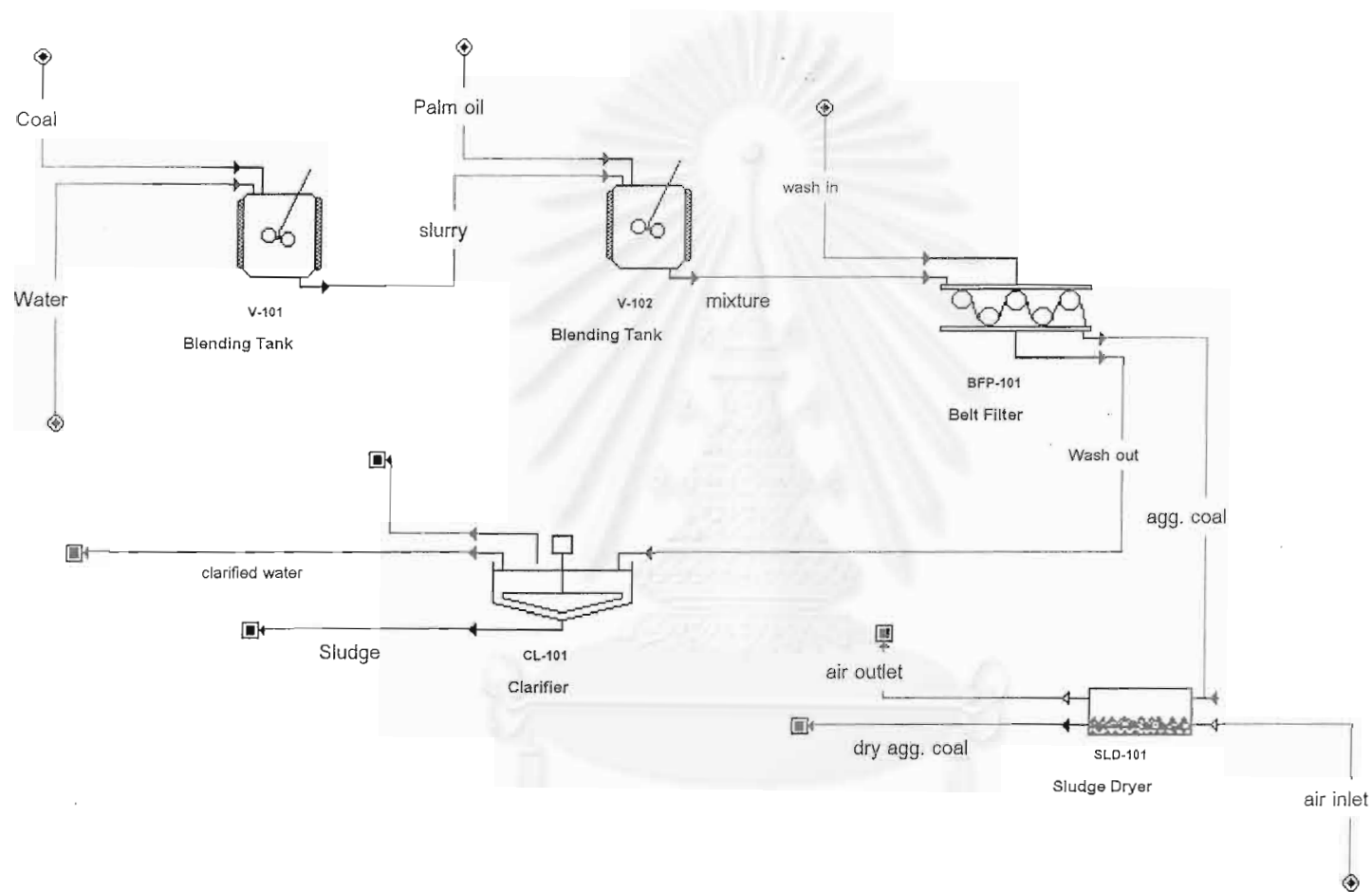
ถ่านหิน (ตัน/กะ)	จำนวนครั้งการปฏิบัติงานใน 1 วัน	ราคาอุปกรณ์ (ล้านบาท/ปี)
1.0	5	26.44
2.5	2	27.56

ตารางที่ 4.13 ราคาสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการ

สาร	ปริมาณที่ใช้ในกระบวนการ (ตัน/ปี)	ราคา (ล้านบาท/ปี)
ถ่านหิน	15,834	63.36
น้ำมันปาล์ม	2,376	23.76
น้ำ	105,589	5.28
รวม		92.40

จากตารางที่ 4.13 แสดงราคาของสารที่ใช้ในกระบวนการ พบว่า การใช้ถ่านหินในกระบวนการเพียงอย่างเดียวมีต้นทุนเพียง 63.36 ล้านบาทต่อปี แต่เมื่อนำถ่านหินผ่านการทำความสะอาดด้วยหน่วยปฏิบัติการรวมกลุ่มกับน้ำมันต้องใช้ทุนในการผลิตเพิ่มขึ้นเป็น 92.40 ล้านบาท แต่เมื่อเปรียบเทียบค่าความร้อนที่ได้จากถ่านหินและผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันต่อราคาพบว่า สำหรับถ่านหินที่ยังไม่ผ่านกระบวนการให้ค่าความร้อน 3800.86 kJ/บาท ในขณะที่ผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันจะให้ค่าความร้อน 4061.80 kJ/บาท

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.21 กระบวนการทำความสะอาดถ่านหินโดยการรวมกลุ่มกับน้ำมัน

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

การทำความสะอาดถ่านหินลิกไนต์ จากเหมืองแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยการรวมกลุ่มกับน้ำมันต่างชนิด ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบไม่ต่อเนื่องขนาด 1 ลิตร ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการทำความสะอาดถ่านหิน ได้แก่ ชนิดน้ำมัน (น้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันเตา) ปริมาณน้ำมัน(ร้อยละ 10 – 50 โดยน้ำหนักถ่านหิน) ขนาดถ่านหิน (ต่ำกว่า 75 ไมโครเมตร 75-250 ไมโครเมตร และ 250-500ไมโครเมตร) ปริมาณถ่านหินในของผสม (ร้อยละ 10 – 50) และ เวลาที่ใช้ในการรวมกลุ่มถ่านหิน (5 – 40 นาที) โดยวิเคราะห์ปริมาณเก่า สารอินทรีย์ ปริมาณกำมะถันรวม ที่คงเหลือภายหลังการรวมกลุ่ม

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการทำความสะอาดถ่านหิน พบว่า

1. ชนิดของน้ำมัน

เมื่อทำการรวมกลุ่มถ่านหินกับน้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันเตาแสดงให้เห็นว่า เมื่อรวมกลุ่มถ่านหินกับน้ำมันปาล์มดิบ ปริมาณเก่าและกำมะถันคงเหลือในผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันมีปริมาณต่ำกว่าการทำความสะอาดถ่านหินโดยการรวมกลุ่มกับน้ำมันเตา จากผลการทดลองพบว่า การรวมกลุ่มด้วยน้ำมันปาล์มดิบในภาวะที่เหมาะสม สามารถขจัดเก่าได้สูงสุด ร้อยละ 70.68 ขจัดกำมะถันรวมสูงสุดร้อยละ 73.73 ในขณะที่การรวมกลุ่มถ่านหินด้วยน้ำมันเตาสามารถขจัดเก่าได้เพียงร้อยละ 46.66 และ ขจัดกำมะถันรวม ร้อยละ 62.22

2. ปริมาณน้ำมัน

เมื่อทำการรวมกลุ่มถ่านหินกับน้ำมันในปริมาณต่างๆกัน พบว่า ปริมาณน้ำมันที่เติมลงในของผสมถ่านหินและน้ำ มีผลกระทบต่อการขจัดเก่าและกำมะถันโดยการเติมน้ำมันลงในของผสมปริมาณน้อยเกินไป ทำให้เกิดการรวมกลุ่มถ่านหินไม่สมบูรณ์ ร้อยละของผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันที่ได้มีค่าต่ำ สามารถขจัดเก่าและกำมะถันได้ไม่มาก เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมันในของผสมมากขึ้นเรื่อยๆ ส่งผลให้ ร้อยละของผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันที่ได้มีค่าสูงขึ้น ร้อยละของการขจัดเก่าและกำมะถันเพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งปริมาณน้ำมันที่เติมลงในของผสมมากจนเกินไป ส่งผลให้ร้อยละของผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันลดต่ำลงอีกครั้งเนื่องจากภาวะไม่

เหมาะสมให้ถ่านหินเกิดการรวมกลุ่ม ในขณะที่ร้อยละการขจัดเถ้าและกัมมะถันไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก

จากผลการทดลองพบว่าปริมาณน้ำมันที่เหมาะสมกับการรวมกลุ่มคือ ใช้ปริมาณน้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันเตาร้อยละ 30 โดยน้ำหนักถ่านหิน

3. ปริมาณถ่านหินในของผสม

เมื่อปริมาณถ่านหินที่ใช้ในการรวมกลุ่มเพิ่มมากขึ้น พบว่าส่งผลกระทบต่อร้อยละการขจัดของเถ้าไม่มากนัก เพราะเมื่อเพิ่มปริมาณถ่านหินในของผสมมากขึ้น ร้อยละการขจัดของเถ้าจะเพิ่มขึ้น เมื่อใช้ปริมาณถ่านหินในของผสมร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก สามารถขจัดเถ้าได้ร้อยละ 70.68 แต่เมื่อเพิ่มปริมาณถ่านหินในของผสมให้มากขึ้นการขจัดเถ้าไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก

พิจารณาผลของปริมาณถ่านหินในของผสมที่มีต่อร้อยละการขจัดกัมมะถันในถ่านหินและผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันที่ได้จากกระบวนการพบว่า เมื่อปริมาณถ่านหินในของผสมเพิ่มมากขึ้น สามารถขจัดกัมมะถันได้มากขึ้น และได้ปริมาณผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันเพิ่มขึ้น จนกระทั่งที่ปริมาณถ่านหินในของผสมร้อยละ 15 โดยน้ำหนักจะให้ร้อยละการขจัดกัมมะถันสูงสุด หลังจากนั้น เมื่อปริมาณถ่านหินที่ใช้ในการรวมกลุ่มเพิ่มขึ้น สามารถขจัดกัมมะถันในผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันได้น้อยลง

4. ขนาดของอนุภาคถ่านหิน

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการรวมกลุ่มถ่านหินขนาดเล็ก จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติดี คือ ปริมาณเถ้าและกัมมะถันต่ำ จากการทดลองพบว่า การรวมกลุ่มถ่านหินขนาดต่ำกว่า 75 ไมโครเมตรด้วยน้ำมันปาล์มดิบ ผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันที่ได้มีปริมาณเถ้าและกัมมะถันรวมเหลืออยู่ร้อยละ 14.59 และ 2.17 ตามลำดับ ที่ภาวะในการทดลองนี้สามารถขจัดเถ้าได้ร้อยละ 70.68 และขจัดกัมมะถันรวมในผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันร้อยละ 73.73 ในขณะที่ผลการทดลองรวมกลุ่มถ่านหินขนาดต่างๆด้วยน้ำมันเตา จะให้ผลการทดลองเป็นไปในแนวทางเดียวกัน

5. เวลาที่ใช้ในการรวมกลุ่ม

การทดลองรวมกลุ่มถ่านหินโดยใช้เวลาในการรวมกลุ่มต่างกันพบว่า เมื่อใช้เวลาในการรวมกลุ่มนานขึ้น สามารถขจัดเถ้าและปริมาณกัมมะถันรวมได้เพิ่มขึ้น จนกระทั่งใช้เวลาในการรวมกลุ่มนาน 15 นาที จะให้ผลการทดลองดีที่สุด สามารถขจัดเถ้าในผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหิน

ผสมน้ำมันได้ร้อยละ 71.89 และขจัดกำมะถันรวมได้ร้อยละ 73.73 เมื่อใช้เวลาในการรวมกลุ่ม นานกว่านี้ พบว่า ให้ผลที่ไม่แตกต่างกัน

6. การขจัดธาตุองค์ประกอบในเก้าผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมัน

เมื่อวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบในเก้าผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมัน ภายใต้ ภาวะการทดลองที่ดีที่สุด พบว่า สามารถขจัดธาตุแคลเซียมได้มากที่สุดร้อยละ 85.38 ธาตุเหล็ก ร้อยละ 81.74 ธาตุอะลูมิเนียมร้อยละ 81.35 ในขณะที่สามารถขจัดธาตุซิลิกอนได้ในปริมาณต่ำ ที่สุด

7. การจำลองภาวะการถลุงการรวมกลุ่มถ่านหินกับน้ำมัน

จากการจำลองภาวะการถลุงด้วยโปรแกรม Super Pro Designer รุ่น 2.7 เพื่อ ศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม โดยคำนึงทางด้านเศรษฐศาสตร์ พบว่า การออกแบบหน่วยปฏิบัติการโดยใช้ถ่านหินปริมาณ 2.5 ตันต่อกะ มีความเหมาะสมกว่าการใช้ ถ่านหินปริมาณ 1 ตันต่อกะ เมื่อพิจารณาค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมัน พบ ว่า ถ่านหินที่ผ่านกระบวนการทำความสะอาด้วยหน่วยปฏิบัติการนี้ให้ค่าความร้อน 4061 kJ/บาท ในขณะที่ถ่านหินที่ไม่ผ่านกระบวนการให้ค่าความร้อนที่ต่ำกว่า คือ 3800.86 kJ/บาท

ข้อเสนอแนะ

1. งานวิจัยในอนาคตควรมีการศึกษาตัวแปรอื่น ๆ เช่น ชนิดของถ่านหิน ชนิดน้ำมันอื่นๆ รวมทั้งศึกษาการปรับปรุงคุณภาพถ่านหินโดยการประยุกต์สารละลายกรด หรือ เบส ร่วมกับการ รวมกลุ่มถ่านหินกับน้ำมัน
2. ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองรวมกลุ่มถ่านหินกับน้ำมัน ส่วนใหญ่จะรวมตัวเป็นกลุ่ม เกาะบริเวณใบพัดและ baffle ของเครื่องปฏิกรณ์ ควรมีการศึกษาออกแบบเครื่องมือที่เหมาะสม กับการทดลอง เพื่อให้ได้ภาวะที่ดีที่สุด
3. การประยุกต์กระบวนการรวมกลุ่มถ่านหินด้วยน้ำมันในอุตสาหกรรมควรมีการศึกษา และออกแบบ อุปกรณ์อื่นๆที่เกี่ยวข้อง เช่น ถังตกตะกอน เพื่อแยกชั้นของกลุ่มถ่านหินที่ลอยอยู่ บริเวณผิวด้านบนของผสม

รายการอ้างอิง



ภาษาไทย

การคั่นคว่ำและทดลอง, กรม. ปาล์มน้ำมัน. กรุงเทพมหานคร: กรมกลีกรวม กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2527.

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. เทคโนโลยีการทำเหมืองถ่านหิน. กรุงเทพมหานคร: บริษัท แคนดิติมีเดีย จำกัด, 2538.

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. ถ่านหิน. กรุงเทพมหานคร: การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2539. (จุลสาร)

เกริกชัย สุกาญจน์จที. ไอน้ำและพลังงานจากถ่านหิน. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2529.

ชุติมา ลิ้มปิจักร์. สหสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการหลอมของถ่านหินและองค์ประกอบ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชาเคมีเทคนิค บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2532.

ปราโมทย์ ไชยเวท. ปิโตรเลียมเทคโนโลยี. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์สุนทรออฟเซต, 2537.

พรรณทวี ธรรมธราธาร. การดูดซึมซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยเถ้าลอยอัดเม็ดในฟลูอิดไธด์เบด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชาเคมีเทคนิค บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.

ภาษาอังกฤษ

Alonso, M.I., Valdes, A.D., Martinez-Tarazona, R.A. and Garcia, A.B. Coal Recovery from Coal Fines Cleaning Wastes by Agglomeration with Vegetable Oils: Effects of Oil Type and Concentration. Fuel 78 (1999): 753-759.

ASTM Standard; D 388. Classification of Coal by Rank. USA: American Society for Testing and Materials, 1994.

ASTM Standard; D 3172. Proximate Analysis of Coal and Coke. USA: American Society for Testing and Materials, 1994.

ASTM Standard; D 3173. Test for Moisture In the Analysis Sample of Coal and Coke. USA: American Society for Testing and Materials, 1994.

ASTM Standard; D 3174. Test for Ash In the Analysis Sample of Coal and Coke From Coal. USA: American Society for Testing and Materials, 1994.

- ASTM Standard; D 3175. Test for Volatile Matter In the Analysis Sample of Coal and Coke. USA: American Society for Testing and Materials,1994.
- ASTM Standard; D 3176. Ultimate Analysis Coal and Coke. USA: American Society for Testing and Materials,1994.
- ASTM Standard; D 3177. Total Sulfur In the Analysis Sample of Coal and Coke. USA: American Society for Testing and Materials,1994.
- ASTM Standard; D 2492. Form of Sulfur In Coal. USA: American Society for Testing and Materials,1994.
- Boni, A., N'kpomin A., Francois, O. and Antonini, G. Charcoal Deashing by An Oil Agglomeration Process: Effect of Various Operating Parameters. The Chemical Engineering Journal 57 (1995): 9 – 15.
- Cebeci, Y. and Eroglu, N. Determination of Bridging Liquid Type In Oil Agglomeration of Lignites. Fuel 77 (1998): 419 – 424.
- Coleman, R. D., Sparks, B. D., Majid, A. and Toll, F. N. Agglomeration - Flotation: Recovery of Hydrophobic Components from Oil Sands Fine Tailings. Fuel 74 (1995): 1156-1161.
- Crawford, R. J., Guy, D. W. and Mainwaring, D. E. The Influence of Coal Rank and Mineral Matter Content on Contact Angle Hysteresis. Fuel 73 (1994): 742 – 746.
- Garcia, A. B., Martinez-Tarazona, M. R. and Vega, J. M. G. Effect of Oil Concentration and Particle Size On the Cleaning of Spanish High – Rank Coals by Agglomerate with n-Heptane. Fuel 74 (1995): 1692 - 1697.
- Garcia, A. B., Martinez-Tarazona, M. R. and Vega, J. M. G. Cleaning of Spanish High – Rank Coals by Agglomerate with Vegetable Oils. Fuel 75 (1996): 885 - 890.
- Garcia, A. B., Martinez-Tarazona, M. R., Vega, J. M. G. and Spears, D. A. The Removal of Trace Elements from Spanish High Rank Coals by A Selective Agglomeration Process. Fuel 73 (1994): 1189-1196.
- Garcia, A. B., Martinez-Tarazona, M. R., Vega J. M. G. and Wheelock, T. D. On the Rule of Oil Wetting In the Cleaning of High Rank Coals by Agglomeration. Fuel 77 (1998): 387 - 392.

- Gurses, A., Doymus, K. D. and Bayrakceken, S. Selective Oil Agglomeration of Brown Coal: A Systematic Investigation of the Design and Process Variables In the Condition Step. Fuel 75 (1996): 1175 - 1180.
- Guy, D. W., Crawford, R. J. and Mainwaring, D. E. The Wetting Behavior of Several Organic Liquids in Water On Coal Surfaces. Fuel 75 (1996): 238 – 242.
- Lowry, H. H., ed. Chemistry of Coal Utilization. New York: John Wiley&Sons,1963.
- Majid, A., Coleman, R. D., Toll F., Pleizier, G., Deslandes, Y. and Ikura, M. Benefication of Coal-Heavy Oil Co-processing Residue by Oil-Phase Agglomeration. Fuel 74 (1995): 1036 – 1041.
- Mayer, R. A. Coal Desulfurization. New York : Marcel Dekker, Inc.,1977.
- Mayer, R. A. Coal Handbook. 1st ed. New York : Marcel Dekker, Inc.,1981.
- Pajares, J. A. and Tascon, J. M. D. Coal Science Volume II. London : Elsevier. 1995.
- Petela, R. Prediction of the Product Size In the Agglomeration of Coal Particles In a Water-Oil Emulsion. Fuel 70 (1991): 509 – 517.
- Petela, R., Ignasiak, B. and Pawlak, W. Selective Agglomeration of Coal: Analysis of Laboratory Batch Test Results. Fuel 74 (1995): 1200 – 1210.
- Petela, R. and Petela, G. Indices for Coal Desulfurization and De-Ashing Processes. Fuel 75 (1996): 1259 – 1266.
- Probstein, R. F., Hicks, R. E. Synthetic Fuels. McGraw-Hill, Inc.1982.
- Robbins, G. A., Winschel, R. A., Amos, C. L. and Burke, F. P. Agglomeration of Low-Rank Coal As a Pretreatment for Direct Coal Liquefaction. Fuel 71 (1992): 1039 – 1046.
- Schlosberg, R. H., ed. Chemistry of Coal Conversion. New York: Plenum Press, 1985.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

การวิเคราะห์สมบัติถ่านหิน

1 การวิเคราะห์ถ่านหินแบบประมาณ (Proximate analysis): ASTM D 3173-3175

1.1 ปริมาณความชื้นในตัวอย่างถ่านหิน (Standard test method for moisture in the analysis sample of coal and coke), ASTM D 3173

หลักการ นำตัวอย่างถ่านหินที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 250 ไมโครเมตร มาให้ความร้อนคงที่ในตู้อบ (drying oven) ที่อุณหภูมิประมาณ 105 – 110 °C เพื่อให้ไอน้ำระเหยออกไปจากถ่านหิน ค่าความชื้นที่คำนวณได้จากน้ำหนักของถ่านหินที่หายไป

เครื่องมือ ตู้อบ (drying oven) , ถาดอะลูมิเนียมพร้อมฝาปิด , desiccator
วิธีการทดลอง

- ถาดอะลูมิเนียมพร้อมฝาในตู้อบ (drying oven) ที่อุณหภูมิ 110 °C ประมาณ 30 นาที ทิ้งให้เย็นใน desiccator ประมาณ 15 นาที ชั่งน้ำหนักและบันทึกผล
- ชั่งตัวอย่างถ่านหินประมาณ 1 กรัม ใส่ในถาดอะลูมิเนียมที่ทราบน้ำหนักแน่นอน ปิดฝาทันที บันทึกน้ำหนักตัวอย่างถ่านหิน
- นำเข้าตู้อบที่อุณหภูมิประมาณ 105 –110°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง (จนกระทั่งน้ำหนักตัวอย่างถ่านหินคงที่)
- นำถาดอะลูมิเนียมใส่ใน desiccator ทิ้งให้เย็นจนกระทั่งอุณหภูมิห้อง ชั่งน้ำหนักของถาดอะลูมิเนียมพร้อมฝาปิดที่บรรจุตัวอย่างถ่านหินอบแล้วอยู่ภายใน บันทึกผล

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$M = (W_1 - W_2) / W \times 100$$

เมื่อ M = ร้อยละของปริมาณความชื้น

W_1 = น้ำหนักของอะลูมิเนียมพร้อมฝาปิด รวมน้ำหนักตัวอย่างถ่านหินเริ่มต้น

ก่อนการอบ (กรัม)

W_2 = น้ำหนักอะลูมิเนียมพร้อมฝาปิด รวมน้ำหนักตัวอย่างถ่านหินที่อบ (กรัม)

W = น้ำหนักตัวอย่างถ่านหิน (กรัม)

1.2 ปริมาณเถ้าในตัวอย่างถ่านหิน (Standard test method for ash in the analysis sample of coal and coke from coal), ASTM D 3174

หลักการ นำตัวอย่างถ่านหินที่ร้อนผ่านตะแกรงขนาด 250 ไมโครเมตร มาให้ความร้อนในเตาเผา (muffle furnace) ที่อุณหภูมิ 500 °C จนน้ำหนักคงที่ ร้อยละปริมาณเถ้าคำนวณได้จากน้ำหนักที่เหลืออยู่ภายหลังการเผา

เครื่องมือ เตาเผา (muffle furnace), crucible แบบ porcelain พร้อมฝา และ desiccator

วิธีการทดลอง

- เผา crucible พร้อมฝาในเตาเผา (muffle furnace) ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำออกมาทำให้เย็นใน desiccator ชั่งน้ำหนัก บันทึกผล
- ชั่งตัวอย่างถ่านหินประมาณ 1 กรัม ใส่ใน crucible ที่ทราบน้ำหนักแน่นอน ปิดฝาย่างรวดเร็ว บันทึกน้ำหนักตัวอย่าง
- นำตัวอย่างไปเผาบนตะเกียงเบนเซน จนควันระเหยหมด เพื่อได้กำมะถัน
- นำเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิ 450 - 500 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- เพิ่มอุณหภูมิเป็น 700 - 750 °C เผาจนน้ำหนักคงที่
- นำ crucible ออกจากเตาเผา ทำให้เย็นใน desiccator
- ชั่งน้ำหนัก crucible พร้อมฝา บันทึกผล

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$A = (W_3 - W_4) / W \times 100$$

เมื่อ A = ร้อยละของเถ้า

W_3 = น้ำหนักของ crucible พร้อมฝา และเถ้า (กรัม)

W_4 = น้ำหนักของ crucible พร้อมฝา (กรัม)

W = น้ำหนักตัวอย่างถ่านหิน (กรัม)

1.3 ปริมาณสารระเหยในตัวถ่านหิน (Standard test method for volatile matter in the analysis sample of coal and coke), ASTM D 3175

หลักการ นำตัวอย่างถ่านหินที่ร้อนผ่านตะแกรงขนาด 250 ไมโครเมตร ให้ความร้อนในเตาเผาแบบท่อ (tubular furnace) ปริมาณสารระเหยคำนวณได้จากน้ำหนักตัวอย่างถ่านหินที่หายไป

เครื่องมือ เตาเผา (tubular furnace), nickel crucible พร้อมฝา, desiccator

วิธีการทดลอง

- เผาครุชชีเบิ้ล nickle พร้อมฝา ในเตาเผาอุณหภูมิ 950 °C นาน 30 นาที
- นำออกจากเตาเผาปล่อยให้เย็นใน desiccator จนถึงอุณหภูมิห้อง ซึ่งน้ำหนักของครุชชีเบิ้ล บันทึกผล
- ซึ่งตัวอย่างถ่านหินประมาณ 1 กรัม ใส่ในครุชชีเบิ้ล nickle ที่ทราบน้ำหนักแน่นอน ปิดฝาให้สนิท บันทึกน้ำหนักตัวอย่าง
- นำครุชชีเบิ้ล nickle พร้อมตัวอย่างถ่านหิน เผาใน tubular furnace โดยให้ความร้อนเป็นช่วง ๆ เริ่มต้นให้ความร้อนแก่ถ่านหินที่อุณหภูมิ 300 °C , 600 °C นาน 3 นาที และ ที่อุณหภูมิ 950 °C เป็นเวลา 6 นาที
- นำครุชชีเบิ้ลออกจากเตาเผา ปล่อยให้เย็นใน desiccator ซึ่งน้ำหนักของครุชชีเบิ้ล พร้อมฝาและถ่านหินที่เหลือ บันทึกผล

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$V = (W_5 - W_6) / W \times 100$$

เมื่อ V = ร้อยละของสารระเหย

M = ร้อยละของความชื้น

W_5 = น้ำหนักของครุชชีเบิ้ล พร้อมฝา รวมน้ำหนักของถ่านหินก่อนเผา (กรัม)

W_6 = น้ำหนักของ ครุชชีเบิ้ล พร้อมฝา รวมน้ำหนักของถ่านหินหลังการเผา (กรัม)

W = น้ำหนักตัวอย่างถ่านหิน (กรัม)

1.4 ปริมาณคาร์บอนคงตัวในตัวอย่างถ่านหิน (Fixed carbon)

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

ร้อยละของคาร์บอนคงตัว = 100 - ร้อยละความชื้น - ร้อยละเถ้า - ร้อยละสารระเหย

2 การวิเคราะห์ปริมาณและรูปแบบกำมะถัน, ASTM D 2492 และ 3177

2.1 ปริมาณกำมะถันรวม (Standard test method for total sulphur in the analysis sample of coal and coke), ASTM D 3177

หลักการ เผาตัวอย่างถ่านหินที่ผสมกับ Eschka mixture กำมะถันที่ประกอบอยู่ในถ่านหินจะละลายในรูปแบบของซัลเฟตไอออน ดังนั้นสามารถหาปริมาณกำมะถันในตัวอย่างถ่านหินได้ในรูปแบบเบริยมซัลเฟต (BaSO_4)

เครื่องมือ เตาเผา (muffle furnace), porcelain crucible,

สารเคมี

- Eschka mixture ประกอบด้วย แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) กับโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ในอัตราส่วน 2 : 1 โดยน้ำหนัก
- สารละลายเบริยมคลอไรด์ (100 กรัม / ลิตร) ละลายเบริยมคลอไรด์ ($\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 100 กรัมในน้ำและเจือจางให้ได้ปริมาตร 1 ลิตร
- สารละลายกรดเกลือ, HCl (1:9) ผสมกรดเกลือเข้มข้น (ความถ่วงจำเพาะ 1.19) 1 ส่วน และน้ำกลั่น 9 ส่วนโดยปริมาตร
- สารละลายกรดเกลือ, HCl (1:1) ผสมกรดเกลือเข้มข้น (ความถ่วงจำเพาะ 1.19) และน้ำกลั่นในอัตราส่วนเท่ากันโดยปริมาตร
- methyl orange indicator โดยละลาย methyl orange 0.02 กรัมในน้ำร้อน 100 มิลลิลิตร และกรอง
- สารละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) โดยใช้ผลึกของ $(\text{Na}_2\text{CO}_3) \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 60 กรัม หรือ anhydrous Na_2CO_3 22 กรัม ละลายในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร

วิธีการทดลอง

- ชั่งน้ำหนักตัวอย่างถ่านหินประมาณ 1 กรัม รวมกับ Eschka mixture 3 กรัมใน crucible ผสมให้เข้ากันอย่างทั่วถึง แล้วปิดทับด้วย Eschka mixture 1 กรัม
- นำเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิห้องแล้วเพิ่มอุณหภูมิเป็น 825°C ประมาณ 3 ชั่วโมง เผาจนกระทั่งสีดำของถ่านหินหมดไป
- นำ crucible ออกจากเตาเผา ย่อยสารใน crucible ด้วยน้ำร้อน 100 มิลลิลิตร และคนให้ทั่วถึง เป็นเวลา 30 นาที
- ค่อย ๆ กรองสารละลายด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 ล้างด้วยน้ำร้อนหลาย ๆ ครั้ง จนสารละลายที่กรองได้มีปริมาตร 250 มิลลิลิตร

- ทำสารละลายที่กรองได้ให้กลางด้วยกรดเกลือ(1:1) โดยใช้เมธิลออเรนจ์ เป็นอินดิเคเตอร์ ทำสารละลายให้เป็นกรดเล็กน้อยด้วยกรดเกลือ (1:9) 1 มิลลิลิตร

- ต้มสารละลายที่กรองได้ให้เดือดและคนช้าๆ ค่อยๆเติมสารละลายแบเรียมคลอไรด์ลงไปอย่างช้า ๆ 10 มิลลิลิตร ด้วยปิเปต ต้มต่อไปเป็นเวลา 15 นาที ตั้งทิ้งไว้ค้างคืน

- กรองตะกอนแบเรียมซัลเฟต ($BaSO_4$) ด้วยกระดาษกรอง ashless เบอร์ 42 ล้าง ตะกอนด้วยน้ำร้อนหลาย ๆ ครั้ง จนน้ำล้างตะกอนปราศจากคลอไรด์ไอออน ซึ่งสามารถทดสอบโดยการเติมสารละลายซิลเวอร์ไนเตรท ($AgNO_3$)

- นำตะกอนที่กรองได้พร้อมกระดาษกรอง ใส่ในครุชีเบลที่ทราบน้ำหนักแน่นอน เข้าเตาเผาที่อุณหภูมิ $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลาประมาณ 3 ชั่วโมง หรือจนน้ำหนักของครุชีเบลพร้อมตะกอน $BaSO_4$ คงที่ นำออกจากเตาเผาทำให้เย็นใน desiccator ซึ่งน้ำหนัก

- blank correction ทำการทดลองเหมือนข้างต้นทุกประการ แต่ไม่ใช้ตัวอย่างถ่านหินเท่านั้น เพื่อตรวจสอบสารเคมีที่ใช้มีปริมาณกัมมะถันอยู่มากน้อยเพียงใด

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

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

เมื่อ	A	=	น้ำหนักตะกอน $BaSO_4$ ที่ได้จากตัวอย่าง (กรัม)
	B	=	น้ำหนักตะกอน $BaSO_4$ ได้จาก blank (กรัม)
	C	=	น้ำหนักตัวอย่างถ่านหินที่ใช้ (กรัม)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2 รูปแบบกำมะถันในถ่านหิน (Standard test method for forms of sulphur in coal), ASTM D 2492

หลักการ กำมะถันซัลเฟตแยกได้โดยกรดเกลือ ขณะที่กำมะถันไฟไรต์ สามารถคำนวณได้จากปริมาณของธาตุเหล็กที่เป็นองค์ประกอบ ส่วนกำมะถันอินทรีย์คำนวณจากผลต่างของปริมาณกำมะถันรวมกับกำมะถันซัลเฟตและไฟไรต์

2.2.1 กำมะถันซัลเฟต

เครื่องมือ เตาเผา (muffle furnace), porcelain crucible

สารเคมี

- แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น (ความถ่วงจำเพาะ 0.90)
- สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (1:10) ผสมแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 ส่วนและน้ำกลั่น 10 โดยปริมาตร
- สารละลายแบเรียมคลอไรด์ (100 กรัม / ลิตร) ละลายแบเรียมคลอไรด์ ($\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 100 กรัมในน้ำและเจือจางให้ได้ปริมาตร 1 ลิตร
- น้ำโบรมีนอิ่มตัว เติมโบรมีนปริมาณมากเกินพอในน้ำ 1 ลิตร (ความสามารถในการละลาย 42 กรัม/ลิตร)
- เอทานอล
- กรดเกลือเข้มข้น, HCl (ความถ่วงจำเพาะ 1.19)
- สารละลายกรดเกลือ, HCl (2:3) ผสมกรดเกลือเข้มข้น (ความถ่วงจำเพาะ 1.19) 2 ส่วน และน้ำกลั่น 3 ส่วนโดยปริมาตร
- methyl orange indicator โดยละลาย methyl orange 0.02 กรัมในน้ำร้อน 100 มิลลิลิตร และกรอง
- สารละลายซิลเวอร์ไนเตรต (0.43 กรัม/100มิลลิลิตร) ละลายซิลเวอร์ไนเตรต 0.43 กรัมในน้ำ ปรับปริมาตรสารละลายให้เป็น 100 มิลลิลิตร

วิธีการทดลอง

- ชั่งน้ำหนักตัวอย่าง 2 – 5 กรัม ใส่ในบีกเกอร์
- เติมกรดเกลือ (2:3) ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่เล็กน้อย พร้อมคนให้ทั่ว
- เติมเอทานอล 2 - 3 หยด ต้มให้เดือดช้า เป็นเวลา 30 นาที
- กรองด้วยกระดาษกรอง เบอร์ 1 ล้างด้วยน้ำร้อนหลาย ๆ ครั้ง จนกระทั่งไม่มีกรดเกลือค้างอยู่บนกระดาษกรอง เก็บตะกอนที่ได้จากการกรอง เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณไฟไรต์ต่อไป

- เติมน้ำโบรมีน 5 มิลลิลิตร ต้มให้เดือด อย่างน้อย 5 นาที ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
 - ตกตะกอนหลัก โดยค่อยๆเติมแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (ความถ่วงจำเพาะ 1.19) จนกระทั่งสารละลายเป็นเบสเล็กน้อย เมื่อทดสอบด้วยกระดาษลิตมัส เติมแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ให้มากเกินพออีก 5 มิลลิลิตร
 - กรองตะกอนด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 ล้างตะกอนด้วยสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์(1:10)ที่ร้อน
 - เติมกรดเกลือเข้มข้น (ความถ่วงจำเพาะ 1.19) ลงในสารละลายที่กรองได้ จนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนเป็นสีชมพู โดยใช้เมธิลออเรนจ์ เป็นอินดิเคเตอร์ เติมให้เกินพออีก 1 มิลลิลิตร
 - ต้มสารละลายที่กรองได้ให้เดือดและคนช้าๆ ค่อยๆเติมสารละลายแบเรียมคลอไรด์ลงไปอย่างช้า ๆ 10 มิลลิลิตร ด้วยปิเปต ต้มต่อไปเป็นเวลา 15 นาที ตั้งทิ้งไว้ค้างคืน
 - กรองตะกอนด้วยกระดาษกรอง ashless เบอร์ 42 ล้าง ตะกอนด้วยน้ำร้อนหลาย ๆ ครั้ง จนน้ำล้างตะกอนปราศจากคลอไรด์ไอออน ซึ่งสามารถทดสอบโดยการเติมสารละลายซิลเวอร์ไนเตรท (AgNO_3)
 - นำตะกอนที่กรองได้พร้อมกระดาษกรอง ใส่ในครุชชีเบลที่ทราบน้ำหนักแน่นอน เข้าเตาเผาที่อุณหภูมิ 850°C เป็นเวลาประมาณ 3 ชั่วโมง หรือจนน้ำหนักของครุชชีเบลพร้อมตะกอน BaSO_4 คงที่ นำออกจากเตาเผาทำให้เย็นใน desiccator ชั่งน้ำหนัก
 - blank correction ทำการทดลองเหมือนข้างต้นทุกประการ แต่ไม่ใช้ตัวอย่างถ่านหินเท่านั้น เพื่อตรวจสอบสารเคมีที่ใช้มีปริมาณกำมะถันอยู่เล็กน้อยเพียงใด

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$\text{ร้อยละของกำมะถันรวม} = 13.735 (A - B) / C$$

เมื่อ	A	=	น้ำหนักตะกอนที่ได้จากตัวอย่าง (กรัม)
	B	=	น้ำหนักตะกอนที่ได้จาก blank (กรัม)
	C	=	น้ำหนักตัวอย่างถ่านหินที่ใช้ (กรัม)

2.2 กำมะถันไฟไรต์

เครื่องมือ Atomic absorption spectrophotometer (AAS)

สารเคมี

- กรดเกลือเข้มข้น, HCl (ความถ่วงจำเพาะ 1.19)
- สารละลายกรดเกลือ, HCl (2:3) ผสมกรดเกลือเข้มข้น (ความถ่วงจำเพาะ 1.19) 2 ส่วน และน้ำกลั่น 3 ส่วนโดยปริมาตร
- สารละลายกรดเกลือ, HCl (1:49) ผสมกรดเกลือเข้มข้น (ความถ่วงจำเพาะ 1.19) 1 ส่วน และน้ำกลั่น 49 ส่วนโดยปริมาตร
- เหล็กมาตรฐาน (iron standard) ซึ่งเหล็กบริสุทธิ์ 0.4 ± 0.0001 กรัม หรือซิงค์เหล็ก (III) ออกไซด์ 0.5179 ± 0.0001 กรัมใส่ในบีกเกอร์ เติมกรดเกลือ (2:3) ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ปิดด้วยกระดาษฟิวส์ ให้ความร้อนจนกระทั่งสารละลายค่อยๆเดือดอย่างช้าๆ ปล่อยให้สารละลายเดือดเป็นเวลา 30 นาที นำสารละลายมาเจือจางให้ได้ปริมาตร 1 ลิตร
- สารละลายแลนทานัม ละลายแลนทานัมคลอไรด์ (LaCl_3) 175 กรัม หรือไฮเดรตแลนทานัมคลอไรด์ ($\text{LaCl}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) 265 กรัม ในน้ำและเจือจางให้ได้ 1 ลิตร
- กรดไนตริก(1:7) ผสมกรดไนตริกเข้มข้น (ความถ่วงจำเพาะ 1.42) 1 ส่วน และน้ำกลั่น 7 ส่วน โดยปริมาตร

วิธีการทดลอง

- ชั่งตะกอนที่ได้จากการหากำมะถันซัลเฟต ใส่ลงในบีกเกอร์
- เติมกรดไนตริก (1:7) 50 มิลลิลิตร ที่ระเหยพร้อมทั้งคนให้ทั่ว
- ต้มให้เดือดเป็นเวลา 30 นาที หรือทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง
- กรองด้วยกระดาษกรองและล้างด้วยน้ำเย็นหลายๆครั้ง จนสารละลายที่กรองได้มีปริมาตร 250 มิลลิลิตร
- นำสารละลายที่เจือจางแล้ว 10 มิลลิลิตร เติมสารละลายแลนทานัม 10 มิลลิลิตร เจือจางให้ได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตรด้วยสารละลายกรดเกลือ (1:49) เรียกสารละลายว่า สารละลายทดสอบ
- blank correction ทำการทดลองเหมือนข้างต้นทุกประการ โดยใช้ตัวอย่างจาก sulfate blank
- สร้างกราฟมาตรฐาน (calibration curve) โดยนำเหล็กมาตรฐานปริมาตรต่างๆ มาเติมสารละลายแลนทานัม 10 มิลลิลิตร และเจือจางให้ได้ 100 มิลลิลิตรด้วยสารละลายกรดเกลือ (1:49)
- วัดค่าการดูดซับของเหล็กมาตรฐานด้วย AAS กำหนดภาวะต่างๆ ดังนี้

ความยาวคลื่น 248.3 nm (0 - 5 ppm Fe)

ความยาวคลื่น 372.0 nm (5 - 100 ppm Fe)

ความยาวคลื่น 344.1 nm (> 100 ppm Fe)

- วัดค่าการดูดซับของ blank ละสารละลายทดสอบ

การเตรียม Standard curve ของเหล็ก

- นำสารละลายมาตรฐานเหล็กความเข้มข้น 1000 ppm มา 2.5 มิลลิลิตรทำให้เป็น 100 มิลลิลิตร ในขวดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร จะได้ความเข้มข้นของเหล็ก 25 ppm
- บีบอัดสารละลายที่มีความเข้มข้นของเหล็ก 25 ppm มา 1 มิลลิลิตร ทำให้เป็น 10 มิลลิลิตร ในขวดปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร จะได้ความเข้มข้นของเหล็ก 2.5 ppm
- บีบอัดสารละลายที่มีความเข้มข้นของเหล็ก 25 ppm มา 2 มิลลิลิตร ทำให้เป็น 10 มิลลิลิตร ในขวดปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร จะได้ความเข้มข้นของเหล็ก 5 ppm
- บีบอัดสารละลายที่มีความเข้มข้นของเหล็ก 25 ppm มา 3 มิลลิลิตร ทำให้เป็น 10 มิลลิลิตร ในขวดปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร จะได้ความเข้มข้นของเหล็ก 7.5 ppm
- บีบอัดสารละลายที่มีความเข้มข้นของเหล็ก 25 ppm มา 4 มิลลิลิตร ทำให้เป็น 10 มิลลิลิตร ในขวดปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร จะได้ความเข้มข้นของเหล็ก 10 ppm
- นำสารละลายมาตรฐานที่มีความเข้มข้นของเหล็ก 2.5, 5, 7.5 และ 10 ppm มาวัดค่า absorbance โดยเครื่อง atomic absorption spectrophotometer
- สร้าง standard curve ระหว่าง absorbance กับความเข้มข้นของเหล็ก
- จากค่า absorbance ของสารละลายที่วิเคราะห์ได้สามารถหาปริมาณเหล็กได้
- จากปริมาณเหล็กที่ทราบนำไปคำนวณหาปริมาณกำมะถันไฟไรต์ในตัวอย่างถ่านหิน

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$\text{ร้อยละของกำมะถันไฟไรต์} = 0.025(X/W)$$

เมื่อ X = ความเข้มข้นของเหล็กที่อ่านจาก standard curve (ppm)

W = น้ำหนักของตัวอย่างถ่านหิน (กรัม)

$$\text{ร้อยละกำมะถันไฟไรต์} = \text{ร้อยละของเหล็ก} * 1.148$$

หมายเหตุ แสดงที่มาของสูตร
 หน่วย ppm = มิลลิกรัม / ลิตร
 สมมติว่ามีปริมาณเหล็ก X มิลลิกรัม / ลิตร ในสารละลายตัวอย่าง 250 มล.
 นั่นคือ สารละลายตัวอย่าง 1000 มล. มีปริมาณเหล็ก X มิลลิกรัม
 สารละลายตัวอย่าง 250 มล. มีปริมาณเหล็ก $250 \times X / 1000$ มิลลิกรัม
 น้ำหนักถ่านหิน W กรัม มีปริมาณเหล็ก $0.025 \times X (10^{-3})$ กรัม
 น้ำหนักถ่านหิน 100 กรัม มีปริมาณเหล็ก $0.025(X/W)$ กรัม
 ถ้ามีปริมาณเหล็ก 55.85 กรัม จะเป็นซัลเฟอร์ในรูป FeS_2 32×2 กรัม
 ปริมาณเหล็ก $\frac{1}{4} (X/W)$ กรัม จะเป็นซัลเฟอร์ในรูป FeS_2

$$= (32 \times 2 / 55.85)(0.025)(X/W)$$

$$= 1.48 \times \text{ร้อยละของเหล็ก}$$

2.3 กำมะถันอินทรีย์ (Organic Sulfur)

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$\text{ร้อยละของกำมะถันอินทรีย์} = \text{ร้อยละของกำมะถันรวม} - \text{ร้อยละของ}$$

$$\text{กำมะถันซัลเฟต} - \text{ร้อยละของกำมะถันไฟไรต์}$$

3. การหาค่าความร้อนของถ่านหิน (Gross Heating Value) : ASTM D 2015

หลักการ การทำงานภายในเครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์ คือ ปรับอุณหภูมิของน้ำ
 ในถังให้เท่ากับเครื่องแช่บอมบ์ เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนและวัดอุณหภูมิของน้ำที่เพิ่มขึ้น เมื่อ
 ได้รับจากตัวอย่างที่ถูกเผาไหม้ แล้วนำมาคำนวณหาค่าความร้อนของการเผาไหม้ตัวอย่างถ่านหิน

เครื่องมือ oxygen bomb calorimeter

สารเคมี

- ถ่านหิน 1 กรัม
- 0.72 นอร์มัล ของ Na_2CO_3
- methyl orange
- แก๊สออกซิเจน

- น้ำกลั่น

วิธีการทดลอง

- ชั่งถ่านหิน 1 กรัมลงในครุชชีเบล
- ตัดลวด (fuse wire) ยาว 10 เซนติเมตร มาผูกปลายทั้งสองของหัวบอมบ์
- นำครุชชีเบลไปวางในตำแหน่งบนหัวบอมบ์ จัดให้ลวดที่ผูกไว้แตะที่ผิวหน้าของถ่านหิน
- เติมน้ำกลั่นลงในออกซิเจนบอมบ์ 1 มิลลิลิตร โดยใช้ปิเปต
- ประกอบหัวบอมบ์กับออกซิเจนบอมบ์เข้าด้วยกัน ชันเกลียวให้แน่นแล้วนำไปอัดแก๊สออกซิเจน จนมีความดัน 20 - 25 บรรยากาศ
- เติมน้ำกลั่นลงในถังบอมบ์ 1 ลิตร โดยให้น้ำมีอุณหภูมิ 24 - 25 °C นำออกซิเจนบอมบ์ที่อัดก๊าซเรียบร้อยแล้ววางลงในถังบอมบ์เติมน้ำลงไปในถังอีก 1 ลิตร เสียสายจุดระเบิด 2 เส้นต่อกับบอมบ์ ปิดฝาของเครื่อง
- เปิดสวิตซ์ให้เครื่องกวน ทำงานทุก ๆ นาที บันทึกค่าอุณหภูมิของน้ำ เมื่อเครื่องเดินประมาณ 5 นาที กดปุ่มจุดระเบิด บันทึกค่าอุณหภูมิที่จุดระเบิดนี้ และอุณหภูมิของน้ำที่สูงขึ้นทุกครึ่งนาที จนกระทั่งถึงอุณหภูมิสูงสุดแล้วลดลงหรือคงที่ในที่สุด
- ปิดสวิตซ์ของเครื่อง นำออกซิเจนบอมบ์ออกมาจากเครื่องปล่อยแก๊สจากบอมบ์อย่างช้า ๆ ให้หมด
- - ล้างหัวบอมบ์และออกซิเจนบอมบ์รวมทั้ง crucible ด้วยน้ำกลั่นที่เติม methyl orange จนหมดกรด (น้ำที่ล้างไม่เป็นสีชมพู)
- น้ำที่ล้างได้ไปไตเตรทกับ 0.072 นอร์มัล ของ Na_2CO_3 บันทึกจำนวน มิลลิลิตร ของ Na_2CO_3 ที่ใช้ไป
- วัดความยาวของลวดที่เหลือจากการเผาไหม้

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$H = (tw - e_1 - e_2 - e_3) / g$$

เมื่อ H = ค่าความร้อนของการเผาไหม้ถ่านหิน (แคลอรีต่อกรัม)

$$t = \text{อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ซึ่งได้แก่ค่าเนื่องจากเทอร์มิโมเตอร์แล้ว (°F)}$$

$$= t_c - t_a$$

$$t_c = \text{อุณหภูมิสูงสุดของการเผาไหม้เมื่อแก้ค่าเนื่องจากเทอร์มิโมเตอร์แล้ว (°F)}$$

t_a	=	อุณหภูมิเริ่มจุดระเบิดเนื่องจากเทอร์โมมิเตอร์แล้ว ($^{\circ}\text{F}$)
W	=	ค่าน้ำหนักสมมูล (แคลอรีต่อ $^{\circ}\text{F}$)
e_1	=	การแก้ค่าความร้อนของกรดไนตริก
	=	จำนวน มล. ของ 0.072 ของ Na_2CO_3 ที่ใช้ในการไทเทรต
e_2	=	การแก้ค่าความร้อนของการเกิดกรดซัลฟิวริก
	=	14 x (% กำมะถัน)
e_3	=	การแก้ค่าความร้อนของการเผาไหม้ลวด
	=	(2.3) x (ความยาวลวดที่ใช้ไป, เซนติเมตร)
g	=	ตัวอย่างถ่านหิน (กรัม)

การคำนวณ

$$\text{ร้อยละของปริมาณเถ้า} = \text{ร้อยละของปริมาณเถ้า} * 100 / (100-m)$$

(แบบไม่รวมความชื้น)

$$\text{ร้อยละปริมาณสารระเหย} = \text{ร้อยละของปริมาณสารระเหย} * 100 / (100-m)$$

(แบบไม่รวมความชื้น)

$$\text{ร้อยละปริมาณคาร์บอนคงตัว} = \text{ร้อยละของปริมาณคาร์บอนคงตัว} * 100 / (100-m)$$

(แบบไม่รวมความชื้น)

$$\text{ร้อยละปริมาณกำมะถันรวม} = \text{ร้อยละของปริมาณกำมะถันรวม} * 100 / (100-m)$$

(แบบไม่รวมความชื้น)

$$\text{ร้อยละปริมาณกำมะถันไฟไรต์} = \text{ร้อยละของปริมาณกำมะถันไฟไรต์} * 100 / (100-m)$$

(แบบไม่รวมความชื้น)

$$\text{ร้อยละปริมาณกำมะถันซัลเฟต} = \text{ร้อยละของปริมาณกำมะถันซัลเฟต} * 100 / (100-m)$$

(แบบไม่รวมความชื้น)

$$\text{ร้อยละปริมาณกำมะถันอินทรีย์} = \text{ร้อยละของปริมาณกำมะถันอินทรีย์} * 100 / (100-m)$$

(แบบไม่รวมความชื้น)

หมายเหตุ $m =$ ร้อยละความชื้น

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการคำนวณ

1 การวิเคราะห์แบบประมาณ

ตัวอย่าง : ถ่านหินแม่เมาะ ขนาดต่ำกว่า 75 ไมโครเมตร

การคำนวณปริมาณความชื้นในตัวอย่างถ่านหิน

น้ำหนักถาดอะลูมิเนียมและฝาปิด	12.0663	กรัม
น้ำหนักถาดอะลูมิเนียมและฝาปิดรวมน้ำหนักตัวอย่างที่ใช้	13.0661	กรัม
น้ำหนักถาดอะลูมิเนียมและฝาปิดรวมตัวอย่างหลังให้ความร้อน	12.9950	กรัม
ร้อยละความชื้น	$= \frac{\{(13.0661-12.0663)-(12.9950-12.0663)\}}{(13.0661-12.0663)} \times 100$ $= 7.11$	

การคำนวณปริมาณเถ้าในตัวอย่างถ่านหิน

น้ำหนักครุชิลและฝาปิด	18.0717	กรัม
น้ำหนักครุชิลและฝาปิดรวมน้ำหนักตัวอย่างที่ใช้	19.0719	กรัม
น้ำหนักครุชิลและฝาปิดรวมตัวอย่างหลังให้ความร้อน	18.4051	กรัม
ร้อยละเถ้า	$= \frac{(19.0719 - 18.0717)}{(19.0719 - 18.0717)} \times 100$ $= 33.33$	

การคำนวณปริมาณสารระเหยในตัวอย่างถ่านหิน

น้ำหนักครุชิลและฝาปิด	20.9632	กรัม
น้ำหนักครุชิลและฝาปิดรวมน้ำหนักตัวอย่างที่ใช้	21.9634	กรัม
น้ำหนักครุชิลและฝาปิดรวมตัวอย่างหลังให้ความร้อน	21.4914	กรัม
ร้อยละน้ำหนักที่สูญเสีย	$= \frac{\{(21.9634-20.9632)-(21.4914-20.9632)\}}{(21.9634-20.9632)} \times 100$ $= 47.19$	
ร้อยละสารระเหย	$= 47.19 - 7.42$	$= 38.79$

การคำนวณสมบัติถ่านหินแบบไม่คิดความชื้น

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณน้ำในถ่านหิน} &= 33.48 \times 100 / (100 - 7.42) \\ &= 36.05 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณสารระเหยในถ่านหิน} &= 39.81 \times 100 / (100 - 7.42) \\ &= 43.00 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณคาร์บอนคงตัวในถ่านหิน} &= 100 - 36.05 - 43.00 \\ &= 20.95 \end{aligned}$$

หมายเหตุ การคำนวณร้อยละความชื้น ถ้ำ สารระเหย ในถ่านหิน คำนวณจากการทดลอง
หนึ่งครั้ง ส่วนการคำนวณสมบัติถ่านหิน คำนวณจากร้อยละความชื้น ถ้ำ และ สารระเหยเฉลี่ย
จากผลการทดลอง 3 ครั้ง

2 การวิเคราะห์ปริมาณและรูปแบบกำมะถัน

ตัวอย่าง : ถ่านหินแม่เมาะ ขนาดต่ำกว่า 75 ไมโครเมตร

การคำนวณปริมาณกำมะถันรวม

น้ำหนักครุชชีเบ็ด	16.6004	กรัม
น้ำหนักตัวอย่างที่ใช้	0.9997	กรัม
น้ำหนักครุชชีเบ็ดรวมตัวอย่างหลังการทดลอง	17.0264	กรัม
น้ำหนักของแบเรียมซัลเฟต (blank)	0.0175	กรัม
ร้อยละกำมะถันรวม	= $\frac{((17.0264 - 16.6004) - 0.0175) \times 13.738}{0.9997}$	
	= 5.61	

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละกำมะถันรวม เมื่อไม่คิดความชื้น} &= 5.61 \times 100 / (100 - 7.42) \\ &= 6.06 \end{aligned}$$

การคำนวณปริมาณกำมะถันซัลเฟต

น้ำหนักครุชิล	25.5896	กรัม
น้ำหนักตัวอย่างที่ใช้	2.0003	กรัม
น้ำหนักครุชิลรวมตัวอย่างหลังการทดลอง	25.9020	กรัม
น้ำหนักของแบเรียมซัลเฟต (blank)	0.0103	กรัม

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละกำมะถันซัลเฟต} &= \{(25.9020-25.5896)-0.0103\} \times 13.735 / 2.0003 \\ &= 2.07 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละกำมะถันรวม เมื่อไม่คิดความชื้น} &= 2.07 \times 100 / (100-7.42) \\ &= 2.23 \end{aligned}$$

3 การคำนวณร้อยละการขจัดธาตุองค์ประกอบในเถ้าผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมัน

ข้อมูล

เถ้าในถ่านหินร้อยละ 36.06

เถ้าในผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันร้อยละ 14.59

ผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันร้อยละ 72.45

ธาตุซิลิกอนในเถ้าถ่านหินร้อยละ 11.3484

ธาตุซิลิกอนในเถ้าผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมันร้อยละ 15.5036

การคำนวณ

ถ่านหินเริ่มต้น 100 กรัม มีเถ้าถ่านหิน 36.06 กรัม

เถ้าถ่านหิน 36.06 กรัม ประกอบด้วยธาตุซิลิกอน = $36.06 \times 11.3484 = 4.0922$ กรัม

ถ่านหินเริ่มต้น 100 กรัม ผ่านกระบวนการรวมกลุ่มถ่านหินกับน้ำมันได้ผลิตภัณฑ์ 72.45 กรัม

ผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมัน 72.45 กรัม มีเถ้า = $72.45 \times 14.59 = 10.57$ กรัม

เถ้าผลิตภัณฑ์ 10.570 กรัม ประกอบด้วยธาตุซิลิกอน = $10.57 \times 15.5036 = 1.6387$ กรัม

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละการขจัดธาตุซิลิกอนในผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมัน} &= (4.0922-1.6387)/4.0922 \times 100 \\ &= 59.96 \end{aligned}$$

4 การคำนวณค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมัน

สูตรในการคำนวณ

	H	=	$(t_w - e_1 - e_2 - e_3) / g$
เมื่อ	H	=	ค่าความร้อนของการเผาไหม้ถ่านหิน (แคลอรีต่อกรัม)
	t	=	อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ซึ่งได้แก่ค่าเนื่องจากเทอร์โมมิเตอร์แล้ว ($^{\circ}\text{F}$)
		=	$t_c - t_a$
	t_c	=	อุณหภูมิสูงสุดของการเผาไหม้เมื่อแก้ค่าเนื่องจากเทอร์โมมิเตอร์แล้ว ($^{\circ}\text{F}$)
	t_a	=	อุณหภูมิเริ่มจุดระเบิดเนื่องจากเทอร์โมมิเตอร์แล้ว ($^{\circ}\text{F}$)
	W	=	ค่าน้ำหนักสมมูล (แคลอรีต่อ $^{\circ}\text{F}$)
	e_1	=	การแก้ค่าความร้อนของกรดไนตริก
		=	จำนวน มล. ของ Na_2CO_3 ที่ใช้ในการไทเทรต
	e_2	=	การแก้ค่าความร้อนของการเกิดกรดซัลฟิวริก
		=	$14 \times (\% \text{ กำมะถัน})$
	e_3	=	การแก้ค่าความร้อนของการเผาไหม้ลวด
		=	$(2.3) \times (\text{ความยาวลวดที่ใช้ไป, เซนติเมตร})$
	g	=	ตัวอย่างถ่านหิน (กรัม)

ข้อมูล

ปริมาณผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมัน 1.0008 กรัม

ร้อยละกำมะถันรวมในผลิตภัณฑ์กลุ่มถ่านหินผสมน้ำมัน = 2.17

ความแตกต่างอุณหภูมิ = $26.82 - 24.44 = 2.38$ องศาเซลเซียส

ค่าน้ำหนักสมมูล $2409 \text{ cal/}^{\circ}\text{C}$

ปริมาตร Na_2CO_3 ในการไทเทรต 2.9 มิลลิลิตร

ความยาวลวดที่ใช้ไป = $10 - 4.2 = 5.8$ เซนติเมตร

การคำนวณ

$$\begin{aligned}
 H &= ((2409 \times 2.38) - 2.9 - (14 \times 2.17) - (2.3 \times 5.8)) / 1.0008 \\
 &= 5682.24 \text{ cal/g} \\
 &= 23,702.82 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$

ภาคผนวก ค

การจำลองภาวะการณ์กระบวนการรวมกลุ่มถ่านหินกับน้ำมัน

STREAM REPORT

Batch Time = 3.3 hr

STREAM NAME	slurry	Palm oil	dry agg. coa	air outlet	Coal
SOURCE	V-101	INPUT	SLD-101	SLD-101	INPUT
DESTINATION	V-102	V-102	OUTPUT	OUTPUT	V-101

STREAM PROPERTIES

ACTIVITY U/ml	0	0	0	0	0
TEMP °C	30.00	30.00	60.00	115.00	30.00
PRES bar	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
DENSITY g/l	1055.10	867.00	1367.40	0.90	1667.00

COMPONENT FLOWRATES (kg/Batch)

Air	0.00	0.00	0.00	10658.66	0.00
Coal	2500.00	0.00	2475.00	0.00	2500.00
Palm oil	0.00	750.00	750.00	0.00	0.00
Water	16666.67	0.00	32.58	1193.77	0.00

TOTAL (kg/batch)	19166.67	750.00	3257.58	11852.43	2500.00
TOTAL (m3/batc)	18.17	0.87	2.38	13819.00	1.50

```
*****
```

STREAM NAME	air inlet	mixture	agg. coal	Wash out	Sludge
SOURCE	INPUT	V-102	BFP-101	BFP-101	CL-101
DESTINATION	SLD-101	BFP-101	SLD-101	CL-101	OUTPUT

```
*****
```

STREAM PROPERTIES

ACTIVITY U/ml	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TEMP °C	25.00	30.00	30.00	30.00	30.00
PRES bar	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
DENSITY g/l	1.20	1046.50	1244.70	1000.30	1022.00

COMPONENT FLOWRATES (kg/Batch)

Air	10658.66	0.00	0.00	0.00	0.00
Coal	0.00	2500.00	2475.00	25.00	25.00
Palm oil	0.00	750.00	750.00	0.00	0.00
Water	0.00	16666.67	1226.35	32140.32	438.72

```
*****
```

TOTAL (kg/batch)	10658.66	19916.67	4451.35	32165.32	463.72
TOTAL (m3/batc	8993.73	19.03	3.58	32.16	0.45

```
*****
```

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย


```

*****
STREAM NAME      Water  clarified water  wash in
SOURCE           INPUT   CL-101         INPUT
DESTINATION      V-101  OUTPUT         BFP-101
*****

```

STREAM PROPERTIES

```

ACTIVITY U/ml    0.00      0.00      0.00
TEMP °C         30.00     30.00     30.00
PRES bar        1.00      1.00      1.00
DENSITY g/l     1000.00   1000.00   1000.00

```

COMPONENT FLOWRATES (kg/Batch)

```

Water           16666.67  31701.60  16700.00

```

```

*****
TOTAL (kg/batch 16666.67  31701.60  16700.00
TOTAL (m3/batc  16.67     31.70     16.70
*****

```

OVERALL MATERIAL BALANCE (kg/Batch)

(Hours per Batch = 3)

```

*****
COMPONENT      IN      OUT      (OUT-IN)
*****

```

```

Coal           2500.00  2500.00  0.00
Palm oil       750.00   750.00   0.00
Water          33366.67 33366.67 0.00

```

```

*****
TOTAL          36616.67 36616.67 0.00
*****

```

UNIT OPERATION DATA

Number of Process Steps = 5

Unit Name = V-101

Unit Use = Blending Tank

Calculation mode : Design

Operation mode : Batch

Agitation Rate = 0.25

Exit Temperature = 30.00

Heat Trans Agent = Chilled Water

Height/Diameter = 2.50

Liq Vol/Tot Vol = 0.85

Design Pressure = 1.00

Operating Press = 1.00

Vessel is constructed according to ASME standards. Max Tot Volume = 300.00

Cost was estimated using system model for Blending Tank

Unit Name = V-102

Unit Use = Blending Tank

Calculation mode : Design

Operation mode : Batch

Agitation Rate = 0.25

Exit Temperature = 30.00

Heat Trans Agent = Chilled Water

Height/Diameter = 2.50

Liq Vol/Tot Vol = 0.85

Design Pressure = 1.00

Operating Press = 1.00

Vessel is constructed according to ASME standards.

Max Tot Volume = 300.00

Cost was estimated using system model for Blending Tank

Unit Name = SLD-101
 Unit Use = Sludge Dryer
 Calculation mode : Design
 Operation mode : Batch
 Max Evap Capacity = 18000.000 [kg/h]
 Solids In Dried Sludge = 99.000 []
 Dried Sludge Temp = 60.000 [°C]
 Exiting Air Temp = 115.000 [°C]
 Latent Heat of Water = 569.378 [kcal/kg]
 Heat Loss = 8.000 [% of total heating]
 Heating Agent = Steam
 Moisture in Air In = 0.008 [kg H2O/kg Dry Air]
 Moisture in Air Out = 0.120 [kg H2O/kg Dry Air]

=====

Component Name Is Volatile ?

Air	FALSE
coal	FALSE
palm oil	FALSE
Water	TRUE

=====

Cost was estimated using system model for Sludge Dryer

Unit Name = BFP-101
 Unit Use = Belt Filter
 Calculation mode : Rating/Set
 Operation mode : Batch
 Belt Width = 0.50
 Number of Units = 1
 Solids Recov(%) = 99.23

Solids in Cake(%) = 72.45

Wash Vol Flow = 10.00

=====

Component Name	Retention Mass %
Air	0.00
Coal	9900.00
Palm oil	10000.00
Water	0.00

=====

Cost was estimated using system model for Belt Filter

Unit Name = CL-101

Unit Use = Clarifier

Calculation mode : Design

Operation mode : Batch

EMISSION DATA

=====

Component Name	Emitted?	EmissionFracSet?	Emission %
Air	No	No	0.00
Coal	No	No	0.00
Palm oil	No	No	0.00
Water	No	No	0.00

=====

Wind speed = 1.500

Liquid Viscosity = 1.000

Emission Models Used For Each Component

=====

Component Name	Model

Air	Springer
coal	Springer
palm oil	Springer
Water	Springer

=====

Overflow rate is calculated

Particle Diameter	= 75.000
Particle Density	= 1030.000
Liquid Viscosity	= 1.000
Tank depth is specified	
Tank depth	= 3.000
Maximum Area	= 2500.000
Tank config.	= Circular
Partcls in sludge	= 55100.000

=====

Component Name Removal Prct

Air	0.000
Coal	100.000
Palm oil	99.000
Water	0.000

=====

Cost was estimated using system model for Clarifier

PROCESS SCHEDULING DATA

Plant Mode of Operation = BATCH

Annual Operating Time = 7920.00 hours

Number of campaigns = 1 campaign(s) per year

Plant Batch Time = 3.34 hours

Batch Turnaround Effic. = 1.00

Process Step Name	Sched Set By User	Process Time (hr)	Turnard Time (hr)	Cycles Per Batch	Start Time (hr)	Abs or Rel	Start Time Ref. Step	Container Unit
V-101	No	0.09	0.10	1	0.00	Abs	n/a	V-101
V-102	No	0.25	0.75	1	0.00	Rel	V-101	V-102
SLD-101	No	2.00	0.50	1	0.00	Rel	BFP-101	SLD-101
BFP-101	No	0.50	0.10	1	0.00	Rel	V-102	BFP-101
CL-101	No	2.00	0.25	1	0.00	Rel	BFP-101	CL-101

MAJOR EQUIPMENT SPECIFICATION AND FOB COST (1996 prices)

Quantity/	Stand-by	Description	Unit Cost (\$)	Cost (\$)
1/0	V-101	Blending Tank Volume = 21.37 m ³ Power = 4.54 kW	33000	33000
1/0	V-102	Blending Tank Volume = 22.39 m ³ Power = 4.76 kW	34000	34000
1/0	SLD-101	Sludge Dryer Evaporative Capacity = 0.10 kg/s	9000	9000
1/0	BFP-101	Belt Filter Belt Width = 0.50 m	149000	149000
1/0	CL-101	Clarifier Area = 29.08 m ²	40000	40000
		Cost of Unlisted Equipment 20.0 % of Total		66000
TOTAL EQUIPMENT PURCHASE COST				331000

FIXED CAPITAL ESTIMATE SUMMARY (1996 prices)

A. TOTAL PLANT DIRECT COST (TPDC) (physical cost)

1. Equipment Purchase Cost (PC)	\$	331000
2. Installation (summed over all units, inc. unlisted)		147000
3. Process Piping	(0.35 X PC)	116000
4. Instrumentation	(0.40 X PC)	132000
5. Insulation	(0.03 X PC)	10000
6. Electrical	(0.10 X PC)	33000
7. Buildings	(0.45 X PC)	149000
8. Yard Improvement	(0.15 X PC)	50000
9. Auxiliary Facilities	(0.40 X PC)	132000

	TPDC =	1100000

B. TOTAL PLANT INDIRECT COST (TPIC)

10. Engineering	(0.25 X TPDC)	275000
11. Construction	(0.35 X TPDC)	385000

	TPIC =	660000

C. TOTAL PLANT COST (TPDC + TPIC) TPC = 1760000

12. Contractor's fee	(0.05 X TPC)	88000
13. Contingency	(0.10 X TPC)	176000

	(12+13) =	264000

D. DIRECT FIXED CAPITAL (DFC) TPC + 12 + 13 = 2024000

LABOR REQUIREMENT ESTIMATE SUMMARY

Equipment Name	Number of Units	operator Hours Per Year
-------------------	--------------------	----------------------------

V-101	1	18.1
V-102	1	95
SLD-101	1	316.8
BFP-101	1	76
CL-101	1	0
Warehouse		2000
Packaging		2000
Quality Control		0
Other		2000

TOTAL		6505.9
-------	--	--------

RAW MATERIALS (1996 prices)

Component Name	Unit Cost (\$/kg)	Annual Amount (kg)	Cost (\$/yr)
-------------------	----------------------	-----------------------	-----------------

Palm oil	3.75E-01	2375748	891000
Coal	1.00E-01	7919160	792000
Water	1.25E-02	52794410.56	660000

TOTAL			2343000
-------	--	--	---------

ประวัติผู้เขียน

นางสาวปิ่นธนา แสงจันทร์ เกิดวันที่ 2 กันยายน พ.ศ. 2518 ที่ อำเภอ เมือง จังหวัด ภูเก็ต สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์ สาขาเคมีวิศวกรรม (เทคโนโลยีทางเชื้อเพลิง) ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2539 และ เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2540



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย