


การจัดพิมพ์จากต้นฉบับด้วยเอทานอล-ไปแตสซีเอ็มไฮดรอกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต



นางสาวกฤติกา จารุทะวีย์

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค


คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-1220-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DESULFURIZATION OF COAL WITH SUPERCRITICAL ETHANOL-POTASSIUM HYDROXIDE



Miss Krittika Charutawai

สถาบันวิทยบริการ

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

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2001

ISBN 974-03-1220-9



กฤติกา จารุทะวีย์ : การขจัดกำมะถันจากถ่านหินด้วยเอทานอล-โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์  
ภาวะเหนือวิกฤต. (Desulfurization of Coal with Supercritical Ethanol-Potassium  
Hydroxide) อ. ที่ปรึกษา : ผศ. ดร. สมเกียรติ งามประเสริฐสุทธิ, อ. ที่ปรึกษาร่วม :  
ศ. ดร. ภัทรพรณ ประศาสน์สารกิจ, 93 หน้า. ISBN 974-03-1220-9.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการขจัดกำมะถันจากถ่านหินแม่เมาะด้วยเอทานอล-  
โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตในเครื่องปฏิกรณ์กึ่งต่อเนื่อง โดยศึกษาผลของอุณหภูมิ  
ความดัน เวลา และโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อร้อยละผลได้ การขจัดเถ้า และการขจัดกำมะถัน  
จากผลการทดลองแสดงว่าการเพิ่มอุณหภูมิทำให้การสูญเสียน้ำหนักของถ่านหินและการขจัด  
กำมะถันเพิ่มขึ้น การเติมโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ในช่วงที่ทำการศึกษามีส่วนช่วยในการขจัดเถ้า  
และกำมะถันไฟไรต์ แต่ทำให้การขจัดกำมะถันอินทรีย์ลดลง ในกระบวนการขจัดกำมะถันให้ผล  
ร้อยละการขจัดกำมะถันไฟไรต์ 7.6-89.4 ร้อยละการขจัดกำมะถันอินทรีย์ 1.1-19.6 และร้อยละ  
การขจัดกำมะถันรวม 13.7-47.7 ภาวะที่สามารถขจัดกำมะถันรวมได้สูงสุดคือ อุณหภูมิ 350  
องศาเซลเซียส ความดัน 8.27 เมกะปาสคาล เวลา 60 นาที และเติมโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ 5  
กรัมต่อลิตร และให้ผลร้อยละผลได้ถ่านหิน 81.2 ร้อยละการขจัดกำมะถันรวม 47.7 ร้อยละการ  
ขจัดเถ้า 10

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา...เคมีเทคนิค.....  
สาขาวิชา..เคมีเทคนิค.....  
ปีการศึกษา...2544.....

ลายมือชื่อนิสิต...กฤติกา...จารุทะวีย์.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

# # 4172208323 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD: DESULFURIZATION / COAL / SUPERCRITICAL ETHANOL

KRITTIKA CHARUTAWAI : DESULFURIZATION OF COAL WITH SUPERCRITICAL ETHANOL-POTASSIUM HYDROXIDE. THESIS ADVISOR : SOMKIAT NGAMPRASERTSITH, Dr. de l' INPT, THESIS CO-ADVISOR : PROF. PATTARAPAN PRASASSARAKICH, Ph.D., 93 pp. ISBN 974-03-1220-9.

Desulfurization of Mae Moh coal with supercritical ethanol-potassium hydroxide in semi-continuous reactor was studied. The effects of temperature, pressure, time and potassium hydroxide on yield and ash and sulfur removal were investigated. The results indicated that coal weight loss and sulfur removal increased with increasing temperature. Potassium hydroxide addition in the range of this study could enhance ash and pyritic sulfur removal but decreased the organic sulfur removal. In this desulfurization process, the reduction of sulfur was in the range of 7.6-89.4% in pyritic sulfur, 1.1-19.6% in organic sulfur and 13.7-47.7% in total sulfur. The optimum condition for total sulfur removal was at 350°C, 8.27 MPa, 30 min and 5 g/l of potassium hydroxide and gave the coal yield of 81.2%, the total sulfur reduction of 47.7% and the ash reduction of 10%

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department...Chemical Technology.....

Field of study...Chemical Technology.....

Academic year...2001.....

Student's signature...*Krittika Charutawai*...

Advisor's signature...*S. Ngamprasertsith*...

Co-advisor's signature...*Pattarapan Prasassarakich*...

## กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณผศ.ดร.สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์ และศ.ดร.ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำ และช่วยเหลือให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำแนะนำ

ขอขอบคุณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่กรุณาอนุเคราะห์ตัวอย่างถ่านหินเพื่อใช้ในการทำวิทยานิพนธ์ และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยทุกท่านที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการติดต่อประสานงานการรับตัวอย่างทุกขั้นตอน

ขอขอบคุณทบวงมหาวิทยาลัยและบัณฑิตวิทยาลัยที่อนุเคราะห์ทุนอุดหนุนงานวิจัยนี้ ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการวิเคราะห์ตัวอย่าง

ขอขอบคุณบุคลากรภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการ ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้การทำวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วง

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณบิดา มารดา และผู้อยู่เบื้องหลังที่ได้ให้กำลังใจ ให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือ และให้การสนับสนุนจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
2 วารสารปริทัศน์.....	3
2.1 ถ่านหิน.....	3
2.2 การจำแนกถ่านหิน .....	4
2.3 การวิเคราะห์ถ่านหิน.....	6
2.4 กำมะถันในถ่านหิน.....	9
2.5 การขจัดกำมะถันในถ่านหิน .....	11
2.6 ของไหลเหนือวิกฤต .....	12
2.7 สมบัติของของไหลเหนือวิกฤต .....	17
2.8 Modifiers.....	21
2.9 ประโยชน์ของของไหลเหนือวิกฤต.....	22
2.10 การขจัดกำมะถันด้วยแอลกอฮอล์เหนือวิกฤต .....	22
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	23
3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง .....	25
3.1 อุปกรณ์การทดลอง.....	25
3.2 ตัวอย่างถ่านหินและสารเคมี.....	29
3.3 การดำเนินการวิจัย .....	29
3.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	32
4 ผลการทดลอง การวิเคราะห์และวิจารณ์ผลการทดลอง.....	35
4.1 ถ่านหินที่มีปริมาณกำมะถันต่ำ.....	35
4.1.1 การวิเคราะห์สมบัติและปริมาณกำมะถันในถ่านหินเริ่มต้น .....	35

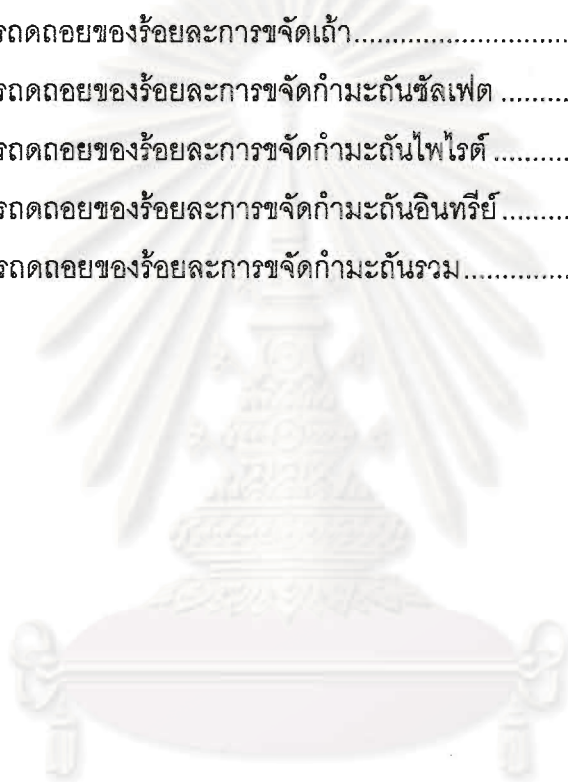
4.1.2	ผลของตัวแปรต่างๆที่มีต่อการขจัดกัมมันและแก้ ในถ่านหินกัมมันต่ำ.....	36
	ก. ผลของอุณหภูมิและความดัน.....	39
	ข. ผลของเวลา.....	40
	ค. ผลของโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์.....	40
4.2	ถ่านหินที่มีกัมมันสูง.....	43
4.2.1	การวิเคราะห์สมบัติและกัมมันในถ่านหินเริ่มต้น.....	43
4.2.2	ผลของตัวแปรต่างๆที่มีต่อการขจัดกัมมันและแก้ ในถ่านหินกัมมันสูง.....	44
	ก. ผลของปัจจัยต่างๆต่อร้อยละผลได้ของถ่านหิน.....	47
	ข. ผลของปัจจัยต่างๆต่อร้อยละการขจัดแก้.....	48
	ค. ผลของปัจจัยต่างๆต่อร้อยละการขจัดกัมมันซิลเฟต.....	50
	ง. ผลของปัจจัยต่างๆต่อร้อยละการขจัดกัมมันไพไรต์.....	51
	จ. ผลของปัจจัยต่างๆต่อร้อยละการขจัดกัมมันอินทรีย์.....	53
	ฉ. ผลของปัจจัยต่างๆต่อร้อยละการขจัดกัมมันรวม.....	55
5	สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ.....	57
	รายการอ้างอิง.....	59
	ภาคผนวก.....	62
	ประวัติผู้เขียน.....	93



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การจำแนกถ่านหินตามศักดิ์.....	6
2.2 สมบัติวิกฤตของสารบางชนิด .....	14
2.3 เปรียบเทียบสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ระหว่างของไหลเหนือวิกฤตกับแก๊สและของเหลว .....	16
3.1 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษาในถ่านหินกัมมะถันต่ำ .....	29
3.2 จำนวนการทดลองและภาวะที่ทดลองในถ่านหินกัมมะถันต่ำ .....	30
3.3 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษาในถ่านหินกัมมะถันสูง .....	31
3.4 จำนวนการทดลองทั้งหมดที่ต้องทำการทดลองในถ่านหินกัมมะถันสูง .....	31
4.1 การวิเคราะห์สมบัติแบบประมาณและไม่รวมความชื้นของถ่านหินที่มีกัมมะถันต่ำ.....	36
4.2 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุแบบไม่รวมความชื้นและเถ้าของถ่านหินที่มีกัมมะถันต่ำ.....	36
4.3 สมบัติของถ่านหินกัมมะถันต่ำหลังผ่านการขจัดกัมมะถันด้วยเอทานอล-โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์เหนือวิกฤตแบบไม่รวมความชื้น .....	37
4.4 ร้อยละการขจัดกัมมะถันรูปแบบต่างๆและร้อยละการขจัดเถ้าแบบไม่รวมความชื้นของถ่านหินกัมมะถันต่ำ .....	38
4.5 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณและปริมาณกัมมะถันแบบไม่รวมความชื้นของถ่านหินแม่เมาะขนาด 1-2 มิลลิเมตร .....	43
4.6 ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ ไม่รวมความชื้นและเถ้าของถ่านหินแม่เมาะขนาด 1-2 มิลลิเมตร.....	43
4.7 สมบัติของถ่านหินแม่เมาะหลังผ่านการขจัดกัมมะถันด้วยเอทานอล-โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์เหนือวิกฤตแบบไม่รวมความชื้น.....	45
4.8 ร้อยละการขจัดเถ้า ร้อยละการขจัดกัมมะถันรวมและร้อยละการขจัดรูปแบบกัมมะถันแบบไม่รวมความชื้น .....	46
4.9 เปรียบเทียบผลการขจัดกัมมะถันรวมของงานวิจัยอื่นกับงานวิจัยนี้.....	56
ข1 ค่าสัมประสิทธิ์ของอิทธิพลต่างๆที่ใช้ในการคำนวณการวิเคราะห์ความแปรปรวน.....	76
ข2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของ 2 ตัวแปร .....	77
ข3 ข้อมูลการทดลองร้อยละการขจัดกัมมะถันไพไรต์ .....	78
ข4 การคำนวณหา contrast.....	79
ข5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละการขจัดกัมมะถันไพไรต์ .....	80
ค1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนร้อยละผลได้ของถ่านหิน .....	81
ค2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนร้อยละการลดเถ้า .....	82

ตารางที่	หน้า
ค3	การวิเคราะห์ความแปรปรวนร้อยละการขจัดกำมะถันซัลเฟต .....83
ค4	การวิเคราะห์ความแปรปรวนร้อยละการขจัดกำมะถันไฟโรต์ .....84
ค5	การวิเคราะห์ความแปรปรวนร้อยละการขจัดกำมะถันอินทรีย์ .....85
ค6	การวิเคราะห์ความแปรปรวนร้อยละการขจัดกำมะถันรวม .....86
ค7	การวิเคราะห์การถดถอยของร้อยละผลได้ของถ่านหิน .....87
ค8	การวิเคราะห์การถดถอยของร้อยละการขจัดกำมะถัน .....88
ค9	การวิเคราะห์การถดถอยของร้อยละการขจัดกำมะถันซัลเฟต .....89
ค10	การวิเคราะห์การถดถอยของร้อยละการขจัดกำมะถันไฟโรต์ .....90
ค11	การวิเคราะห์การถดถอยของร้อยละการขจัดกำมะถันอินทรีย์ .....91
ค12	การวิเคราะห์การถดถอยของร้อยละการขจัดกำมะถันรวม .....92



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1	13
2.2	15
2.3	18
2.4	19
2.5	20
2.6	21
3.1	25
3.2	27
3.3	27
3.4	28
4.1	39
4.2	41
4.3	42
4.4	47
4.5	48
4.6	49
4.7	49
4.8	50

รูปที่	หน้า
4.9 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของร้อยละการขาดก้ำมะถันซัลเฟตเมื่อมีการเปลี่ยนระดับของตัวแปร .....	50
4.10 Normal probability plot ของผลเนื่องจากปัจจัยหลักและปฏิริยาสัมพันธ์ต่างๆ ที่มีต่อร้อยละการขาดก้ำมะถันไฟโรต์ .....	52
4.11 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของร้อยละการขาดก้ำมะถันไฟโรต์เมื่อมีการเปลี่ยนระดับของตัวแปร .....	52
4.12 Normal probability plot ของผลเนื่องจากปัจจัยหลักและปฏิริยาสัมพันธ์ต่างๆ ที่มีต่อร้อยละการขาดก้ำมะถันอินทรีย์ .....	54
4.13 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของร้อยละการขาดก้ำมะถันอินทรีย์เมื่อมีการเปลี่ยนระดับของตัวแปร .....	54
4.14 Normal probability plot ของผลเนื่องจากปัจจัยหลักและปฏิริยาสัมพันธ์ต่างๆ ที่มีต่อร้อยละการขาดก้ำมะถันรวม .....	55
4.15 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของร้อยละการขาดก้ำมะถันรวมเมื่อมีการเปลี่ยนระดับของตัวแปร .....	55

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงที่มีราคาถูก และมีปริมาณสำรองภายในประเทศเป็นจำนวนมาก ประเทศไทยมีการสำรวจพบถ่านหินทุกคุณภาพ ตั้งแต่คุณภาพต่ำสุดคือ ลิกไนต์จนถึงแอนทราไซต์ แต่ที่พบส่วนใหญ่คือถ่านหินลิกไนต์ แหล่งถ่านหินที่พบส่วนใหญ่อยู่ในบริเวณภาคเหนือและมักมีปริมาณ

ถ่านหินในประเทศไทยส่วนใหญ่ใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า

อุตสาหกรรมซีเมนต์ ซึ่งบางส่วนเป็นถ่านหินนำเข้าจากต่างประเทศ การนำถ่านหินมาเผาไหม้เป็นเชื้อเพลิงโดยตรง ก่อให้เกิดปัญหาที่

พิษทางอากาศเนื่องมาจากกำมะถันในถ่านหิน จึงนับเป็นอุปสรรค

ที่ล่า

ประเทศมาใช้เป็นเชื้อเพลิง เพื่อลดการนำเข้าของถ่านหินจากต่างประเทศ จำเป็นต้องปรับปรุงคุณภาพถ่านหินในประเทศให้ดีขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเพื่อลดปัญหาที่

เกิดจากกำมะถันที่ปนเปื้อนในถ่านหิน เทคโนโลยีการขจัดกำมะถันที่สามารถลดการปลดปล่อย แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $\text{SO}_2$ ) ที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในโรงงานอุตสาหกรรมและโรงไฟฟ้า เพราะเป็นวิธีที่มีเทคโนโลยีที่เชื่อถือได้ คือกระบวนการขจัดกำมะถันจากแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้ (flue gas desulfurization, FGD) โดยใช้ปูนขาว (lime) หรือหินปูน (limestone) ดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ วิธีนี้เป็นการขจัดกำมะถันหลังการเผาไหม้ แม้ว่าจะมีประสิทธิภาพดี แต่มี

ปัญหาในด้านการกำจัดของเสียในรูปของแข็งที่มีปริมาณมากและมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสูง

การขจัดกำมะถันในถ่านหินก่อนนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงเป็นวิธีที่น่าสนใจ เนื่องจากจะช่วยลดปัญหาการถูกกัดกร่อนของอุปกรณ์ต่างๆได้เป็นอย่างดี และยังเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ของถ่านหิน มีผู้เสนองานวิจัยที่ทำการศึกษากำมะถันจากถ่านหินก่อนการเผาไหม้ไว้หลายวิธี สำหรับการขจัดกำมะถันจากถ่านหินก่อนการเผาไหม้ด้วยเอทานอล-โปแตสเซียม-ไฮดรอกไซด์เห็นอภิวฤตที่เสนอในงานวิจัยนี้เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ ผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อไปได้ทั้งส่วนที่เป็นแก๊ส ของเหลว และของแข็ง ดังนั้นจึงเป็นการลดต้นทุนในการดำเนินการและลดปัญหาการกำจัดของเสียได้อีกทางหนึ่ง

## 1.1 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาการจัดท่ามะถันจากถ่านหินด้วยเอทานอล-โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์เหนือวิกฤต
2. ศึกษาผลของอุณหภูมิ ความดัน เวลา และโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อการจัดท่ามะถัน

## 1.2 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถปรับปรุงคุณภาพถ่านหินให้ดีขึ้น และได้สมบัติของถ่านหินที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน
2. ลดปัญหาภาวะแวดล้อมเป็นพิษจากการเผาไหม้ถ่านหิน



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### วารสารปริทัศน์

#### 2.1 ถ่านหิน

ถ่านหินเกิดจากการทับถมของซากพืชซากสัตว์ ซึ่งอาจสะสมกันอยู่ชายฝั่งทะเล บริเวณน้ำกร่อย น้ำจืด หรือบนแผ่นดินที่ขึ้นแฉะ ในขณะที่เดียวกันการชะกร่อนของดินตกตะกอนลงทับถมกับซากพืช ทำให้เกิดการเน่าเปื่อยผุพังกลายเป็นถ่านพีต (peat) ซึ่งเป็นใบไม้ใบหญ้าที่เน่าตายเหลือแต่ก้านใบ ในภาคใต้คือพรุ ถ่านพีตนี้เป็นต้นกำเนิดของถ่านหิน ในทางธรณีวิทยาถือว่าถ่านหินเป็นหินตะกอน (sedimentary rocks) ชนิดหนึ่ง ซึ่งแตกต่างจากหินตะกอนชนิดอื่นเนื่องจากประกอบด้วยสารอินทรีย์เป็นส่วนใหญ่ โดยทั่วไปมีสีเข้มตั้งแต่สีน้ำตาลจนถึงสีดำสนิท องค์ประกอบหลักของถ่านหิน ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และมีธาตุต่างๆเป็นสิ่งเจือปน เช่น กำมะถัน ไนโตรเจน เหล็ก แคลเซียม อะลูมิเนียม ซิลิคอน แมงกานีส โบแทสเซียม โซเดียม และไทเทเนียม นอกจากนี้ยังมีธาตุอื่นปนอยู่บ้างขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม และกระบวนการเกิดถ่านหิน (coalification) คาร์บอนเป็นธาตุที่มีมากที่สุดและเป็นโครงสร้างโมเลกุลในถ่านหิน ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการให้พลังงาน

เมื่อนำถ่านหินไปใช้เป็นเชื้อเพลิง ส่วนที่เป็นสารประกอบอินทรีย์จะเกิดการเผาไหม้ให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส ส่วนองค์ประกอบที่เป็นสารประกอบแร่ธาตุจะกลายเป็นของแข็งที่เหลืออยู่หลังการเผาไหม้ ซึ่งหมายถึงเถ้า ที่อุณหภูมิสูงๆสารประกอบของธาตุนางตัวจะสลายตัวเป็นแก๊ส เช่น กำมะถันสลายตัวให้แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $\text{SO}_2$ ) คาร์บอนสลายตัวเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) และเหล็กถูกออกซิไดซ์กลายเป็นออกไซด์ซึ่งเป็นส่วนประกอบในเถ้า

โครงสร้างโมเลกุลของถ่านหินแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนตามสมบัติทางเคมีคือส่วนโครงสร้างอินทรีย์และส่วนที่เป็นสารประกอบแร่ธาตุ (อนินทรีย์)

##### 2.1.1 โครงสร้างอินทรีย์

โครงสร้างอินทรีย์ของถ่านหินประกอบด้วยคาร์บอนประมาณร้อยละ 70-79 ไฮโดรเจนร้อยละ 3-5 ออกซิเจน กำมะถันและไนโตรเจนร้อยละ 1-2 โดยน้ำหนัก เมื่อไม่คิดความชื้น

เมื่อเทียบอัตราส่วนโดยน้ำหนักของอะตอมพบว่าไฮโดรเจนเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในโครงสร้างของถ่านหิน เมื่อศักดิ์ของถ่านหินสูงขึ้นอัตราส่วนโดยน้ำหนักของอะตอมไฮโดรเจนต่อคาร์บอนและออกซิเจนต่อคาร์บอนจะลดลง

การศึกษาสารประกอบอินทรีย์ในโครงสร้างถ่านหินโดยใช้สเปกโทรสโกปีโครมาโทกราฟี (spectroscopy chromatography) หรือวิธีทางเคมีอื่นๆ ยังไม่สามารถสรุปได้ว่าโครงสร้างที่แน่นอนของถ่านหินเป็นอย่างไร นอกจากพอจะทราบได้ว่าสารประกอบอินทรีย์ในโมเลกุลของถ่านหินเป็นสารประกอบประเภทเบนซีน ไฮโคลเฮกเซน ไฮโคลเฮกซาโนน เมทิลลีน ฟีนอล ฟีนอลอีเทอร์ พอลิเมทิลลีน ฟีนันทริน และสารประกอบไฮโดรแอโรแมติก เช่น คาร์บาไซล เบนซาทีโอเฟน และไพรีดีน นอกจากนี้ ยังมีกลุ่มฟังก์ชัน คือ ไฮดรอกซี คาร์บอกซี อะมิโน และไทออล

### 2.1.2 สารประกอบแร่ธาตุ

ส่วนที่เป็นแร่ธาตุของถ่านหินจะพบธาตุซิลิคอนมากที่สุด นอกจากนี้ยังมีอะลูมิเนียม เหล็ก แคลเซียม แมกนีเซียม โซเดียม และโปแตสเซียม ธาตุเหล่านี้รวมตัวกันเป็นสารประกอบหรือรวมกับอะตอมของธาตุอื่นๆ ให้สารประกอบต่างๆ มากมาย ส่วนประกอบแร่ธาตุและส่วนประกอบอินทรีย์อาจอยู่รวมกันผสมกันอย่างหนาแน่นหรือหลวมๆ ถ้าอยู่รวมกันแน่นมาก การแยกเอาแร่ธาตุออกจากส่วนที่เป็นโครงสร้างอินทรีย์โดยวิธีทางกายภาพทำได้ยากมากหรืออาจทำไม่ได้

ในการปรับปรุงคุณภาพถ่านหินมักให้ความสำคัญกับการขจัดกำมะถันซึ่งเป็นสารมลพิษกำมะถันมีรูปแบบต่างๆ มากมาย กระจุกกระจายอยู่ทั้งในส่วนโครงสร้างอินทรีย์และส่วนที่เป็นสารประกอบแร่ธาตุ

## 2.2 การจำแนกถ่านหิน

ถ่านหินกำเนิดขึ้นโดยการสะสมของสารอินทรีย์จำนวนมากในสภาพแวดล้อมที่เหมาะสม และผ่านการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพ โดยมีอิทธิพลจากความร้อนและความดันเป็นเวลาหลายร้อยล้านปี ถ่านหินที่มีอายุมากจะมีศักดิ์ (rank) สูงขึ้น ดังนั้นถ่านหินแต่ละแหล่งซึ่งมีอายุไม่เท่ากันจึงมีสมบัติแตกต่างกันตามถิ่นกำเนิด



นักธรณีวิทยาได้จัดแบ่งถ่านหินโดยคำนึงถึงคุณภาพในการให้พลังงาน ดังนี้

- ก. พีต (peat) ประกอบด้วยซากพืชซึ่งสลายตัวไปบางส่วน ยังปรากฏให้เห็นร่องรอยของเนื้อไม้อยู่ มีปริมาณออกซิเจนและน้ำค่อนข้างสูง ให้ค่าความร้อนน้อย เมื่อติดไฟมีควันมาก
- ข. ลิกไนต์ (lignite) หรือถ่านหินสีน้ำตาล (brown coal) เป็นถ่านหินคุณภาพต่ำสุด วิวัฒนาการมาจากพีต มีสีน้ำตาล มีปริมาณออกซิเจนค่อนข้างสูง (อาจถึงร้อยละ 30) ความชื้นสูง (ร้อยละ 30-70) ให้ค่าความร้อนต่ำ ถ่านหินประเภทนี้ไม่สามารถขนส่งเป็นระยะทางไกลหรือกองเก็บไว้นานได้เพราะมีโอกาสเกิดการติดไฟได้เอง (spontaneous combustion)
- ค. ซับบิทูมินัส (sub-bituminous) เป็นถ่านหินที่มีสีดำคล้ายขี้ผึ้ง ให้ค่าความร้อนสูงกว่าลิกไนต์ สามารถนำไปแปรสภาพเป็นเชื้อเพลิงเหลวหรือแก๊สได้
- ง. บิทูมินัส (bituminous) เป็นถ่านหินเนื้อแน่น แข็งและมีสีดำเป็นมันวาว เยิ้มและเกาะตัวเป็นก้อนเมื่อถูกความร้อน (caking) มีเถ้าต่ำ ให้ความร้อนสูง เป็นถ่านหินที่เหมาะสมสำหรับผลิตเป็นถ่านโค้ก นิยมใช้แพร่หลายในอุตสาหกรรม
- จ. แอนทราไซต์ (anthracite) เป็นถ่านหินคุณภาพดีที่สุด มีสีดำเป็นมัน มีความวาวสูง มีความแข็งมาก ปริมาณคาร์บอนสูง ปริมาณความชื้นต่ำ จุดติดไฟยากแต่ให้ค่าความร้อนสูง

นอกจากนี้ยังมีการจำแนกถ่านหินตามศักดิ์ ซึ่งเป็นค่าวัดความสมบูรณ์ของการเปลี่ยนแปลงทางธรณีวิทยาที่กลายเป็นถ่านหิน โดยวิธีมาตรฐาน (ASTM D 388) ได้เป็น 4 ชั้นใหญ่ๆ คือ ลิกไนต์ ซับบิทูมินัส บิทูมินัส และแอนทราไซต์ เรียงจากคุณภาพต่ำถึงสูง โดยพิจารณาจากสมบัติของถ่านหินนั้นๆ ได้แก่ คาร์บอนคงตัว สารระเหย ลักษณะการรวมตัว (agglomerating character) และค่าความร้อน แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การจำแนกถ่านหินตามคักดี (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 (Moist, <sup>B</sup> Mineral-Matter-Free Basis)				Agglomerating Charact
	Equal or Greater Than	Less Than	Greater Than	Equal or Less Than	Btu/lb		Mj/kg <sup>C</sup>		
					Equal or Greater Than	Less Than	Equal or Greater Than	Less Than	
<b>Anthracitic:</b>									
Meta-anthracite	98	...	...	2	...	...	...	...	} nonagglomerating
Anthracite	92	98	2	8	...	...	...	...	
Semianthracite <sup>D</sup>	86	92	8	14	...	...	...	...	
<b>Bituminous:</b>									
Low volatile bituminous coal	78	86	14	22	...	...	...	...	} commonly agglomerating
Medium volatile bituminous coal	69	78	22	31	...	...	...	...	
High volatile A bituminous coal	...	69	31	...	14 000 <sup>E</sup>	...	32.6	...	
High volatile B bituminous coal	...	...	...	...	13 000 <sup>E</sup>	14 000	30.2	32.6	
High volatile C bituminous coal	...	...	...	...	11 500	13 000	26.7	30.2	} agglomerating
					10 500	11 500	24.4	26.7	
<b>Subbituminous:</b>									
Subbituminous A coal	...	...	...	...	10 500	11 500	24.4	26.7	} nonagglomerating
Subbituminous B coal	...	...	...	...	9 500	10 500	22.1	24.4	
Subbituminous C coal	...	...	...	...	8 300	9 500	19.3	22.1	
<b>Lignite:</b>									
Lignite A	...	...	...	...	6 300 <sup>F</sup>	8 300	14.7	19.3	} nonagglomerating
Lignite B	...	...	...	...	...	6 300	...	14.7	

<sup>A</sup> This classification does not apply to certain coals, as discussed in Section 1.

<sup>B</sup> Moist refers to coal containing its natural inherent moisture but not including visible water on the surface of the coal.

<sup>C</sup> Megajoules per kilogram. To convert British thermal units per pound to megajoules per kilogram, multiply by 0.002326.

<sup>D</sup> If agglomerating, classify in low-volatile group of the bituminous class.

<sup>E</sup> 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.

<sup>F</sup> It is recognized that there may be nonagglomerating varieties in these groups of the bituminous class, and that there are notable exceptions in the high volatile C bituminous group.

<sup>†</sup> Editorially corrected.

### 2.3 การวิเคราะห์ถ่านหิน

การวิเคราะห์ถ่านหินมีประโยชน์เพื่อนำไปใช้ในกรณีต่างๆดังนี้

- ก. การจำแนกถ่านหิน
- ข. การกำหนดราคาถ่านหินตามคุณภาพ
- ค. การควบคุมคุณภาพถ่านหิน
- ง. การเลือกใช้หรือออกแบบอุปกรณ์การเผาไหม้
- จ. การคำนวณปริมาณ เช่น ปริมาณถ่านหินและปริมาณอากาศที่ต้องใช้ในการเผาไหม้ เป็นต้น

การวิเคราะห์ถ่านหินในห้องปฏิบัติการแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่ม คือ

2.3.1 การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) เป็นการวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการตรวจสอบผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นหลังจากให้ความร้อนถ่านหินภายใต้ภาวะที่กำหนด องค์ประกอบส่วนใหญ่ของถ่านหินที่วิเคราะห์ได้คือ

#### 2.3.1.1 ความชื้น (moisture)

พบว่าถ่านหินที่มีอายุน้อยที่สุดจะมีความชื้นอยู่มาก เมื่ออายุมากขึ้น แร่ดินต่างๆ บนผิวโลกที่กดทับลงบนแนวถ่านหินและความร้อนทำให้ความชื้นลดลง ความชื้นในถ่านหินมี 2 รูปคือ

- ก. ความชื้นที่ติดแน่นอยู่ในเนื้อถ่านหิน (inherent moisture) เกิดจากสมบัติของถ่านหิน การดูดความชื้นเข้าไปในเนื้อถ่านหินเป็นปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับอายุของถ่านหิน อุณหภูมิและความชื้น ณ แหล่งกำเนิด
- ข. ความชื้นอิสระ (free or accidental moisture) เป็นความชื้นที่ถ่านหินดูดไว้ที่ผิว ซึ่งจะสูญเสียไปเมื่อทิ้งไว้ในอากาศ

ความชื้นมีผลต่อถ่านหินในแง่ต่างๆ คือ ทำให้ถ่านหินมีน้ำหนักมากขึ้น ล้นเปลืองค่าขนส่ง เมื่อนำถ่านหินมาเผาไหม้ความชื้นจะระเหยกลายเป็นไอน้ำโดยดึงความร้อนให้สูญเสียไปกับแก๊สผลผลิตจากการเผาไหม้ (flue gas) ในรูปของความร้อนที่ทำให้อุณหภูมิเพิ่ม (sensible heat) และความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (latent heat) แต่มีข้อดีคือเมื่อความชื้นระเหยไปเนื้อถ่านหินจะมีความพรุน ทำให้อากาศแทรกผ่านเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ดี

#### 2.3.1.2 เถ้า (ash)

คือส่วนที่เหลือของสารอนินทรีย์หลังจากการเผาไหม้ สารอนินทรีย์ในถ่านหินแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

- ก. สารอนินทรีย์ซึ่งเป็นองค์ประกอบของสิ่งมีชีวิตที่กลายเป็นถ่านหิน ได้แก่แร่ธาตุที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืชถูกทับถมพร้อมกับซากอินทรีย์และปรากฏเป็นองค์ประกอบในถ่านหินด้วย เช่น ออกไซด์ของโปแตสเซียม โซเดียม แมกนีเซียม แคลเซียม และซิลิคอน เป็นต้น

ข. สารอนินทรีย์ที่ทับถมลงบนแนวของถ่านหินขณะที่กำลังเกิดการสะสมตัวได้แก่ ยิปซัม กำมะถันไพไรต์ หินดินดาน และดิน เป็นต้น

โดยทั่วไปพบว่าสารอนินทรีย์มากกว่าร้อยละ 95 ประกอบด้วยแร่ 3 ชนิด คือ คาโอลิไนต์ (kaolinite) แคลไซต์ (calcite) และกำมะถันไพไรต์ (pyrite) ในถ่านหินมากกว่าร้อยละ 95 ประกอบด้วย ซิลิคอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) อะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) เฟอริกออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่เหลืออีกร้อยละ 5 เป็นแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) โซเดียมออกไซด์ ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) โพแทสเซียมออกไซด์ ( $\text{K}_2\text{O}$ ) และไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ )

ถ่านหินเมื่อถูกเผาไหม้จะปล่อยสารระเหยออกมา ทำให้เกิดรูพรุนขึ้นรอบๆ อนุภาคถ่านหิน แก๊สที่เหลืออยู่ในอนุภาคซึ่งเป็นอนินทรีย์สารพวก เหล็ก แมกนีเซียม โซเดียม และซัลเฟอร์ออกไซด์ของซิลิคอนไดออกไซด์ ไม่สามารถดันออกมาได้ง่าย ภายในอนุภาคถ่านหินจึงเกิดรูพรุนขึ้นภายใน โขของสารอนินทรีย์ดังกล่าวจะทำให้อนุภาคถ่านหินแตกออกเป็นชิ้นเล็กๆ ปล่อยโขของสารต่างๆออกมา อนุภาคที่แตกออกจะมีขนาดต่างๆกันตั้งแต่ 0.1-50 ไมโครเมตร เรียกอนุภาคเหล่านี้ว่าเถ้า ซึ่งบางส่วนจะเกาะบนผิวหน้าของส่วนถ่ายโอนความร้อน และบางส่วนออกสู่อากาศ

### 2.3.1.3 สารระเหย (volatile matter)

คือส่วนที่สลายตัวจากถ่านหินเมื่อได้รับความร้อนในที่ที่ไม่มีอากาศอยู่ในช่วงเวลาและอุณหภูมิที่กำหนด องค์ประกอบของถ่านหินที่สลายตัวง่ายจะระเหยออกมาแล้วสลายตัวเป็น 3 องค์ประกอบที่สำคัญ คือ แก๊ส น้ำมันทาร์ และของเหลวแอมโมเนีย (ammonia liquor) ละลายอยู่ในน้ำจากการแตกตัวของโมเลกุลที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบซึ่งไม่ใช่ความชื้นอิสระ

สารระเหยมีความสำคัญมากในการวิเคราะห์ถ่านหิน เพราะส่วนประกอบของสารระเหยแตกต่างกันไปตามศักดิ์ของถ่านหิน โดยปริมาณจะลดลงเมื่อถ่านหินมีศักดิ์สูงขึ้น

### 2.3.1.4 คาร์บอนคงตัว (fixed carbon)

เป็นของแข็งที่เป็นคาร์บอนส่วนใหญ่ที่เหลืออยู่ในถ่านหิน ได้จากร้อยละที่เหลือจากการวิเคราะห์แบบประมาณ เมื่อหักค่าความชื้น สารระเหย และเถ้า ดังสมการ

$$\text{คาร์บอนคงตัว} = 100 - (\text{ความชื้น} + \text{สารระเหย} + \text{เถ้า})$$

ดังนั้นถ่านหินที่มีศักดิ์สูงจะมีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงด้วย

2.3.2 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) เป็นการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุแต่ละตัวที่รวมกันอยู่ในโครงสร้างถ่านหิน ธาตุเหล่านี้ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน กำมะถัน ไนโตรเจน และออกซิเจนรวมทั้งการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุที่มีอยู่ในถ่านหินด้วย

2.3.3 การทดสอบเพิ่มเติม (additional tests) เป็นการทดสอบเพื่อนำมาเป็นข้อมูลสนับสนุนในการตรวจสอบถ่านหิน เช่น การหาค่าความร้อน ค่าความถ่วงจำเพาะ ค่าความสามารถในการเผาไหม้ ปริมาณและรูปแบบของกำมะถัน เป็นต้น

## 2.4 กำมะถันในถ่านหิน (Lowry, 1963)

กำมะถันเป็นธาตุในถ่านหินที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนอุปกรณ์เผาไหม้และก่อให้เกิดมลพิษภายหลังการเผาไหม้ถ่านหิน ปริมาณกำมะถันที่มีอยู่ในถ่านหินอาจพบตั้งแต่ร้อยละ 0.1 ถึงมากกว่าร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก กำมะถันในถ่านหินแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

### 2.4.1 กำมะถันอนินทรีย์ (Inorganic sulfur) แบ่งเป็น 2 รูปแบบ คือ

#### 2.4.1.1 กำมะถันไพไรต์ (pyritic sulfur)

เกิดจากกำมะถันอนินทรีย์ที่เกิดการสลายตัวเนื่องจากกระบวนการเกิดถ่านหินแล้วทำปฏิกิริยากับสารละลายที่มีเหล็กหรือทองแดงเป็นองค์ประกอบ ตกผลึกในช่องว่างหรือรอยแตกในชั้นถ่านหิน พบในลักษณะของสารประกอบโลหะซัลไฟด์คือ กำมะถันไพไรต์และมาร์คาไซต์ (marcasite) ซึ่งมีสูตรโมเลกุลเหมือนกันคือ  $FeS_2$  แต่มีโครงสร้างผลึกและสมบัติทางกายภาพแตกต่างกัน โดยไพไรต์มีโครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์ (cubic) มีความถ่วงจำเพาะประมาณ 5 ส่วนมาร์คาไซต์มีโครงสร้างแบบ ромบิก (rhombic) มีความถ่วงจำเพาะประมาณ 4.87 เมื่อเทียบกับถ่านหินซึ่งมีความถ่วงจำเพาะอยู่ระหว่าง 1.3-1.8 จากความถ่วงจำเพาะที่ต่างกันนี้ทำให้สามารถแยกกำมะถันไพไรต์บางส่วนออกจากถ่านหินได้โดยวิธีทางกายภาพ ส่วนใหญ่กำมะถันไพไรต์ในถ่านหินประกอบด้วยไพไรต์ นอกจากนี้ยังอาจพบสารประกอบซัลไฟด์ในรูปอื่นเช่น สฟาเลอไรต์ (sphalerite,  $ZnS$ ) กาลีนา (galena,  $PbS$ ) คาลโคไพไรต์ (chalcopyrite,  $CuFeS_2$ ) ไพโรไทต์ (pyrhotite,  $Fe_{1-x}S$ ) อะซีนไพไรต์ (arsenopyrite,  $FeAsS$ ) และอื่นๆในปริมาณเล็กน้อย

ขนาดของไพไรต์ในถ่านหินปรากฏอยู่ในหลายรูปแบบ คือ เอพิเจเนติก (epigenetic) ขนาดใหญ่กว่า 50 ไมโครเมตร ซินเจเนติก (syngenetic) เป็นผลึกที่มีขนาด 5-50 ไมโครเมตรและเป็นผลึกที่มีขนาดเล็กกว่า 5 ไมโครเมตร สามารถแบ่งลักษณะไพไรต์ที่พบได้เป็น

#### 1. Authogenic primary deposit pyrites

เป็นไพไรต์ที่แทรกอยู่ในเนื้อถ่านหิน โดยทั่วไปมี 2 รูปแบบ คือ

- framboidal pyrite เป็นเม็ดกลมเล็กๆ เส้นผ่านศูนย์กลาง 10-40 ไมโครเมตร อาจพบกระจายอยู่ทั่วไปหรือเกาะเป็นกลุ่ม
- เป็นไพไรต์ที่เข้าไปแทนที่ส่วนที่เป็นเนื้อไม้และเปลือกไม้ของพืช ทำให้เห็นเป็นรูปร่างของพืชนั้น

ไพไรต์ทั้งสองแบบแทรกอยู่ในเนื้อไม้ทั่วไปไม่สามารถแยกหรือกำจัดออกจากถ่านหินโดยวิธีทางกายภาพ

#### 2. Authogenic secondary deposit pyrites

เป็นไพไรต์ที่เกิดขึ้นภายหลังกระบวนการเกิดถ่านหิน พบแทรกอยู่ตามแนวแตกของถ่านหิน ประกอบด้วยผลึกเล็กๆ อาจเกาะกันเป็นแผ่นหรือถ้ำรอยแตกนั้นใหญ่อาจเกาะกันเป็นก้อนใหญ่ ไพไรต์ชนิดนี้สามารถแยกออกจากถ่านหินได้ง่ายโดยวิธีทางกายภาพเพราะไม่รวมอยู่ในเนื้อถ่านหิน

##### 2.4.1.2 กำมะถันซัลเฟต (sulfate sulfur)

พบในลักษณะของโลหะซัลเฟต เช่น แอนไฮไดรต์ ( $\text{CaSO}_4$ ) ยิปซัม ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) แบไรต์ ( $\text{BaSO}_4$ ) สารประกอบซัลเฟตของเหล็ก ( $\text{FeSO}_4$ ) สารประกอบซัลเฟตของทองแดง ( $\text{CuSO}_4$ ) สารประกอบซัลเฟตของแมกนีเซียม ( $\text{MgSO}_4$ ) โดยปกติจะพบกำมะถันซัลเฟตในถ่านหินน้อยเมื่อเทียบกับกำมะถันไพไรต์และกำมะถันอินทรีย์

## 2.4.2 กำมะถันอินทรีย์ (Organic sulfur) (Garcia-Labiano et al.,1995)

กำมะถันอินทรีย์กระจายอยู่ทั่วไปในถ่านหินประมาณร้อยละ 30-70 ของปริมาณกำมะถันรวมในถ่านหิน เป็นโครงสร้างพันธะเคมีหลายรูปแบบที่ซับซ้อน Garcia-Labiano และคณะ (1995) เสนอว่ากำมะถันอินทรีย์ที่พบในถ่านหินอาจประกอบด้วยวงแหวนแอโรแมติกหรือหมู่ฟังก์ชันอะลิฟาติก (aliphatic) โดยทั่วไปแบ่งได้เป็นเมอร์แคปแทน (mercaptans, R-SH) อะลิฟาติกและเอริลซัลไฟด์ (aliphatic and aryl sulfides, R-S-R') ไดซัลไฟด์ (disulfides, R-S-S-R') และไทโอเฟน (thiophenes) ซึ่งเป็นสารประกอบแอโรแมติกที่มีกำมะถันเป็นส่วนหนึ่งของวงแหวน ประมาณร้อยละ 40-70 ของกำมะถันอินทรีย์ในถ่านหินมีโครงสร้างเป็นไทโอเฟนและอนุพันธ์ของไทโอเฟน กระบวนการเกิดถ่านหินอาจเป็นสาเหตุทำให้กำมะถันอินทรีย์เปลี่ยนรูปจากเมอร์แคปแทนเป็นอะลิฟาติกและเอริลซัลไฟด์และไทโอเฟนในที่สุด

กำมะถันอินทรีย์ซึ่งประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันอะลิฟาติกมีโครงสร้างไม่เสถียรมากนักจึงสลายเป็นแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ง่าย ส่วนวงแหวนแอโรแมติกมีเสถียรภาพมากกว่า เนื่องจากกำมะถันมีเรโซแนนซ์ (resonance) ในวงแหวนทำให้พันธะคาร์บอนและกำมะถันที่จับกันเสถียรมากขึ้นจึงไม่สามารถใช้วิธีทางกายภาพขจัดได้ ต้องใช้วิธีทางเคมีเพื่อทำลายพันธะเคมีระหว่างกำมะถันและคาร์บอน ปฏิกริยาที่เหมาะสมในการขจัดกำมะถันไพไรต์ใช้ไม่ได้กับกำมะถันอินทรีย์เพราะกำมะถันอินทรีย์มีโครงสร้างเสถียรมากและไม่ว่องไวในการเกิดปฏิกริยาเท่ากับกำมะถันไพไรต์

การวิเคราะห์ปริมาณกำมะถันอินทรีย์ไม่สามารถวิเคราะห์ได้โดยตรงเนื่องจากมีโครงสร้างที่ซับซ้อน ดังนั้นจึงใช้วิธีคำนวณจากปริมาณกำมะถันรวมหักออกด้วยปริมาณกำมะถันไพไรต์และกำมะถันซัลเฟต ดังสมการ

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

## 2.5 การขจัดกำมะถันในถ่านหิน

การขจัดกำมะถันในถ่านหินเป็นส่วนสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในการนำถ่านหินมาใช้งาน วิธีการขจัดกำมะถันในถ่านหินแบ่งตามช่วงเวลาของการขจัดดังนี้ คือ

### ก. การขจัดกำมะถันก่อนการเผาไหม้

เป็นการลดปริมาณกำมะถันในถ่านหินก่อนนำถ่านหินไปเป็นเชื้อเพลิง อาจใช้วิธีทางกายภาพ เคมี หรือชีวภาพ นอกจากนี้ยังมีกระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) ทำให้ถ่านหินสลายตัวเป็นถ่านชาร์ กระบวนการทำให้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงแก๊ส (gasification) หรือเชื้อเพลิงเหลว (liquefaction)

### ข. การขจัดกำมะถันระหว่างการเผาไหม้

เป็นการเติมสารบางชนิดลงไประหว่างการเผาไหม้ เพื่อรวมตัวกับกำมะถันที่สลายตัวจากการเผาไหม้เกิดเป็นสารประกอบที่สามารถแยกออกได้ เช่น การเติมปูนขาว (lime, CaO) หรือหินปูน (limestone, CaCO<sub>3</sub>) เมื่อเผาไหม้แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะถูกขจัดโดยเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของสารประกอบแคลเซียมซัลเฟต (CaSO<sub>4</sub>) ซึ่งสามารถขจัดออกได้ง่ายโดยใช้เครื่องกำจัดฝุ่นไฟฟ้าสถิต (electrostatic precipitator) หรือถุงกรอง (filter bag)

### ค. การขจัดกำมะถันหลังการเผาไหม้

เป็นการใช้สารเคมี เช่น ปูนขาวหรือหินปูนดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ออกมาพร้อมกับแก๊สผลผลิตจากการเผาไหม้ (FGD, flue gas desulfurization) วิธีการนี้มีประสิทธิภาพในการขจัดกำมะถันสูงมาก แต่มีค่าใช้จ่ายในการลงทุนและดำเนินการสูงมากเช่นกัน นอกจากนี้ยังมีปัญหาในการจัดการกับของเสียในรูปของแข็งที่เกิดขึ้น

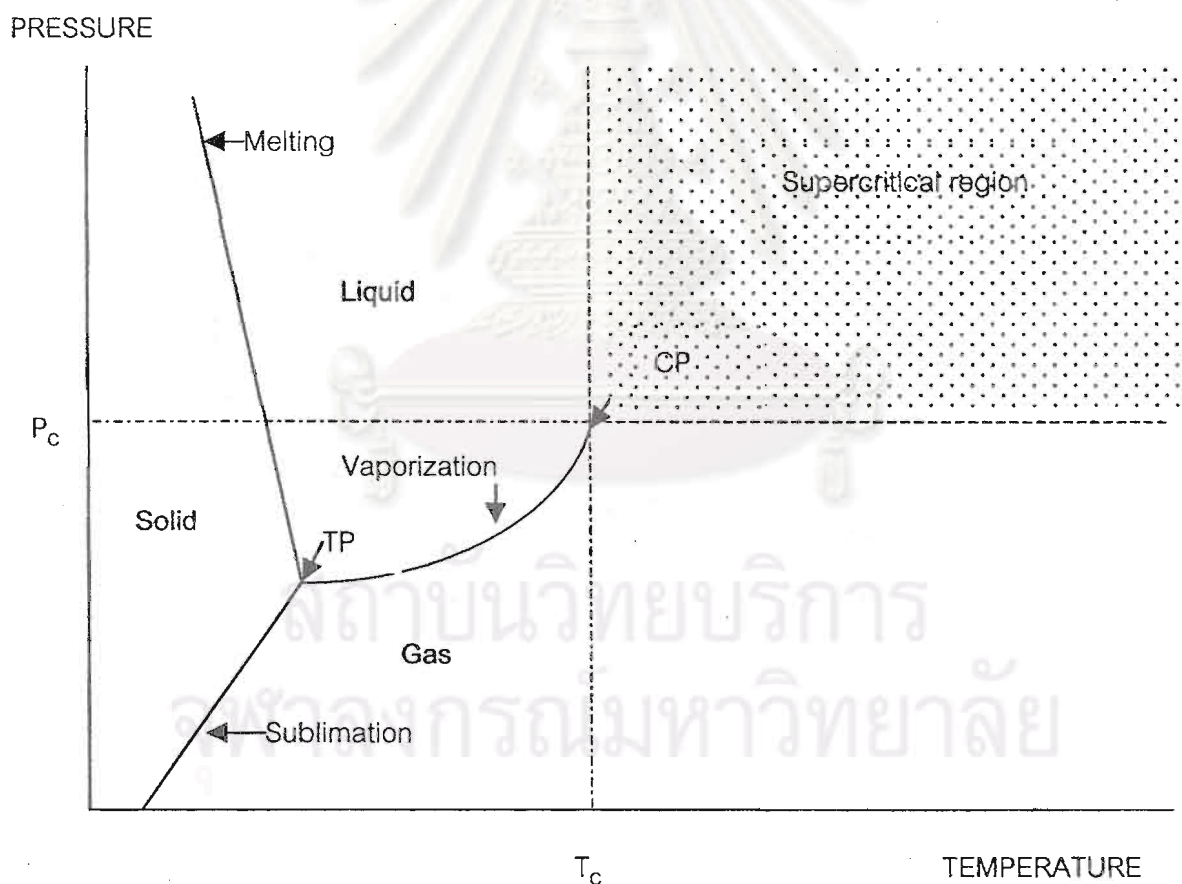
## 2.6 ของไหลเหนือวิกฤต (Lugue de Castro et al., 1994)

ของไหลเหนือวิกฤต (Supercritical fluids) หมายถึง สารใดๆ ในภาวะซึ่งจำแนกไม่ได้ว่าเป็นแก๊สหรือของเหลว ภาวะเช่นนี้สามารถอธิบายได้จากแผนภูมิวัฏภาค (pressure-temperature phase diagram) ของสารบริสุทธิ์ใดๆ ในรูปที่ 2.1 แสดงบริเวณที่สารอยู่ในสถานะของแข็ง ของเหลว และแก๊ส โดยมีเส้นสมดุการระเหิด (sublimation line) อยู่ระหว่างบริเวณที่สารอยู่ในสถานะของแข็งกับแก๊ส เส้นสมดุการหลอมเหลว (fusion line) อยู่ระหว่างของแข็งกับของเหลว และเส้น



สมดุลการระเหย (vapor pressure line or boiling line) อยู่ระหว่างแก๊สกับของเหลว จุดที่อยู่ระหว่าง 3 สถานะเรียกว่า จุดร่วมสาม (triple point)

แก๊สสามารถเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวได้ 2 วิธี ได้แก่การเพิ่มความดันหรือลดอุณหภูมิ เพื่อลดพลังงานจลน์ (kinetic energy) ทำให้ระยะทางระหว่างโมเลกุลลดลง เกิดแรงดึงดูดระหว่างกันและควบแน่นเป็นของเหลว แต่ที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดหนึ่งโมเลกุลของแก๊สจะมีพลังงานจลน์มากจนการเพิ่มความดันไม่สามารถทำให้ควบแน่นเป็นของเหลวได้ อุณหภูมิสูงสุดที่แก๊สยังสามารถควบแน่นเป็นของเหลวได้เรียกว่าอุณหภูมิวิกฤต (critical temperature,  $T_c$ ) และความดันที่จุดนี้เรียกว่าความดันวิกฤต (critical pressure,  $P_c$ ) จุดที่มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิวิกฤต และความดันเท่ากับความดันวิกฤต เรียกว่า จุดวิกฤต (critical point, CP)



รูปที่ 2.1 แผนภูมิวิภาคของสารบริสุทธิ์; TP = triple point, CP = critical point,  $P_c$  = critical pressure,  $T_c$  = critical temperature (Lugue de Castro et al., 1994)

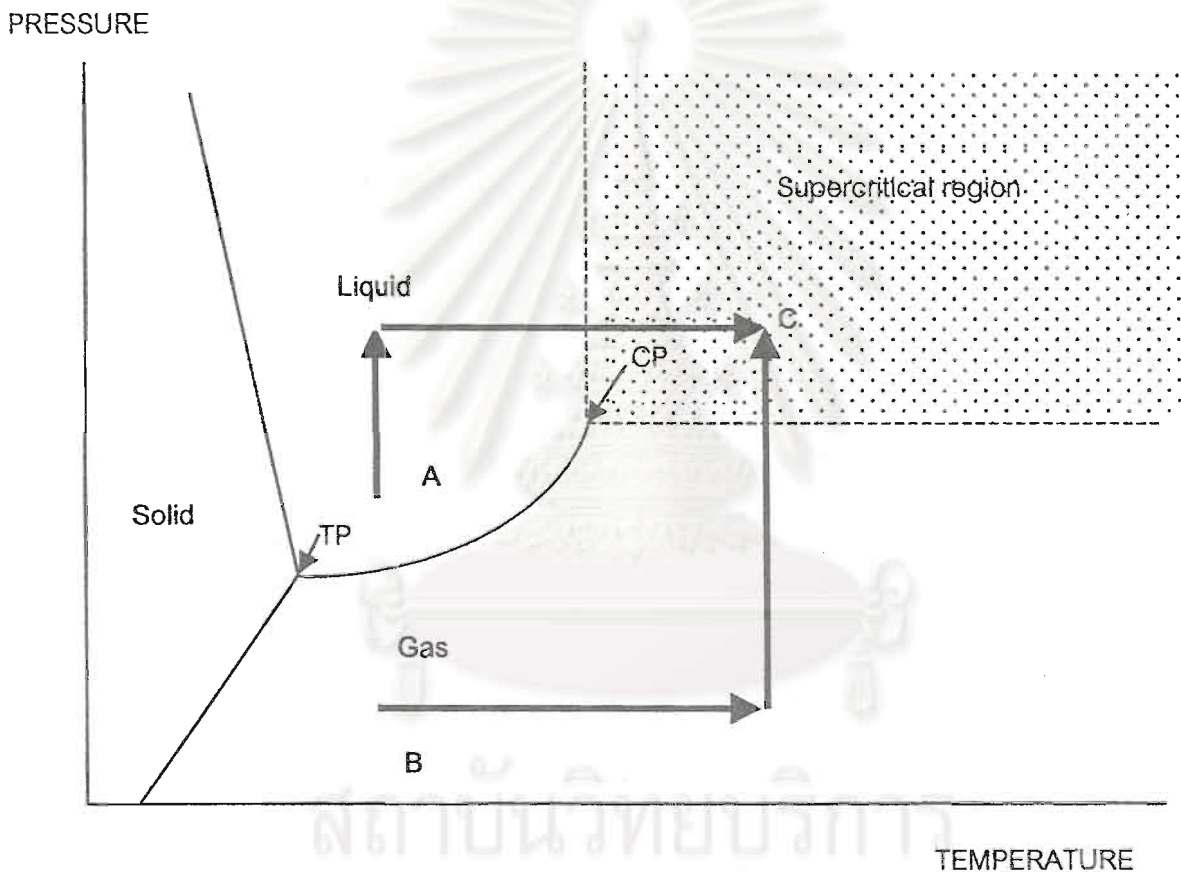
ที่อุณหภูมิมากกว่าอุณหภูมิวิกฤต และความดันมากกว่าความดันวิกฤต สารจะอยู่ในสถานะที่ไม่สามารถจำแนกสมบัติได้ว่าเป็นแก๊สหรือของเหลว สารที่อยู่ในภาชนะนี้เรียกว่าของไหลเหนือวิกฤต ตัวอย่างอุณหภูมิวิกฤตและความดันวิกฤตของสารบางชนิดแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงสมบัติวิกฤตของสารบางชนิด (อุทัย ไสธนะพันธ์ และ รพีพล ภโวภาว, 2536)

Substance	Critical temperature (K)	Critical pressure (MPa)	Critical density (g.cm <sup>-3</sup> )
Methane	190.60	4.60	0.16
Ethylene	282.40	5.03	0.22
Chlorotrifluoromethane	302.00	3.92	0.58
Carbon dioxide	304.20	7.38	0.47
Ethane	305.40	4.88	0.20
Propylene	365.00	4.62	0.23
Propane	369.80	4.24	0.22
Ammonia	405.60	11.30	0.24
Diethyl ether	467.70	3.64	0.27
n-Pentane	469.60	3.37	0.24
Acetone	508.10	4.70	0.28
Methanol	512.60	8.09	0.27
Ethanol	516.10	6.38	0.17
Benzene	562.10	4.89	0.30
Toluene	591.70	4.11	0.29
Pyridine	620.00	5.63	0.31
Water	647.30	8.00	0.32

ของไหลเหนือวิกฤตเกิดขึ้นได้ 2 วิธีตามรูปที่ 2.2 คือ

1. สารเริ่มต้นอยู่ในสถานะของเหลว (จุด A) เพิ่มความดันจนเหนือความดันวิกฤต แล้วจึงเพิ่มอุณหภูมิจนเหนืออุณหภูมิวิกฤต หรือ
2. สารเริ่มต้นอยู่ในสถานะแก๊ส (จุด B) เพิ่มอุณหภูมิจนเหนืออุณหภูมิวิกฤต แล้วเพิ่มความดันจนเหนือความดันวิกฤต



รูปที่ 2.2 วิธีการทำให้สารอยู่ในภาวะเหนือวิกฤต (จุด C) จากสถานะของเหลว (จุด A) และจากสถานะแก๊ส (จุด B) (Lugue de Castro et al., 1994)

ของไหลเหนือวิกฤตจะมีสมบัติทางเคมีฟิสิกส์อยู่ระหว่างแก๊สกับของเหลว ดังแสดงในตารางที่ 2.3 ความหนาแน่นของของไหลเหนือวิกฤตมีค่าใกล้เคียงกับของเหลว เมื่อนำมาใช้เป็นตัวทำละลายโมเลกุลของสารที่ต้องการละลายจะถูกล้อมรอบด้วยโมเลกุลของของไหลเหนือวิกฤต

เกิดปฏิกิริยาต่อกัน (interaction) ลดพลังงานเอนทาลปี (enthalpy) ทำให้เกิดการละลายได้ดี และ  
 ขณะเดียวกันของไหลเหนือวิกฤตก็มีความหนืด (viscosity) และสภาพแพร่ (diffusivity) ใกล้เคียง  
 แก๊ส ทำให้สามารถแทรกซึมเข้าไปในตัวถูกละลายได้ดี ด้วยสมบัติเหล่านี้จึงนำของไหลเหนือวิกฤต  
 มาใช้เป็นตัวทำละลายซึ่งมีข้อดีเหนือตัวทำละลายที่เป็นของเหลวคือ มีอัตราของการถ่ายโอนมวล  
 เร็วกว่าและมีความสามารถในการทำละลาย (solvent power) ที่ดีกว่า

ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ระหว่างของไหลเหนือวิกฤตกับแก๊ส และของเหลว

State of Fluid	Density (g.cm <sup>-3</sup> )	Diffusivity (cm <sup>2</sup> .sec <sup>-1</sup> )	Viscosity (g.cm <sup>-1</sup> .sec <sup>-1</sup> )
Gas P = 1 atm, T = 15-30 °C	(0.6-2) × 10 <sup>-3</sup>	0.1-0.4	(1-3) × 10 <sup>-4</sup>
Liquid P = 1 atm, T = 15-30 °C	0.6-1.6	(0.2-2) × 10 <sup>-5</sup>	(0.2-3) × 10 <sup>-2</sup>
Supercritical fluid P = P <sub>c</sub> , T = T <sub>c</sub>	0.2-0.5	0.7 × 10 <sup>-3</sup>	(1-3) × 10 <sup>-4</sup>
P = 4P <sub>c</sub> , T = T <sub>c</sub>	0.4-0.9	0.2 × 10 <sup>-3</sup>	(3-9) × 10 <sup>-4</sup>

การใช้ประโยชน์จากของไหลเหนือวิกฤตเริ่มต้นในราวทศวรรษ 1930 ซึ่งในระยะแรกจะ  
 มุ่งเน้นที่การนำมาใช้เป็นตัวทำละลายในงานสกัด (supercritical fluid extraction, SFE)  
 โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมและอุตสาหกรรมอาหาร และถูกนำมาใช้เป็นวัฏภาคเคลื่อน  
 ที่ (mobile phase) ในงานวิเคราะห์ (supercritical fluid chromatography, SFC) ครั้งแรกในปี  
 1962

## 2.7 สมบัติของของไหลเหนือวิกฤต

### 2.7.1 สมบัติการถ่ายโอน (Transportation property)

ลักษณะที่สำคัญของของไหลเหนือวิกฤตแสดงในรูปที่ 2.3 จากการที่ของไหลเหนือวิกฤตมีความหนืดต่ำ และสัมประสิทธิ์การแพร่สูง ทำให้สามารถกระจายตัวได้อย่างทั่วถึง สามารถแทรกซึม (penetrate) เข้าไปถึงตัวถูกละลายได้ดีและทำให้ตัวถูกละลายที่ละลายเข้าไปในของไหลเหนือวิกฤตกระจายออกจากบริเวณที่เกิดการสกัด (extraction zone) ไปบริเวณอื่นได้ง่าย อัตราการถ่ายโอนมวล (mass transfer rate) ดี ส่งผลให้ของไหลเหนือวิกฤตเป็นตัวทำละลายที่ดี

ความหนืดและสัมประสิทธิ์การแพร่ของของไหลเหนือวิกฤตมีความสัมพันธ์กับปัจจัยหลายประการ เช่น อุณหภูมิ ความดันและชนิดของของไหลเหนือวิกฤต จึงต้องปรับภาวะให้เหมาะสมเพื่อให้สกัดสารที่ต้องการได้ดีที่สุด

### 2.7.2 ความสามารถในการทำละลาย (Solvent power)

เป็นสมบัติเด่นประการหนึ่งของของไหลเหนือวิกฤตที่เหนือกว่าตัวทำละลายที่เป็นของเหลวทั่วไปเนื่องจากสามารถปรับให้มีความเข้มข้นได้ง่ายกว่าโดยการปรับภาวะที่ให้ ภาวะหรือตัวแปรประการแรกคืออุณหภูมิ โดยทั่วไปการเพิ่มอุณหภูมิให้กับตัวทำละลายที่เป็นของเหลวจะทำให้มีการละลายเพิ่มขึ้น แต่ในของไหลเหนือวิกฤตการเพิ่มอุณหภูมิจะก่อให้เกิดผล 2 ประการที่ขัดแย้งกัน คือ

1. เพิ่มการละลายของตัวถูกละลาย
2. ลดความหนาแน่น ทำให้โมเลกุลของของไหลเหนือวิกฤตกับตัวถูกละลายอยู่

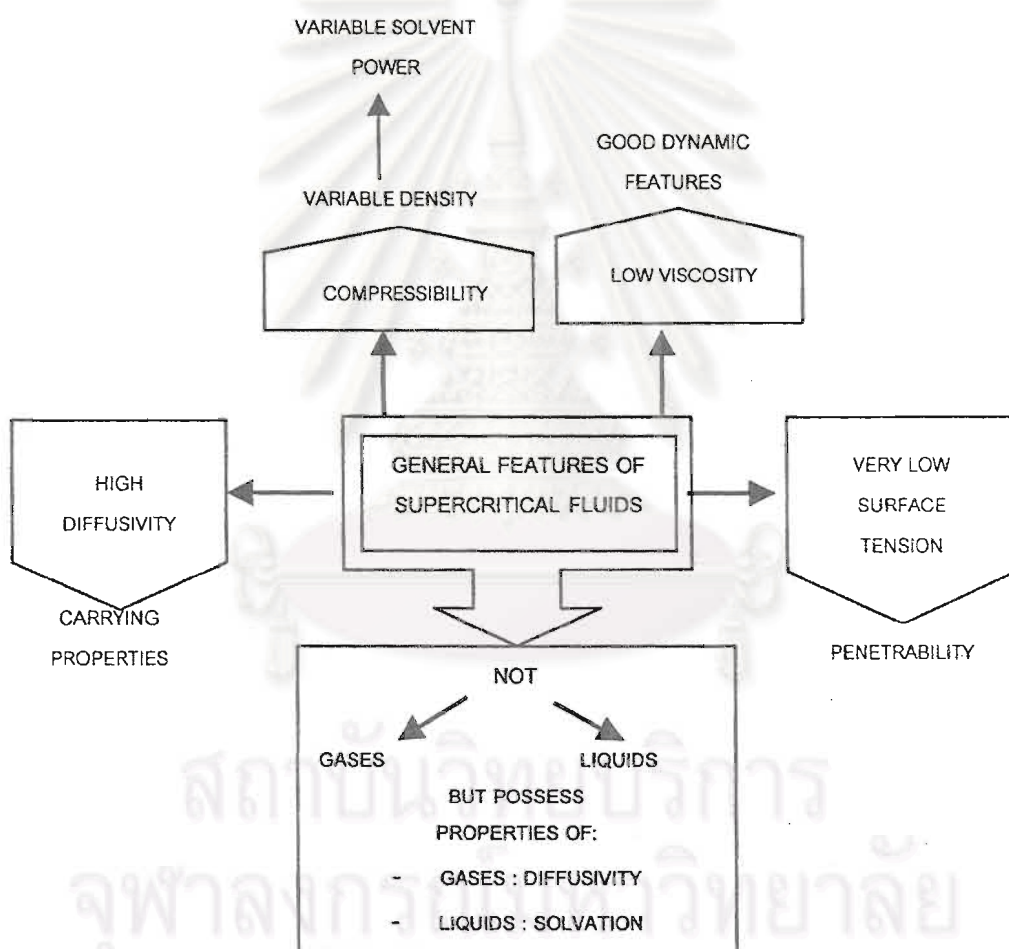
ห่างกัน การละลายของตัวถูกละลายจึงลดลง

ผลรวมของผลที่ขัดแย้งกัน 2 ประการนี้คือความสามารถในการทำละลายของของไหลเหนือวิกฤต ข้อขัดแย้งในประการที่ 2 สามารถแก้ไขได้โดยการเพิ่มความดันให้กับของไหลเหนือวิกฤตเพื่อคงสภาพความหนาแน่นให้ใกล้เคียงกับภาวะเดิมก่อนจะมีการเพิ่มอุณหภูมิ กล่าวโดยสรุปคือ ตัวแปรที่มีผลโดยตรงต่อความสามารถในการทำละลาย คือ อุณหภูมิและความหนาแน่น (ความดันจะมีผลทางอ้อมโดยส่งผ่านความหนาแน่น)

ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการทำละลาย อุณหภูมิและความหนาแน่นของของไหลเหนือวิกฤตสามารถแสดงในรูปของสมการของ Chrastil ดังนี้

$$C = d^k \exp(a/(T+b))$$

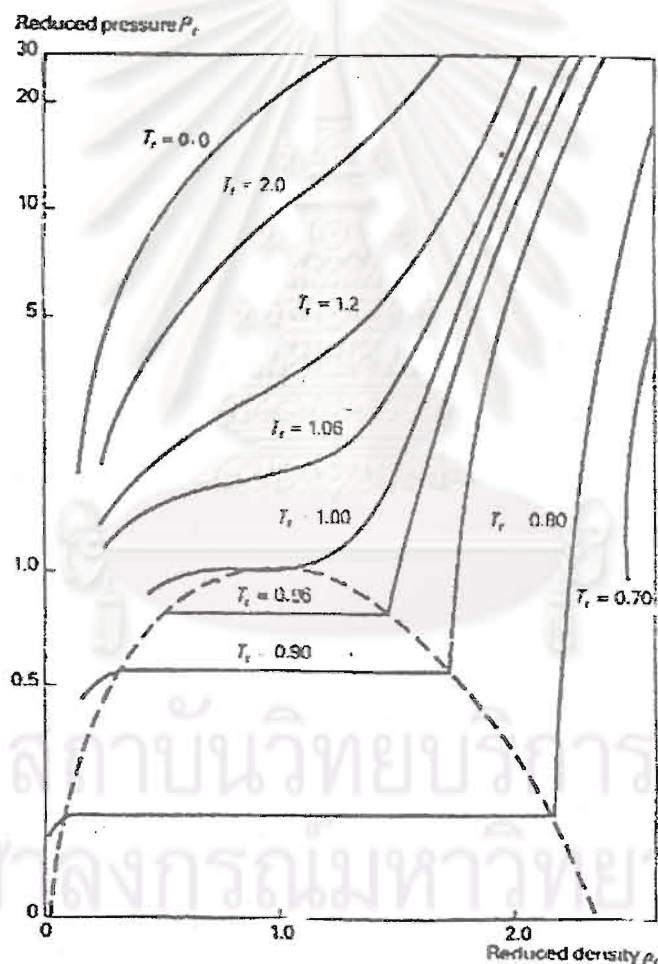
- C = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในของไหลเหนือวิกฤต (กรัม/ลิตร)
- d = ความหนาแน่นของของไหลเหนือวิกฤต (กรัม/ลิตร)
- k = association number ซึ่งแสดงถึง complex formed ระหว่างตัวถูกละลายกับตัวทำละลาย
- T = อุณหภูมิ (เคลวิน)
- a, b = ค่าคงที่



รูปที่ 2.3 ลักษณะสำคัญของของไหลเหนือวิกฤต (Lugue de Castro et al., 1994)

ในปี 1981 D.F. Williams อธิบายสมบัติของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต โดยให้ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ความหนาแน่นและความดัน นำเสนอในรูปของตัวแปรรีดิวซ์

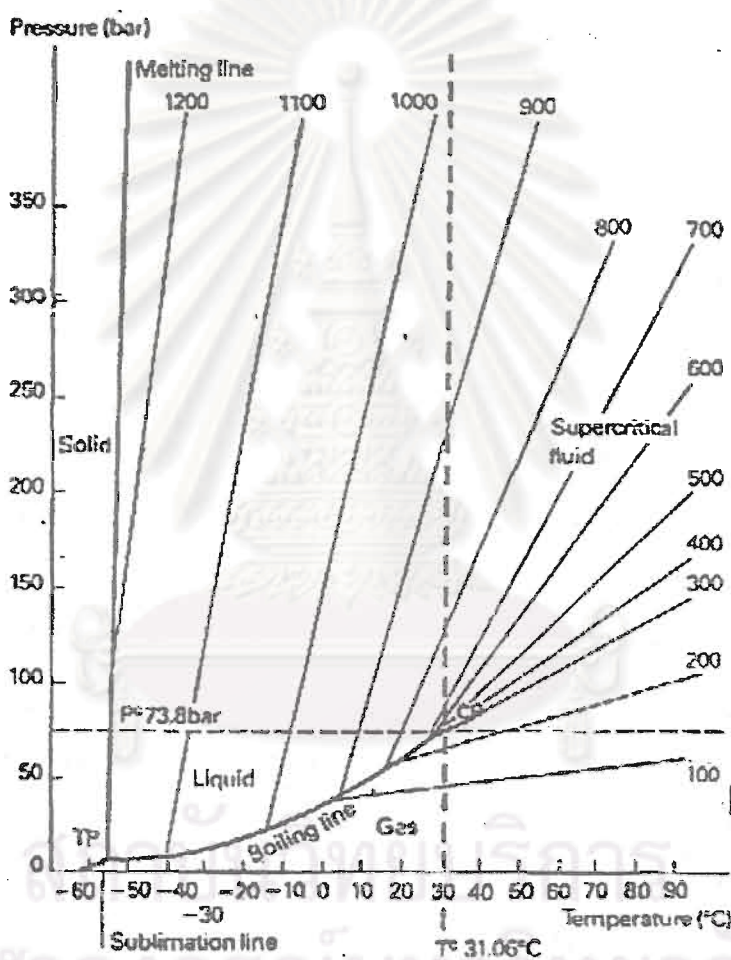
( $T_r = T/T_c$ ,  $P_r = P/P_c$ ) จากรูปที่ 2.4 ในช่วงที่เป็นเส้นโค้งคือบริเวณที่ของเหลวและแก๊สมีความสมดุลกัน (ช่วงที่แก๊สเกิดการควบแน่นเป็นของเหลว) ของไหลเหนือวิกฤตคือบริเวณที่อุณหภูมิวิกฤตและความดันวิกฤตมีค่ามากกว่า 1 ส่วนช่วงอุณหภูมิวิกฤต 0.95-1.0 เรียกว่าของเหลวใกล้จุดวิกฤต (near critical) ที่บริเวณจุดวิกฤต การเปลี่ยนแปลงความดันเพียงเล็กน้อยจะทำให้ความหนาแน่นเปลี่ยนแปลงไปมาก แต่ที่อุณหภูมิสูงๆ (อุณหภูมิวิกฤตมีค่ามาก) กราฟมีลักษณะลาดชัน การเพิ่มความหนาแน่นจำเป็นต้องมีการเปลี่ยนแปลงความดันอย่างมาก ก่อให้เกิดปัญหาด้านเครื่องมือและที่อุณหภูมิสูงๆ ความหนาแน่นจะมีค่าค่อนข้างต่ำจนไม่เหมาะสมที่จะใช้งาน ดังนั้นจึงนิยมใช้ของไหลเหนือวิกฤตในภาวะบริเวณเหนือจุดวิกฤตเล็กน้อยเนื่องจากสามารถเปลี่ยน ความสามารถในการทำละลายโดยการปรับความดันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ความหนาแน่น และความดันในรูปของตัวแปรวิกฤต

(อุทัย ไสธนะพันธ์ และ รพีพล ภาโววาท, 2536)

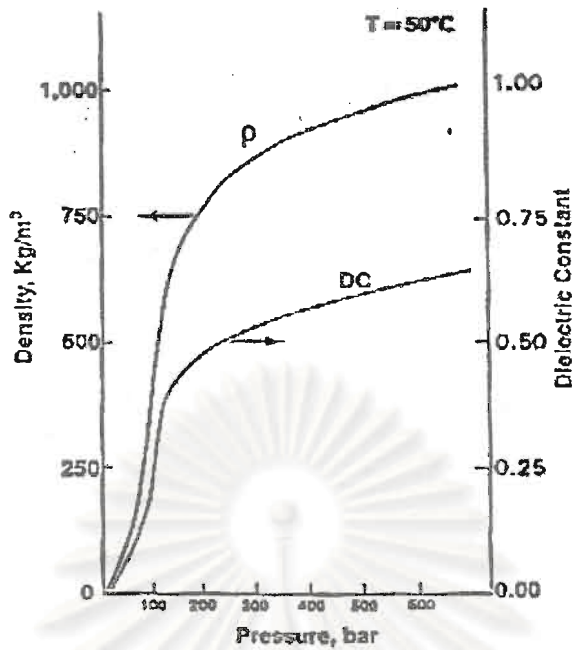
เมื่อนำเส้นความหนาแน่นคงที่มาเขียนลงบนแผนภูมิวัฏภาคจะได้ตามรูปที่ 2.5 ที่ความดันและอุณหภูมิสูงสุด (ตามรูป คือ 400 บาร์, 100 องศาเซลเซียส) คาร์บอนไดออกไซด์จะมีความสามารถในการทำละลายสูงสุด ที่บริเวณจุดวิกฤตแม้จะมีความสามารถในการทำละลายต่ำกว่า แต่ความหนาแน่นมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความดันมาก ที่บริเวณนี้จึงได้รับความสนใจมากกว่า จึงเลือกที่จะทำงานกับของไหลเหนือวิกฤตในบริเวณจุดวิกฤต ซึ่งสามารถปรับความสามารถในการทำละลายด้วยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือความดันเพียงเล็กน้อย



รูปที่ 2.5 ความหนาแน่นคงที่ที่อุณหภูมิและความดันต่างๆของคาร์บอนไดออกไซด์ (อุทัย ไสธนะพันธ์ และ รพีพล ภาโววาท, 2536)

ความสามารถในการปรับเปลี่ยนความสามารถในการทำละลายของของไหลเหนือวิกฤต แสดงให้เห็นได้ชัดเจนในรูปที่ 2.6 เมื่ออุณหภูมิคงที่ที่ 50 องศาเซลเซียส เมื่อเพิ่มความดันที่ให้ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) ของคาร์บอนไดออกไซด์ สามารถเพิ่มขึ้นเทียบความเป็นขั้ว (polarity) ได้ตั้งแต่เพนเทน (pentane) จนถึงอะซิโตน (acetone)





รูปที่ 2.6 ผลของความดันที่มีต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต (Lugue de Castro et al., 1994)

### 1.7.3 สมบัติการเลือกละลาย (Selectivity property)

เป็นสมบัติของของไหลเหนือวิกฤตที่สามารถปรับอุณหภูมิและความดันเพื่อให้ความสามารถในการทำละลายที่เหมาะสมเฉพาะกับสารที่ต้องการสกัดมากที่สุดและมีสารที่ไม่ต้องการปนมาน้อยที่สุด จากการทำงานของไหลเหนือวิกฤตมีสมบัติการเลือกละลายค่อนข้างดีจึงสามารถนำมาใช้ในการสกัดลำดับส่วน (fractionated extraction) ภาวะที่ใช้จะเริ่มต้นจากบริเวณจุดวิกฤตแล้วค่อยๆเพิ่มอุณหภูมิและความดัน ด้วยเทคนิคนี้สามารถสกัดแยกสารออกเป็น ส่วนต่างๆ เช่น การสกัดพริกไทยแยกเป็นส่วนที่ให้รสเผ็ดและส่วนที่ให้กลิ่นหอม การสกัดแยกเป็น 3 ส่วน ส่วนแรกจะมีกลิ่นและมีกรดไขมันอิสระมาก ส่วนที่สองมีกลีเซอไรด์มากซึ่งยังสามารถสกัดให้ละเอียดลงไปเป็นโมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ ส่วนสุดท้ายมีสารพวกไข (waxes) และรงควัตถุ

## 2.8 Modifiers

คือตัวทำละลายลำดับที่สอง (secondary solvent) ซึ่งรวมเป็นเนื้อเดียวกับตัวทำละลายหลักได้อย่างสมบูรณ์ มีผลให้เพิ่มความสามารถในการทำละลายของของไหลเหนือวิกฤตการเติม

Modifiers ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแผนภูมิวิภูภาค การทำนายพฤติกรรมของของไหลเหนือวิกฤตเป็นไปได้ยากเนื่องจากความรู้ด้านนี้ยังมีจำกัดจึงต้องทำการทดลองเป็นเครื่องตัดสินใจ

## 2.9 ประโยชน์ของของไหลเหนือวิกฤต

1. ใช้เป็นตัวทำละลายในการสกัด (Supercritical fluid extraction) ทั้งงานสกัดเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์จำนวนมากๆ และที่ได้รับการพัฒนาค่อนข้างมากคือ งานสกัดในปริมาณน้อยๆ จุดประสงค์เพื่อนำสารที่สกัดได้ไปวิเคราะห์ต่อไป
2. ใช้เป็นวิภูภาคเคลื่อนที่ในงานวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโครมาโทกราฟี (Supercritical fluid chromatography)

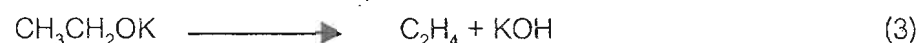
## 2.10 การขจัดกำมะถันด้วยแอลกอฮอล์เหนือวิกฤต (Li and Guo, 1996)

แอลกอฮอล์มีความสามารถในการละลายโมเลกุลอินทรีย์ที่มีขั้ว (polar organic molecule) เพราะแอลกอฮอล์มีพันธะไฮโดรเจนและแรงดึงดูดระหว่างขั้ว นอกจากนี้อาจเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างการสกัดเพราะออกซิเจนของแอลกอฮอล์สามารถให้อิเล็กตรอนได้

โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ช่วยให้การแตกพันธะในโครงสร้างของถ่านหินดีขึ้น เกิดการรีดิวซ์ทำให้พันธะของคาร์บอนกับกำมะถัน (C-S) อ่อนแอและแตกจากกันได้ง่าย แอลกอฮอล์จึงสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาในโครงสร้างถ่านหินดีขึ้น กำมะถันอินทรีย์ถูกเปลี่ยนเป็นสารพวกซัลไฟด์และ/หรือซัลไฟด์ ปฏิกิริยาการขจัดกำมะถันด้วยเอทานอล-โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์แสดงได้ดังสมการต่อไปนี้ (Li and Guo, 1996)



หรือ



## 2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Muchmore, C.B., Kent, A.C. และ Lin T. (1985) ศึกษาผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการขจัดกำมะถันจากถ่านหินที่มีกำมะถันสูงด้วยแอลกอฮอล์เหนือวิกฤต ทั้งในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ เครื่องปฏิกรณ์กึ่งต่อเนื่อง และเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง ผลิตภัณฑ์ที่ได้ได้แก่ ของแข็งที่มีปริมาณกำมะถันลดลง แก๊สที่มีค่าความร้อนสูงซึ่งเกิดจากการแตกตัวของตัวทำละลาย โดยเฉพาะในช่วงที่อุณหภูมิสูง ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จึงขึ้นกับตัวทำละลายที่ใช้ ถ้าตัวทำละลายคือเอทานอล แก๊สที่ได้จะมีอีเทน (ethane) เป็นผลิตภัณฑ์หลัก ในทำนองเดียวกันถ้าใช้เมทานอลเป็นตัวทำละลายจะได้มีเทน (methane) เป็นผลิตภัณฑ์หลัก เครื่องปฏิกรณ์แบบกะจะเกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สมาก ส่วนในเครื่องปฏิกรณ์กึ่งต่อเนื่องและเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องจะเกิดแก๊สน้อยลงตามลำดับ นอกจากนี้ยังได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวซึ่งเป็นอนุพันธ์ของถ่านหิน และสารประกอบกำมะถันที่เป็นอนุพันธ์ของตัวทำละลายที่มีคุณค่า สามารถนำไปใช้เป็นสารป้อนในอุตสาหกรรมเคมีต่างๆได้ องค์ประกอบของของเหลวที่ได้ขึ้นกับกระบวนการแยกหลังจากปฏิกิริยาภาวะเหนือวิกฤตและภาวะของปฏิกิริยา ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องการแตกตัวของตัวทำละลายไปเป็นแก๊สน้อยกว่าในเครื่องปฏิกรณ์แบบอื่น จึงมีประโยชน์มากในด้านเศรษฐศาสตร์ เพราะสามารถนำตัวทำละลายกลับมาใช้ใหม่ได้เกือบทั้งหมด

Peter K. K. Louie, Ronald C. Timpe, Steven Hawthorne และ David J. Miller (1994) ศึกษาการขจัดกำมะถันจากถ่านหินโดยการสกัดด้วยของไหลเหนือวิกฤตภายใต้ภาวะการไพโรไลซิส (450 องศาเซลเซียส) ของไหลเหนือวิกฤตที่ใช้คือคาร์บอนไดออกไซด์ (40.53 เมกะปาสกาล) ขจัดกำมะถันรวมได้ประมาณร้อยละ 50 จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโทรเมทรี (SFE-g.c.-m.s.) พบว่ากำมะถันอินทรีย์ส่วนใหญ่ที่ถูกขจัดด้วยกระบวนการนี้อยู่ในรูปอัลคิลไทโอเฟน (alkyl-thiophenes, C<sub>0</sub>-C<sub>5</sub>) เมื่อเติมกรดฟอสฟอริก (phosphoric acid) ในถ่านหินก่อนการขจัดด้วยกระบวนการไพโรไลซิสและสกัดด้วยของไหลเหนือวิกฤต (pyrolysis-SFE) สามารถขจัดกำมะถันรวมได้ร้อยละ 80 โดยไม่จำเป็นต้องมีการขจัดกำมะถันซัลเฟตหรือกำมะถันไพไรต์ (โดยการสกัดด้วยกรดเกลือและกรดไนตริกตามลำดับ) ออกก่อน สำหรับของไหลเหนือวิกฤตผสมระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์กับเมทานอลร้อยละ 10 สามารถขจัดกำมะถันอินทรีย์ได้ดีกว่า เพราะขจัดกำมะถันรวมได้เพียงร้อยละ 60 แต่สามารถขจัดได้ถึงร้อยละ 80 ถ้ามีการสกัดกำมะถันซัลเฟตและกำมะถันไพไรต์ออกก่อน

S. Meffe, A. Perkson และ O. Trass (1996) ศึกษาการขจัดกำมะถันอินทรีย์ด้วยเมทานอลเหนือวิกฤตในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ขจัดกำมะถันได้ร้อยละ 34-53 โดยมีการสูญเสีย

น้ำหนักของถ่านหินประมาณร้อยละ 25 หลังจาก 15 นาที การขจัดกำมะถันจะลดลงเนื่องจากกำมะถันที่ถูกขจัดออกบางส่วนกลับเข้าไปรวมในโครงสร้างของถ่านหิน การขจัดกำมะถันสูงสุดที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส และที่ความหนาแน่นของตัวทำละลายต่ำ (0.01 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการขจัดกำมะถันเป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างกำมะถันในถ่านหินกับอนุมูลอิสระอื่นๆมากกว่ากระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลาย

Li W. and Guo S. (1996) ศึกษาการขจัดกำมะถันจากถ่านหินด้วยเอทานอล-น้ำ และเอทานอล-โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต พบว่าในเครื่องปฏิกรณ์กึ่งต่อเนื่อง แอลกอฮอล์ความเข้มข้นร้อยละ 95 สามารถขจัดกำมะถันได้ดีที่สุด ขจัดกำมะถันรวมได้ร้อยละ 9.8-33.1 เมื่อใช้แอลกอฮอล์-โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ สามารถลดกำมะถันอินทรีย์ได้ร้อยละ 23.6 และลดกำมะถันอนินทรีย์ได้ร้อยละ 61.8 ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ลดกำมะถันรวมได้ร้อยละ 40-48.7 เมื่อใช้แอลกอฮอล์-โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ ลดกำมะถันรวมได้ร้อยละ 47-58.5

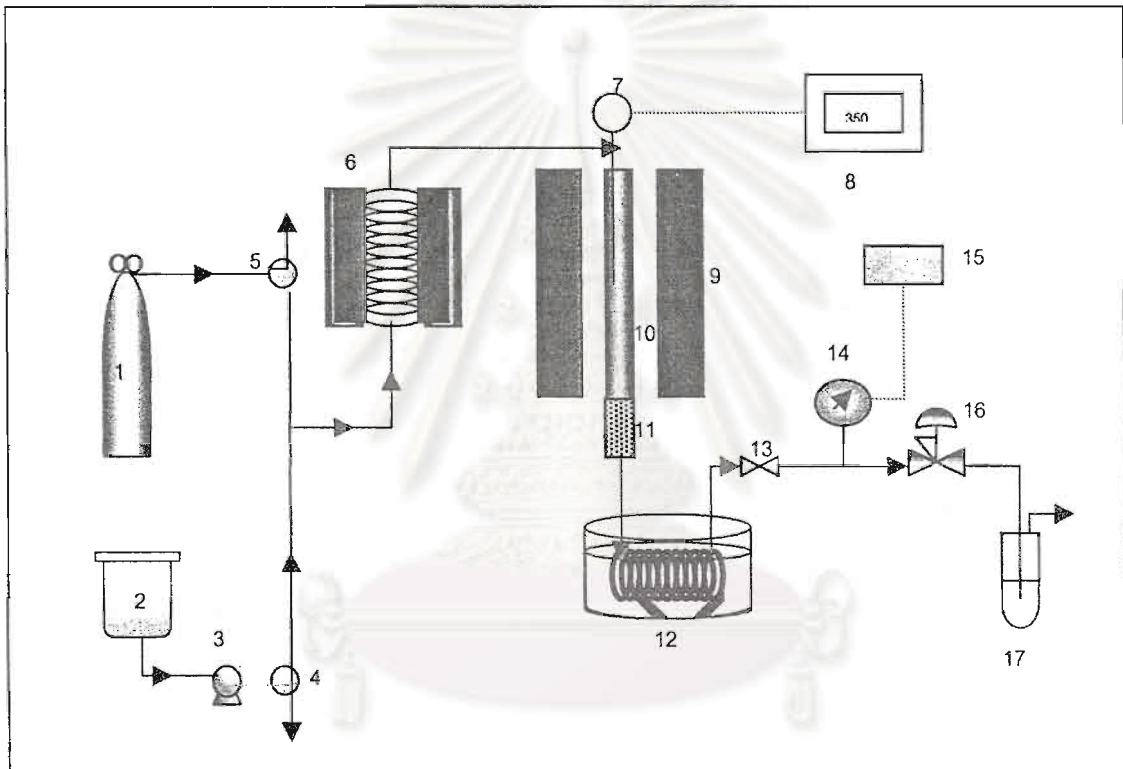
สุพรรณิ รัตนกานตะดิลก (2541) ศึกษาการขจัดกำมะถันในถ่านหินแม่เกาะขนาด 500 ไมโครเมตร-1 มิลลิเมตรโดยใช้เมทานอล-น้ำและเมทานอล-โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ ภาวะที่เหมาะสมสำหรับเมทานอล-น้ำคือ ความเข้มข้นของสารละลายเมทานอล-น้ำ 2 % อุณหภูมิ 150 °ซ เวลาของปฏิกิริยา 60 นาที ลดกำมะถันรวมได้ร้อยละ 62.58 ลดกำมะถันไพไรต์ได้ร้อยละ 52.64 ลดกำมะถันอินทรีย์ได้ร้อยละ 47.33 และภาวะที่เหมาะสมสำหรับเมทานอล-โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์คือ เดิมโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.025 กรัม/กรัมของถ่านหิน อุณหภูมิ 150 °ซ เวลา 90 นาที ลดกำมะถันรวมได้ร้อยละ 57.81 ลดกำมะถันไพไรต์ได้ร้อยละ 47.41 ลดกำมะถันอินทรีย์ได้ร้อยละ 42.03 นอกจากนี้ยังได้ศึกษาจลนศาสตร์การขจัดกำมะถันไพไรต์ด้วยเมทานอล-โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์พบว่าปฏิกิริยาการขจัดกำมะถันไพไรต์สามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองปฏิกิริยาแบบต่อเนื่องอันดับสอง ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาสามารถเขียนได้เป็น  $k_2 = 1.750 \exp(-6.917 \times 10^3/RT)$

### บทที่ 3

## อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

### 3.1 อุปกรณ์การทดลอง

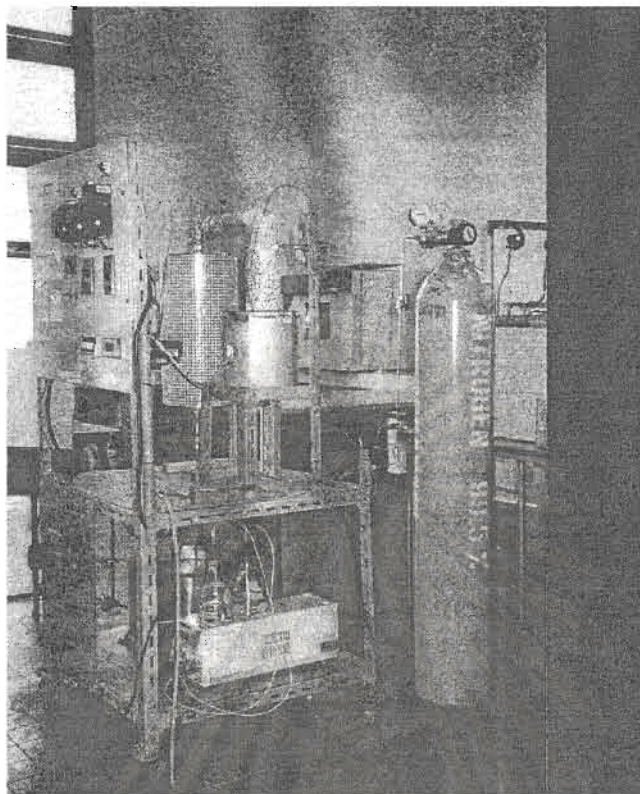
ก. ชุดเครื่องปฏิกรณ์กึ่งต่อเนื่อง อุปกรณ์ที่สำคัญแสดงในรูปที่ 3.1-3.4



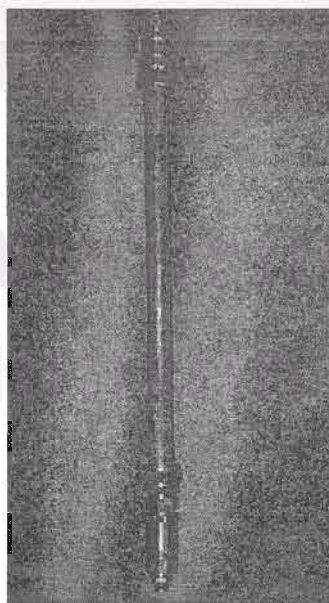
รูปที่ 3.1 แผนผังชุดเครื่องปฏิกรณ์กึ่งต่อเนื่อง

1. แก๊สไนโตรเจน
2. ตัวทำละลาย (เอทานอล หรือเอทานอล-โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์)
3. ปั๊มแรงดันสูง (High pressure liquid chromatography pump) รุ่น PU-1580 ของ JASCO
4. วาล์ว 3 ทาง (3-way ball valve) ขนาด 1/8 นิ้ว
5. วาล์ว 3 ทาง (3-way ball valve) ขนาด 1/8 นิ้ว

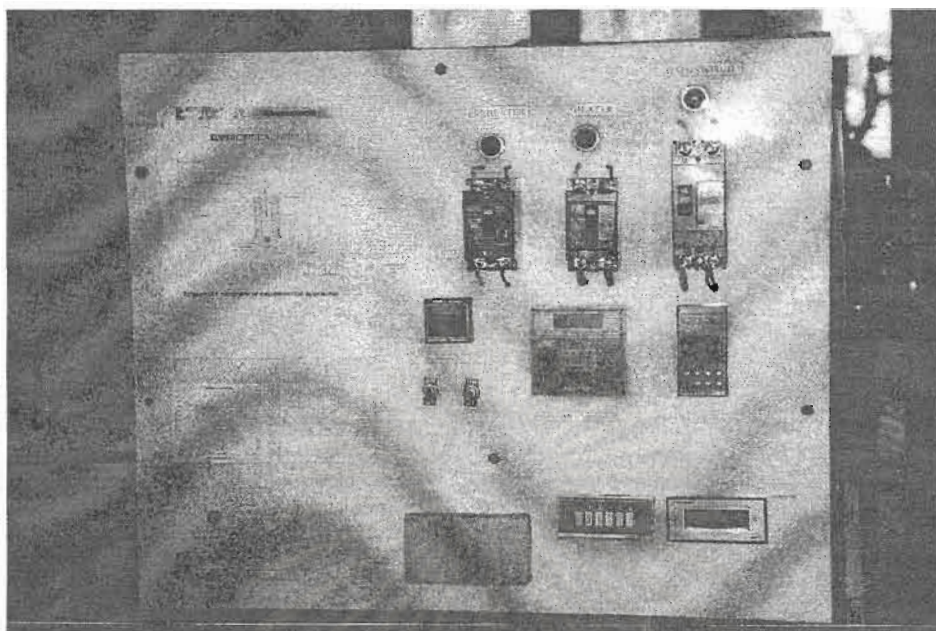
6. เครื่องให้ความร้อน เพื่ออุ่นตัวทำละลายให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นก่อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์ (preheater)
  7. เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 1/8 นิ้ว
  8. เครื่องอ่านอุณหภูมิ (Temperature indicator) รุ่น SD 10 ของ Shimaden
  9. เตาเผาแบบท่อ (Tubular Furnace) ของ Carbolite
  10. เครื่องปฏิกรณ์ (Reactor) ทำจากท่อสเตนเลส 316 (Stainless steel tube 316) ตามมาตรฐาน ASTM A 269 เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 3/4 นิ้ว ความหนา 0.083 นิ้ว ยาว 18 นิ้ว
  11. ตัวกรอง (Filter) ของ Swagelok (Inline filter; F-Series) ความละเอียดได้กรอง 0.5 ไมโครเมตร
  12. อ่างหล่อเย็น (Cooling bath) โดยใช้น้ำเป็นสารหล่อเย็น
  13. บอลวาล์ว (ball valve) ขนาด 1/4 นิ้ว
  14. เครื่องวัดความดัน (Pressure transducer)
  15. เครื่องอ่านความดัน (Pressure indicator) รุ่น 1000 ของ Love
  16. วาล์วควบคุมความดัน (Back pressure regulator) ของ Tescom
  17. ขวดเก็บผลิตภัณฑ์ของเหลว
- ข. เครื่องบดถ่านหิน
1. Hammer mill เป็นเครื่องบดชนิดหยาบ เนื่องจากตัวอย่างถ่านหินที่นำมาจากเหมืองมีขนาดค่อนข้างใหญ่ จึงต้องบดอย่างหยาบให้มีขนาดเล็กลงเพื่อนำไปเข้าเครื่องบดชนิดอื่นต่อไปได้
  2. Cross beater mill ประกอบด้วยตะแกรงขนาดต่างๆ ได้แก่ 1.0, 0.75, และ 0.25 มิลลิเมตร และสามารถเปลี่ยนขนาด เพื่อบดถ่านหินให้มีขนาดเล็กตามต้องการ
  3. Ball mill เป็นเครื่องบดชนิดละเอียด
- ค. ตะแกรงร่อนถ่านหิน และเครื่องร่อนแยก ตะแกรงที่ใช้มีขนาดต่างๆ ได้แก่
1. 250 ไมโครเมตร (เบอร์ 60)
  2. 1 มิลลิเมตร (เบอร์ 18)
  3. 2 มิลลิเมตร (เบอร์ 10)



รูปที่ 3.2 ชุดเครื่องปฏิกรณ์กึ่งต่อเนื่อง



รูปที่ 3.3 เครื่องปฏิกรณ์



รูปที่ 3.4 แผงควบคุม

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



### 3.2 ตัวอย่างถ่านหินและสารเคมี

1. ถ่านหินลิกไนต์ จากแหล่งแม่เมาะ อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง
2. เอทานอลความบริสุทธิ์ร้อยละ 95
3. โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)
4. แก๊สไนโตรเจน
5. สารเคมีที่จำเป็นในการวิเคราะห์ถ่านหิน

### 3.3 การดำเนินการวิจัย

ในการทดลองกับถ่านหินที่มีกำมะถันต่ำได้ทำการทดลองตามแบบของ Box-Behnken โดยแต่ละตัวแปรที่มี 3 ระดับ และทำการทดลองเพียงบางส่วน สำหรับการทดลองที่มี 4 ตัวแปรจะต้องทำการทดลองทั้งหมด 27 การทดลองดังตารางที่ 3.1 และ 3.2

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษาในถ่านหินกำมะถันต่ำ

ตัวแปร	ต่ำ	กลาง	สูง
1. อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	250	300	350
2. ความดัน (เมกะปาสคาล)	5.51	6.89	8.27
3. เวลาของปฏิกิริยา (นาที)	30	60	90
4. ปริมาณโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ (กรัมต่อลิตร)	0.0	1.5	3.0

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.2 จำนวนการทดลองและภาวะที่ทดลองในถ่านหินกำมะถันต่ำ

การทดลองที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความดัน (เมกะปาสคาล)	เวลา (นาที)	โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ (กรัม/ลิตร)
1	250	5.51	60	1.5
2	250	8.27	60	1.5
3	350	5.51	60	1.5
4	350	8.27	60	1.5
5	300	6.89	30	0.0
6	300	6.89	30	3.0
7	300	6.89	90	0.0
8	300	6.89	90	3.0
9	300	6.89	60	1.5
10	250	6.89	60	0.0
11	250	6.89	60	3.0
12	350	6.89	60	0.0
13	350	6.89	60	3.0
14	300	5.51	30	1.5
15	300	8.27	90	1.5
16	300	5.51	30	1.5
17	300	8.27	90	1.5
18	300	6.89	60	1.5
19	250	6.89	30	1.5
20	250	6.89	90	1.5
21	350	6.89	30	1.5
22	350	6.89	90	1.5
23	300	5.51	60	0.0
24	300	5.51	60	3.0
25	300	8.27	60	0.0
26	300	8.27	60	3.0
27	300	6.89	60	1.5

ในการทดลองกับถ่านหินที่มีกำมะถันสูงเป็นการทดลองแบบแฟกทอเรียล โดยแต่ละตัวแปร มี 2 ระดับ และทำการทดลองครบทุกการทดลอง ตัวแปรที่ทำการศึกษามี 4 ตัวแปร คือ

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษาในถ่านหินกำมะถันสูง

ตัวแปร	ต่ำ	สูง
1. อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	250	350
2. ความดัน (เมกะปาสคาล)	5.51	8.27
3. เวลาของปฏิกิริยา (นาที)	30	60
4. ปริมาณโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ (กรัมต่อลิตร)	0	5

ตารางที่ 3.4 จำนวนการทดลองทั้งหมดที่ต้องทำการทดลองในถ่านหินกำมะถันสูง

การทดลองที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความดัน (เมกะปาสคาล)	เวลา (นาที)	โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ (กรัมต่อลิตร)
(1)	250	5.51	30	0
a	350	5.51	30	0
b	250	8.27	30	0
ab	350	8.27	30	0
c	250	5.51	60	0
ac	350	5.51	60	0
bc	250	8.27	60	0
abc	350	8.27	60	0
d	250	5.51	30	5
ad	350	5.51	30	5
bd	250	8.27	30	5
abd	350	8.27	30	5
cd	250	5.51	60	5
acd	350	5.51	60	5
bcd	250	8.27	60	5
abcd	350	8.27	60	5

ข้อมูลการทดลองที่ได้จะนำมาวิเคราะห์ทางสถิติต่อไป เพื่อดูอิทธิพลของตัวแปรแต่ละตัว ในช่วงที่ทำการศึกษาว่าตัวแปรใดบ้างที่มีอิทธิพลต่อการสูญเสียน้ำหนักของถ่านหิน, ร้อยละ การขจัดเถ้า, ร้อยละการขจัดกำมะถันรวม, ร้อยละการขจัดกำมะถันอินทรีย์และร้อยละการ ขจัดกำมะถันอินทรีย์

### 3.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

ก. การเตรียมตัวอย่างถ่านหินเพื่อใช้ในการวิเคราะห์สมบัติเริ่มต้นและใช้ในการทดลอง

1. ตากถ่านหินทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเพื่อไล่ความชื้นอิสระจนน้ำหนักคงที่
2. บดถ่านหินให้มีขนาดเล็กลงด้วยเครื่องบด Hammer mill
3. นำตัวอย่างจากข้อ 2 มาบดต่อด้วยเครื่อง Cross beater mill สามารถ เปลี่ยนขนาดตะแกรงได้ตามต้องการ
4. นำตัวอย่างที่บดแล้วไปร่อนแยกขนาดด้วยตะแกรงร่อนแยกขนาดและเครื่อง ร่อนแยก
5. ตากถ่านหินจนมีความชื้นสมดุลกับอากาศประมาณ 3 วัน
6. สำหรับถ่านหินที่จะนำไปวิเคราะห์สมบัติเริ่มต้น ต้องบดละเอียดด้วยเครื่อง Ball mill แล้วนำมาผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 60 (250 ไมโครเมตร) ให้ผ่านได้ ทั้งหมดและนำตัวอย่างไปเก็บในภาชนะที่มีฝาปิดสนิท

ข. วิเคราะห์สมบัติต่างๆของถ่านหินเริ่มต้นก่อนการขจัดกำมะถัน ได้แก่

1. การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis, ASTM D 3173-3175)
2. การวิเคราะห์แยกธาตุ (Ultimate analysis)
3. ค่าความร้อน และปริมาณกำมะถันรวม (ASTM D 2015 และ ASTM D 3177)
4. ปริมาณกำมะถันซัลเฟต, ปริมาณกำมะถันไพไรต์ และปริมาณกำมะถัน อินทรีย์ (ASTM D 2492)

ค. การขจัดกำมะถันจากถ่านหินด้วยเอทานอล และเอทานอล-โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์

1. ชั่งตัวอย่างถ่านหินประมาณ 20 กรัม ใส่ในเครื่องปฏิกรณ์ ชั่งน้ำหนักรวม เครื่องปฏิกรณ์ ถ่านหินจะอยู่ในตะกร้าที่ทำจากสแตนเลสเพื่อพุงถ่านหิน

2. ปรับความดันรวมภายในระบบ โดยปรับความดันของแก๊สไนโตรเจนที่เข้าไปในระบบและปรับวาล์วควบคุมความดันให้ได้ความดันในระบบตามต้องการ
  3. เปิดเตาเผาและตั้งอุณหภูมิ ให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน
  4. เปิดปั๊มแรงดันสูง ตั้งอัตราการไหลของสารละลาย 2.00 มิลลิลิตรต่อนาที ปรับวาล์ว 3 ทางให้แก๊สไนโตรเจนไหลออกจากระบบ และให้ตัวทำละลายไหลเข้าไปแทนที่แก๊สไนโตรเจนภายในระบบ
  5. เริ่มจับเวลาเมื่ออุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ถึงอุณหภูมิที่ต้องการ
  6. เมื่อสิ้นสุดการทดลองแล้วจึงปิดปั๊ม ปิดเตาเผา และลดความดัน หลังจากนั้นจึงเปิดแก๊สไนโตรเจนเพื่อไล่ของเหลวที่ค้างอยู่ในระบบออกจนหมด
  7. ชั่งน้ำหนักรวมของถ่านหินและเครื่องปฏิกรณ์หลังจากเกิดปฏิกิริยา บันทึกผล
- ง. การเตรียมถ่านหินเพื่อวิเคราะห์สมบัติหลังผ่านการขจัดกำมะถัน
1. นำถ่านหินที่ผ่านการขจัดกำมะถันแล้วล้างด้วยน้ำกลั่นจนเป็นกลาง โดยทดสอบด้วยกระดาษลิตมัส
  2. กรองและอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
  3. ทิ้งให้ความชื้นสมดุลกับบรรยากาศ แล้วนำมาบดละเอียดด้วยเครื่อง Ball mill
  4. นำมาร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 60 แล้วเก็บใส่ภาชนะที่มีฝาปิดสนิท
- จ. การวิเคราะห์ถ่านหินหลังผ่านการขจัดกำมะถัน
1. การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis, ASTM D 3173-3175)
  2. ค่าความร้อน และปริมาณกำมะถันรวม (ASTM D 2015 และ ASTM D 3177)
  3. ปริมาณกำมะถันซัลเฟต ปริมาณกำมะถันไพไรต์และปริมาณกำมะถันอินทรีย์ (ASTM D 2492)

ฉ. การคำนวณร้อยละการขจัดกำมะถันและร้อยละการลดเถ้า

$$\text{ร้อยละการขจัดกำมะถัน} = \frac{[\text{ร้อยละกำมะถันก่อนขจัด} - (\text{ร้อยละกำมะถันหลังขจัด} \times \text{ผลได้})] \times 100}{\text{ร้อยละกำมะถันก่อนขจัด}}$$

$$\text{ร้อยละการขจัดเถ้า} = \frac{[\text{ร้อยละเถ้าก่อนขจัด} - (\text{ร้อยละเถ้าหลังขจัด} \times \text{ผลได้})] \times 100}{\text{ร้อยละเถ้าก่อนขจัด}}$$



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง การวิเคราะห์และวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้แบ่งการทดลองเป็น 2 ส่วนคือการขจัดกำมะถันจากถ่านหินที่มีปริมาณกำมะถันต่ำ และการขจัดกำมะถันจากถ่านหินที่มีปริมาณกำมะถันสูง แต่ใช้วิธีการออกแบบการทดลองต่างกัน สำหรับถ่านหินที่มีปริมาณกำมะถันต่ำทำการทดลองบางส่วนแบบ Box-Behnken ซึ่งเป็นการทดลองที่แต่ละปัจจัยที่ศึกษามี 3 ระดับ (Box and Behnken, 1960)

ในการทดลองกับถ่านหินที่มีปริมาณกำมะถันสูงทำการทดลองแบบแฟคทอเรียลที่แต่ละปัจจัยที่ศึกษามี 2 ระดับและทำการทดลองครบทุกการทดลอง (Montgomery, 1976)

#### 4.1 ถ่านหินที่มีปริมาณกำมะถันต่ำ

##### 4.1.1 การวิเคราะห์สมบัติและปริมาณกำมะถันในถ่านหินเริ่มต้น

การวิเคราะห์สมบัติของถ่านหินเริ่มต้นได้วิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM ดังแสดงไว้ในบทที่ 3 และภาคผนวก ส่วนการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (เฉพาะธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน) ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง CHNS/O Analyser (Perkin Elmer PE2400 series II) ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.1 การวิเคราะห์สมบัติแบบประมาณและไม่รวมความชื้นของถ่านหินที่มีกำมะถันต่ำ

สมบัติ	ปริมาณ (%)
สารระเหย	46.70
คาร์บอนคงตัว	45.36
เถ้า	7.94

ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุแบบไม่รวมความชื้นและเถ้าของถ่านหินที่มีกำมะถันต่ำ

ธาตุ	ปริมาณ (%)
C	67.92
H	3.20
N	0.88
S	1.21
O (ผลต่าง)	26.79

#### 4.1.2 ผลของตัวแปรต่างๆที่มีต่อการขจัดกำมะถันและเถ้าในถ่านหินกำมะถันต่ำ

ผลการวิเคราะห์สมบัติของถ่านหินที่ผ่านการขจัดกำมะถันด้วยเอทานอล-โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์เหนือวิกฤตแสดงในตารางที่ 4.3 และร้อยละการขจัดกำมะถันรูปแบบต่างๆ และร้อยละการขจัดเถ้าแสดงในตารางที่ 4.4

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ 4.3 สมบัติของถ่านหินกัมมะถันต่ำหลังผ่านการขจัดกัมมะถันด้วยเอทานอล-โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตแบบไม่รวมความชื้น

การทดลองที่	ร้อยละผลได้	ร้อยละเถ้า	ร้อยละกัมมะถัน			
			รวม	ซัลเฟต	ไพไรต์	อินทรีย์
เริ่มต้น		7.94	1.21	0.13	0.16	0.92
1	91.4	8.18	0.91	0.07	0.15	0.70
2	88.9	7.99	0.92	0.07	0.14	0.71
3	87.1	8.37	0.91	0.05	-	-
4	79.1	8.77	0.69	0.05	0.07	0.57
5	86.7	7.58	0.92	0.06	0.11	0.75
6	83.6	7.78	0.83	0.05	0.10	0.68
7	79.6	7.81	0.68	0.06	0.06	0.55
8	89.7	7.88	0.90	0.08	0.08	0.75
9	85.2	7.94	0.82	0.06	-	-
10	88.5	7.46	0.94	0.06	0.07	0.82
11	89.6	7.31	1.01	0.05	0.05	0.91
12	83.5	7.80	0.82	0.07	0.05	0.70
13	77.6	8.90	0.67	0.11	0.06	0.50
14	90.1	8.19	0.92	0.06	0.08	0.77
15	79.0	8.73	0.71	0.02	0.06	0.62
16	87.7	7.08	0.84	0.03	0.06	0.76
17	77.3	8.65	0.70	-	0.05	-
18	86.1	7.91	0.90	0.12	0.07	0.71
19	90.3	8.16	0.92	0.05	0.06	0.81
20	89.4	7.72	0.94	0.05	0.06	0.83
21	83.7	7.40	0.79	0.07	0.08	0.64
22	81.5	8.04	0.74	0.08	0.07	0.59
23	85.4	7.22	0.86	0.09	0.07	0.70
24	79.2	7.68	0.82	0.07	0.06	0.68
25	87.9	7.11	0.98	0.07	0.06	0.85
26	86.6	7.71	0.94	0.06	0.10	0.78
27	87.2	7.12	0.87	0.06	0.08	0.73

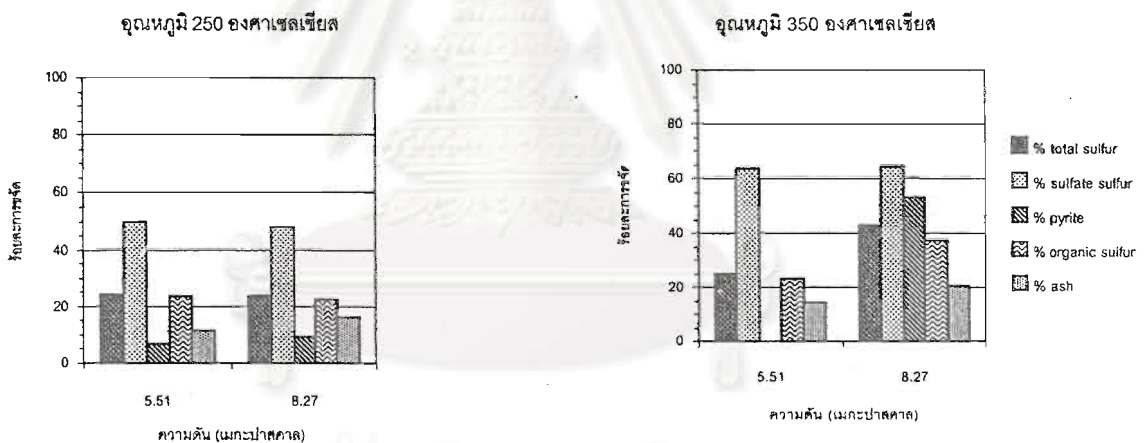
ตารางที่ 4.4 ร้อยละการขจัดกำมะถันรูปต่างๆและร้อยละการขจัดเก็บแบบไม่รวมความชื้นของถ่านหิน  
กำมะถันต่ำ

การทดลองที่	ร้อยละการขจัดเก็บ	ร้อยละการขจัดกำมะถัน			
		รวม	ซัลเฟต	ไพไรต์	อินทรีย์
1	11.5	24.3	49.5	6.7	23.7
2	16.0	23.4	48.1	9.3	22.3
3	14.4	24.6	63.7	-	-
4	20.7	42.5	64.1	53.0	37.7
5	22.7	23.8	53.1	28.1	18.9
6	24.0	30.9	57.8	33.7	26.6
7	29.3	43.8	50.3	59.5	40.2
8	16.4	25.4	39.5	51.8	18.9
9	19.9	31.9	51.6	-	-
10	20.2	22.1	55.3	57.7	11.3
11	20.4	16.7	62.1	67.7	1.5
12	23.7	32.1	45.5	71.0	23.6
13	20.2	44.1	12.6	61.1	45.7
14	10.8	24.1	54.6	46.2	16.0
15	21.2	41.5	81.2	63.2	32.2
16	27.0	30.3	78.5	64.0	17.7
17	23.4	41.8	-	69.7	-
18	20.3	25.6	8.8	54.9	23.0
19	12.6	23.5	62.7	59.8	11.7
20	18.5	22.2	63.3	59.7	10.0
21	27.8	34.8	45.7	48.6	30.9
22	24.4	38.7	41.1	56.1	35.4
23	28.3	29.1	30.9	55.7	24.3
24	30.3	32.4	43.2	62.9	25.6
25	26.9	18.5	42.8	60.8	7.8
26	20.6	22.5	57.0	38.2	14.9
27	27.3	28.0	57.4	50.3	20.5

ก. ผลของอุณหภูมิและความดัน

จากผลการทดลองที่ 1, 2, 3 และ 4 แสดงเป็นแผนภูมิแท่งในรูปที่ 4.1 ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส การเพิ่มความดันจาก 5.51 เมกะปาสคาลเป็น 8.27 เมกะปาสคาล ไม่มีผลต่อการขจัดกำมะถันรวม กำมะถันซัลเฟตและกำมะถันอินทรีย์ แต่การขจัดกำมะถันไพไรต์และเถ้าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 350 องศาเซลเซียส การเพิ่มความดันจาก 5.51 เมกะปาสคาลเป็น 8.27 เมกะปาสคาลทำให้การขจัดกำมะถันรวม กำมะถันไพไรต์ กำมะถันอินทรีย์และเถ้าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิคงที่ทั้ง 250 และ 350 องศาเซลเซียสแสดงให้เห็นว่าความดันไม่มีผลต่อการขจัดกำมะถันซัลเฟต แต่การเพิ่มอุณหภูมิจาก 250 เป็น 350 องศาเซลเซียสมีผลให้การขจัดกำมะถันซัลเฟตดีขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.1

จากผลของอุณหภูมิและความดันแสดงให้เห็นว่าการขจัดกำมะถันและเถ้าที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส และความดัน 8.27 เมกะปาสคาลให้ผลดีกว่าที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสและความดัน 5.51 เมกะปาสคาล



รูปที่ 4.1 ผลของอุณหภูมิและความดันต่อร้อยละการขจัดกำมะถันและเถ้าที่เวลา 60 นาที และเติมโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.5 กรัมต่ออลิตร

### ข. ผลของเวลา

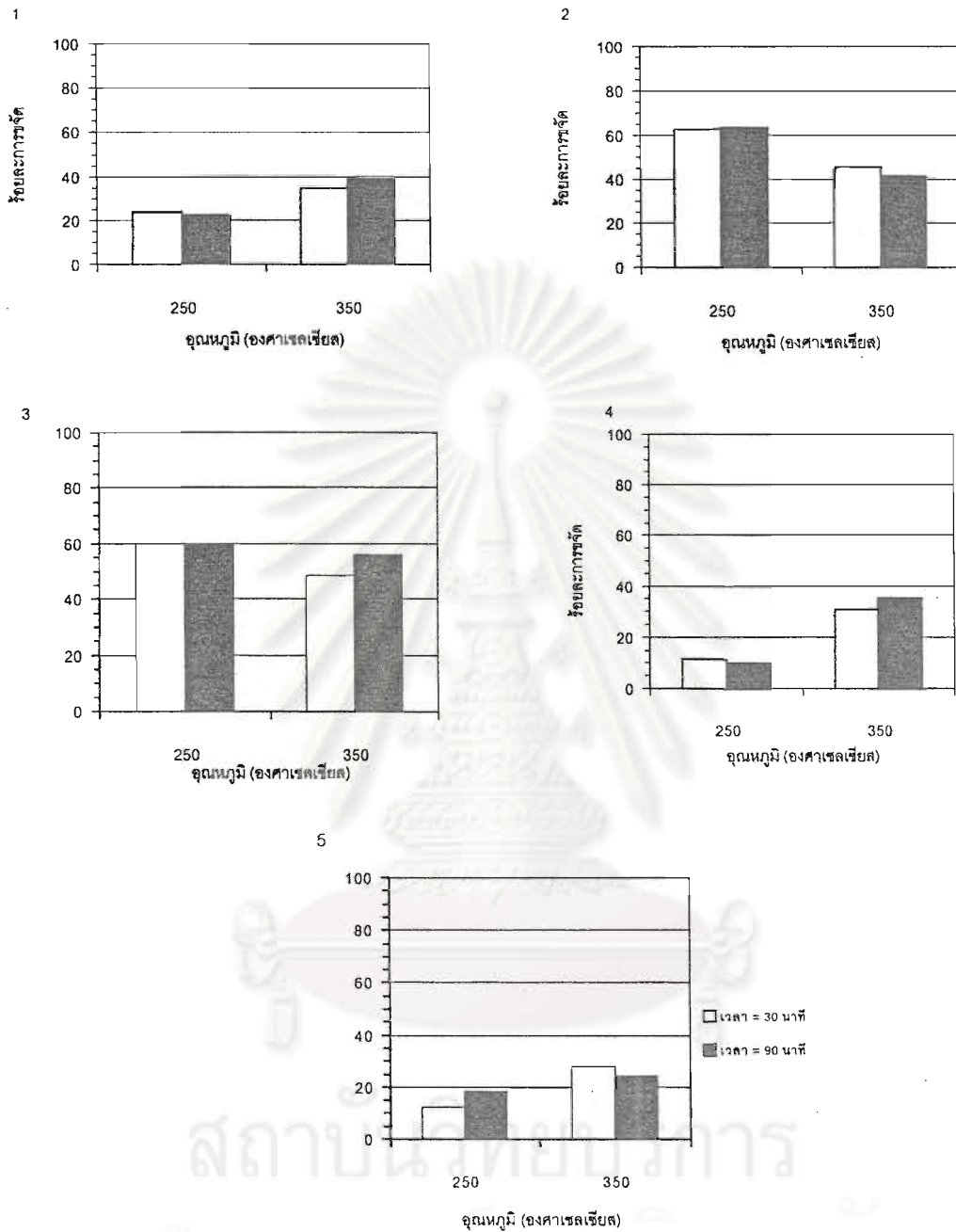
แผนภูมิแท่งในรูปที่ 4.2 แสดงผลของเวลาที่มีต่อการขจัดกัมมะถันและเถ้าของการทดลองที่ 19, 20, 21 และ 22 ซึ่งแปรค่าอุณหภูมิและเวลาคืออุณหภูมิ 250 กับ 350 องศาเซลเซียส และเวลา 30 กับ 90 นาที โดยความดันคงที่ที่ 6.89 เมกะปาสคาล และปริมาณโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.5 กรัมต่อลิตร จากแผนภูมิแสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ร้อยละการขจัดกัมมะถันรวม กัมมะถันซัลเฟต กัมมะถันไพไรต์ และกัมมะถันอินทรีย์ที่เวลา 30 นาทีไม่แตกต่างจากร้อยละการขจัดที่เวลา 90 นาที ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เวลาที่มีผลต่อการขจัดกัมมะถันและการขจัดเถ้าคือ การขจัดกัมมะถันรวม ไพไรต์และกัมมะถันอินทรีย์ที่เวลา 90 นาทีดีกว่าที่เวลา 30 นาที ในขณะที่กัมมะถันซัลเฟตและเถ้าถูกขจัดได้น้อยลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นเป็น 90 นาที และการขจัดกัมมะถันซัลเฟตและไพไรต์ที่ 350 องศาเซลเซียสน้อยกว่าที่ 250 องศาเซลเซียส

### ค. ผลของโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์

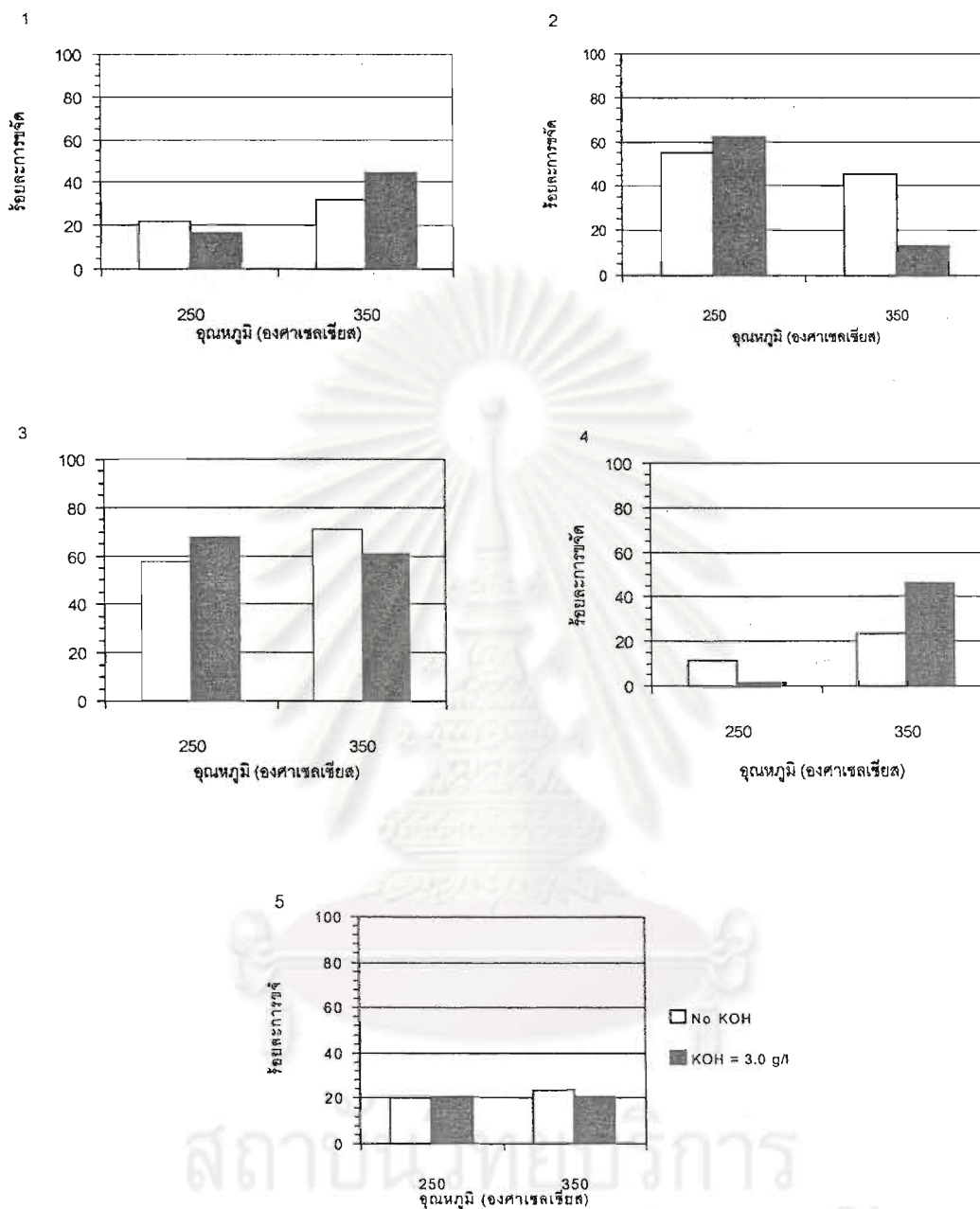
การทดลองที่ 10, 11, 12 และ 13 เป็นการทดลองซึ่งแปรค่าอุณหภูมิและปริมาณโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์คือ อุณหภูมิ 250 กับ 350 องศาเซลเซียส และปริมาณโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.0 กรัมต่อลิตร กับ 3.0 กรัมต่อลิตร โดยความดันและเวลาคงที่คือความดัน 6.89 เมกะปาสคาล เวลา 60 นาที จากแผนภูมิแท่งในรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าเมื่อไม่เติมโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ ร้อยละการขจัดกัมมะถันรวม กัมมะถันไพไรต์ กัมมะถันอินทรีย์และเถ้าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 250 องศาเซลเซียสเป็น 350 องศาเซลเซียส แต่กัมมะถันซัลเฟตขจัดได้น้อยลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ

เมื่อเติมโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ 3.0 กรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส การขจัดกัมมะถันรวมและการขจัดกัมมะถันอินทรีย์ลดลง แต่การขจัดกัมมะถันซัลเฟตและกัมมะถันไพไรต์เพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 350 องศาเซลเซียส การขจัดกัมมะถันรวมและกัมมะถันอินทรีย์สูงขึ้น ในขณะที่การขจัดกัมมะถันซัลเฟตลดลงมาก และการขจัดไพไรต์ลดลงเล็กน้อย แต่การเติมโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์และการเพิ่มอุณหภูมิไม่มีผลต่อการขจัดเถ้า

ในการขจัดกัมมะถันจากถ่านหินที่มีกัมมะถันต่ำนี้ ร้อยละการขจัดกัมมะถันรวมจะมากหรือน้อยขึ้นกับร้อยละการขจัดกัมมะถันอินทรีย์มากกว่ากัมมะถันรูปอื่น เพราะกัมมะถันซัลเฟตและกัมมะถันไพไรต์มีปริมาณใกล้เคียงกันและมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณกัมมะถันอินทรีย์



รูปที่ 4.2 ผลของเวลาต่อร้อยละการกำจัดกัมมันตรวม (1) ร้อยละการกำจัดกัมมันตซ์ลเฟต (2) ร้อยละการไฟไรต์ (3) ร้อยละการกำจัดกัมมันตอินทรีย์ (4) และร้อยละการกำจัดเถ้า (5) ที่ความดัน 6.89 เมกะปาสคาล ไปเตสเซียมไดรอกไซด์ 1.5 กรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.3 ผลของโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อร้อยละการขจัดกัมมันตรวม (1) ร้อยละการขจัดกัมมันตรวม (2) ร้อยละการไฟโรต์ (3) ร้อยละการขจัดกัมมันตรวมอินทรี (4) และร้อยละการขจัดเม็ด (5) ที่ความดัน 6.89 เมกะปาสคาล เวลา 60 นาที

## 4.2 ถ่านหินที่มีกำมะถันสูง

เป็นการศึกษาการขจัดกำมะถันในถ่านหินแม่เมาะด้วยสารละลายเอทานอล-โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต ปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่ อุณหภูมิ ความดัน เวลา และปริมาณโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ จากข้อมูลการทดลองที่ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์ต่อด้วยกระบวนการทางสถิติเพื่อดูว่าปัจจัยใดบ้างในช่วงที่ทำการศึกษามีผลต่อร้อยละผลได้ของถ่านหิน ร้อยละการขจัดกำมะถันรวม ร้อยละการขจัดกำมะถันซัลเฟต ร้อยละการขจัดกำมะถันไพไรต์ ร้อยละการขจัดกำมะถันอินทรีย์ และร้อยละการขจัดเถ้า

### 4.2.1 การวิเคราะห์สมบัติและปริมาณกำมะถันในถ่านหินเริ่มต้น

จากผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.5 และตารางที่ 4.6 พบว่าเป็นถ่านหินคุณภาพต่ำ มีปริมาณคาร์บอนคงตัวต่ำ ปริมาณสารระเหย เถ้าและปริมาณกำมะถันรวมสูง

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณและปริมาณกำมะถันแบบไม่รวมความชื้นของถ่านหินแม่เมาะขนาด 1-2 มิลลิเมตร

สมบัติ	ปริมาณ (%)
สารระเหย	51.11
เถ้า	17.73
คาร์บอนคงตัว	31.16

ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ ไม่รวมความชื้นและเถ้าของถ่านหินแม่เมาะขนาด 1-2 มิลลิเมตร

ธาตุ	ปริมาณ (%)
C	56.81
H	5.33
N	1.69
S	4.46
O (ผลต่าง)	31.71

#### 4.2.2 ผลของตัวแปรต่างๆที่มีต่อการขจัดกำมะถันและเถ้าของถ่านหินกำมะถันสูง

ผลการวิเคราะห์สมบัติของถ่านหินที่ผ่านการขจัดกำมะถันด้วยเอทานอล-ไปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตแสดงในตารางที่ 4.7 และร้อยละการขจัดกำมะถันรูปต่างๆและเถ้าแสดงในตารางที่ 4.8



สถาบันวิจัยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ 4.7 สมบัติของถ่านหินแม่เมาะหลังผ่านการกำจัดกำมะถันด้วยเอทานอล-โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์แบบไม่รวมความชื้น

Treatment combination	ร้อยละผลได้	การวิเคราะห์แบบประมาณ(ร้อยละ)			ค่าความร้อน (แคลอรีต่อกรัม)	ร้อยละกำมะถันรวม	ร้อยละกำมะถัน		
		ถ้ำ	สารระเหย	คาร์บอนคงตัว			ซัลเฟต	ไฟโวลต์	อินทรีย์
เริ่มต้น	-	17.7	51.1	31.2	5526	4.46	0.61	1.65	2.20
(1)	92.4	16.4	46.3	37.3	5314	3.68	0.32	1.52	1.84
a	82.4	16.0	32.2	51.9	5233	2.71	0.34	0.61	1.75
b	90.7	15.8	41.1	43.1	5170	3.82	0.30	1.51	2.00
ab	79.9	16.0	30.8	53.2	5288	2.49	0.30	0.33	1.86
c	90.9	16.0	38.5	45.6	5265	3.58	0.22	1.48	1.88
ac	83.4	16.3	32.3	51.4	5368	2.67	0.20	0.48	1.98
bc	91.4	17.0	39.5	43.5	5173	3.75	0.32	1.31	2.12
abc	80.8	16.0	31.8	52.2	5454	2.59	0.29	1.12	1.81
d	91.7	15.2	38.1	46.8	4745	3.59	0.23	1.36	2.01
ad	84.6	15.4	31.6	53.0	5048	2.81	0.27	0.52	2.02
bd	91.9	15.9	41.0	43.2	4723	3.54	0.28	1.13	2.12
abd	84.6	15.4	46.8	37.9	4882	2.88	0.28	0.41	2.19
cd	91.9	14.9	40.4	44.8	4814	3.57	0.20	1.28	2.09
acd	83.1	15.5	35.4	49.2	5117	2.69	0.29	0.31	2.09
bcd	90.4	15.4	41.2	43.4	4632	3.66	0.30	1.23	2.12
abcd	81.2	15.8	35.2	49.0	4947	2.37	0.27	0.12	1.99

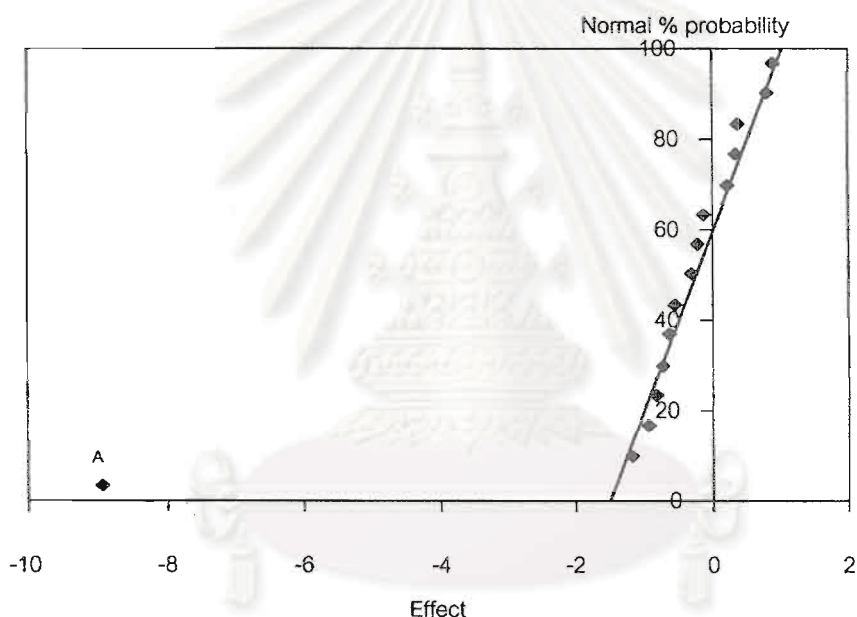
ตารางที่ 4.8 ร้อยละการขจัดเก้้า ร้อยละการขจัดกำมะถันรวม และร้อยละการขจัดกำมะถันรูปแบบต่างๆแบบไม่รวมความชื้น

Treatment combination	ร้อยละการขจัดเก้้า	ร้อยละการขจัดกำมะถันรวม	ร้อยละการขจัดกำมะถัน		
			ซัลเฟต	ไฟโรต์	อินทรีย์
(1)	6.98	16.5	43.5	8.5	16.2
a	8.88	37.4	45.2	61.9	19.6
b	10.35	13.7	49.4	7.6	8.4
ab	10.02	43.2	50.4	78.1	14.3
c	9.33	18.2	61.9	11.4	12.5
ac	7.70	39.2	65.5	71.4	11.3
bc	4.86	14.6	47.4	19.5	4.3
abc	10.33	42.9	51.7	73.2	14.1
d	14.00	19.9	60.6	17.2	8.1
ad	13.09	36.0	54.1	67.0	7.8
bd	11.31	19.7	52.5	30.5	3.3
abd	13.48	35.9	53.8	76.0	1.1
cd	16.92	20.9	64.8	21.5	5.3
acd	12.72	38.2	51.9	82.0	5.0
bcd	14.38	17.3	51.0	25.8	3.6
abcd	10.00	47.7	58.0	89.4	8.8

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ก. ผลของปัจจัยต่างๆต่อร้อยละผลได้ของถ่านหิน

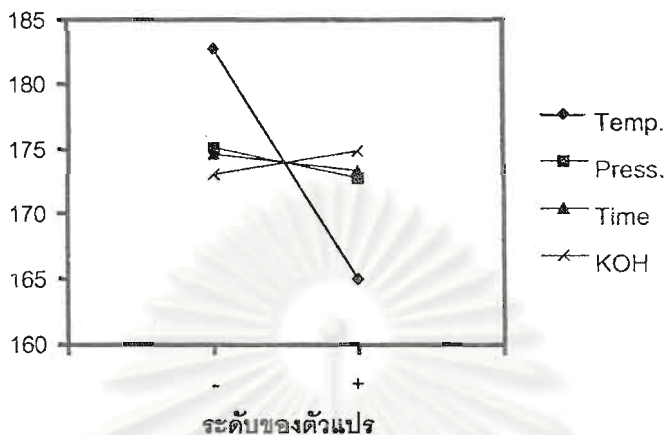
รูปที่ 4.4 แสดงผลของปัจจัยหลักและผลของปฏิกริยาสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆที่มีต่อร้อยละผลได้ของถ่านหิน ปัจจัยที่เบี่ยงเบนออกจากแนวเส้นตรงเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญ ดังนั้นจากรูปที่ 4.4 แสดงว่าปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของถ่านหินมากที่สุดคืออุณหภูมิ รูปที่ 4.5 แสดงแนวโน้มของการเปลี่ยนระดับของตัวแปรต่างๆที่มีต่อร้อยละผลได้ของถ่านหิน การเพิ่มอุณหภูมิในช่วงที่ศึกษาทำให้การสูญเสียน้ำหนักของถ่านหินมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารระเหยถูกขจัดออกได้มากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูง จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนและการวิเคราะห์การถดถอยในภาคผนวก ค แสดงว่าตัวแปรอื่นๆมีผลน้อยมากเมื่อเทียบกับอุณหภูมิ



รูปที่ 4.4 Normal probability plot ของผลเนื่องจากปัจจัยหลักและปฏิกริยาสัมพันธ์ต่างๆที่มีต่อร้อยละผลได้ของถ่านหิน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค่าเฉลี่ยผลตอบสนอง

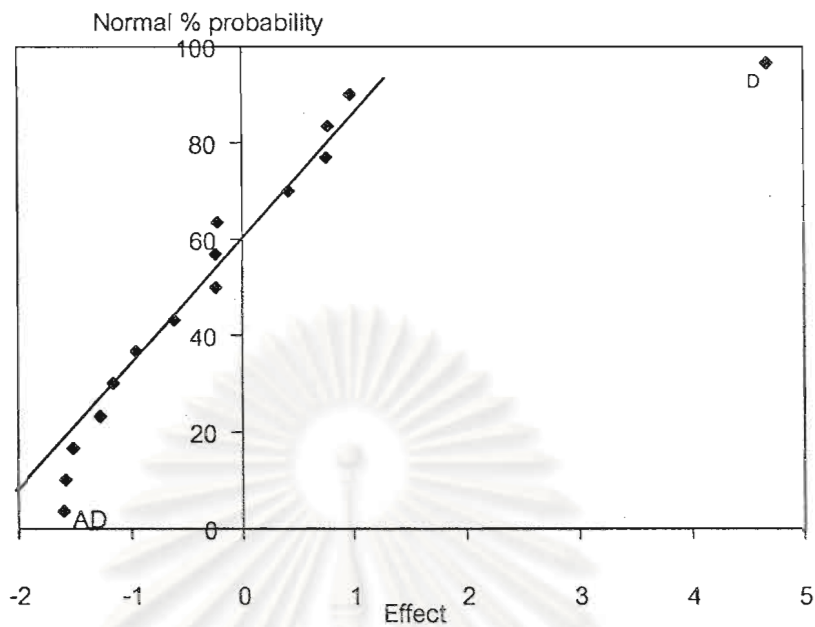


รูปที่ 4.5 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของร้อยละผลได้ของถ่านหินเมื่อมีการเปลี่ยนระดับของตัวแปร

ข. ผลของปัจจัยต่างๆต่อร้อยละการขจัดเถ้า

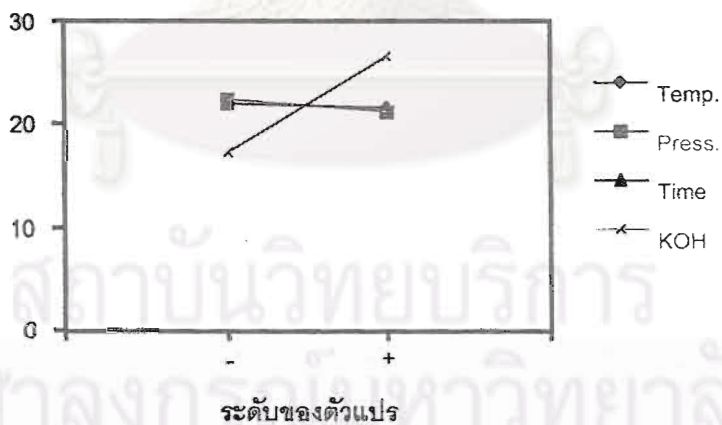
ตัวแปรอิสระที่มีผลต่อร้อยละการขจัดเถ้ามีเพียงโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์เท่านั้นดังแสดงในรูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7 ซึ่งแสดงแนวโน้มของการขจัดเถ้าเมื่อมีการเปลี่ยนระดับของตัวแปร การเติมโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ในช่วงที่ทำการศึกษช่วยให้การขจัดเถ้าดีขึ้น อาจเนื่องจากโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้โครงสร้างของถ่านหินเปลี่ยนไปทำให้สารอินทรีย์ในส่วนที่ปรากฏเป็นองค์ประกอบในถ่านหินถูกขจัดออกได้ดีขึ้น เถ้าบางส่วนอาจเกิดปฏิกิริยากลายเป็นสารประกอบซัลเฟตซึ่งละลายออกไปได้พร้อมกับสารละลาย จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่าผลเนื่องมาจากปฏิกิริยาสัมพันธ์ของตัวแปรอื่นๆด้วย ผลกระทบระหว่างตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์มักมีค่าสูง และผลของอุณหภูมิ ความดัน และเวลาเพียงอย่างเดียวไม่มีผลต่อร้อยละการขจัดเถ้า แต่จะเห็นความเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเติมโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.6 Normal probability plot ของผลเนื่องจากปัจจัยหลักและปฏิกริยาสัมพันธ์ต่างๆที่มีต่อการจัดเก็บ

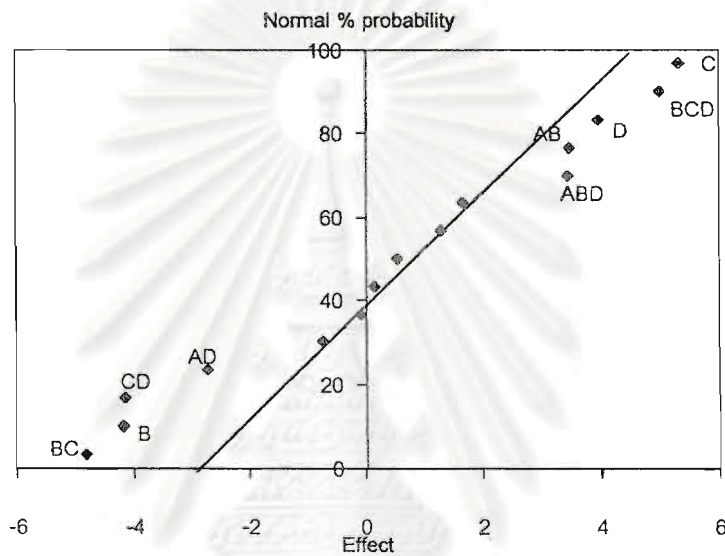
ค่าเฉลี่ยผลตอบสนอง



รูปที่ 4.7 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของการจัดเก็บเมื่อมีการเปลี่ยนระดับของตัวแปร

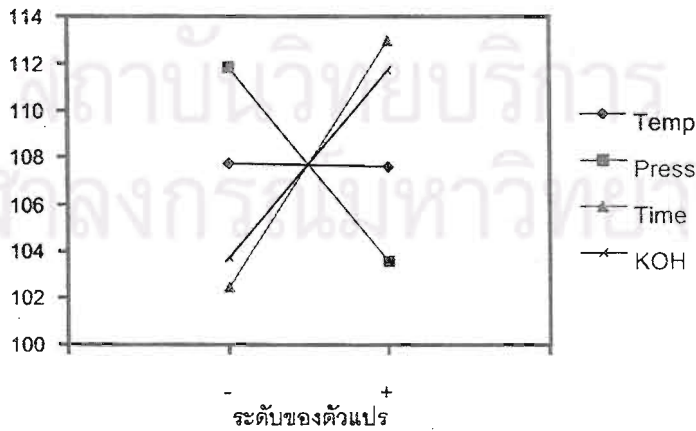
ค. ผลของปัจจัยต่างๆต่อร้อยละการขจัดกำมะถันซัลเฟต

การขจัดกำมะถันซัลเฟตขึ้นกับเวลา ความดัน และการเติมโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4.8 และจากรูปที่ 4.9 การเพิ่มระดับของตัวแปรเหล่านี้ในช่วงที่ทำการศึกษาทำให้การขจัดกำมะถันซัลเฟตเพิ่มขึ้น กำมะถันซัลเฟตเกิดจากการออกซิเดชันของกำมะถันไฟไรต์ และมีปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับกำมะถันไฟไรต์และกำมะถันอินทรีย์ จึงไม่มีผลต่อการขจัดกำมะถันรวมมากนักแม้ว่าจะมีร้อยละการขจัดสูง



รูปที่ 4.8 Normal probability plot ของผลเนื่องจากปัจจัยหลักและปฏิกริยาสัมพันธ์ต่างๆที่มีต่อการขจัดกำมะถันซัลเฟต

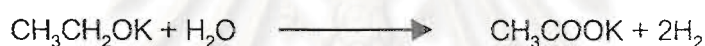
ค่าเฉลี่ยผลตอบสนอง



รูปที่ 4.9 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของการขจัดกำมะถันซัลเฟตเมื่อมีการเปลี่ยนระดับของตัวแปร

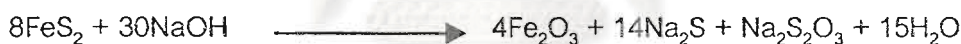
### ง. ผลของปัจจัยต่างๆต่อร้อยละการขจัดกำมะถันไพไรต์

จากรูปที่ 4.10 พบว่าตัวแปรที่มีผลคืออุณหภูมิและโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ รูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนระดับของตัวแปรจากระดับต่ำไปสูงทำให้แนวโน้มการขจัดกำมะถันไพไรต์ดีขึ้น การเพิ่มอุณหภูมิและการเติมโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้โครงสร้างของถ่านหินแตกตัวกำมะถันไพไรต์ที่มีขนาดเล็กที่แทรกตัวอยู่ในถ่านหินจึงถูกขจัดออกได้ดีขึ้น และเนื่องจากกำมะถันไพไรต์ส่วนใหญ่จะถูกขจัดออกในรูปของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $H_2S$ ) ดังนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ สารอินทรีย์ในถ่านหินมีการแตกตัวให้ไฮโดรเจนได้มากขึ้น ซึ่งไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นนี้จะทำปฏิกิริยากับกำมะถันที่เกิดจากการแตกตัวของกำมะถันไพไรต์ การเติมโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ช่วยให้การขจัดกำมะถันไพไรต์เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองที่ภาวะเดียวกันแต่ไม่มีการเติมโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ อาจเนื่องจากปฏิกิริยาของเอทานอลกับโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ทำให้เกิดแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น ดังสมการ (Li and Guo, 1996)



นอกจากนี้กำมะถันไพไรต์สามารถเกิดปฏิกิริยากับสารละลายเบสได้ดังสมการ

(Elliott, 1978)

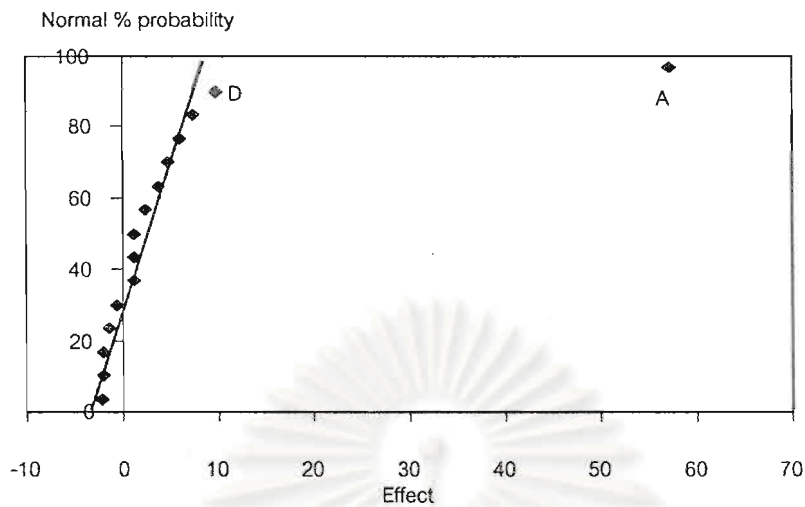


ดังนั้นในงานวิจัยนี้ซึ่งใช้โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์จึงอาจเกิดปฏิกิริยาการขจัด

กำมะถันไพไรต์ได้ในทำนองเดียวกันคือ

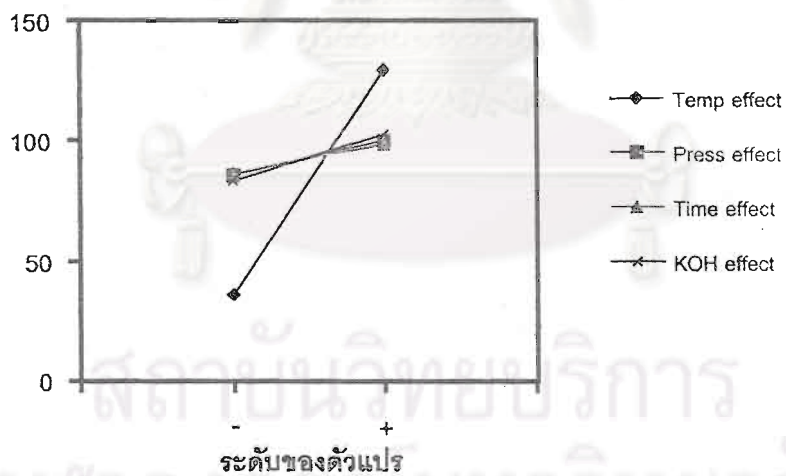


สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.10 Normal probability plot ของผลเนื่องจากปัจจัยหลักและปฏิริยาสัมพันธ์ต่างๆที่มีต่อการกำจัดกำมะถันไฟโรต์

ค่าเฉลี่ยผลตอบสนอง



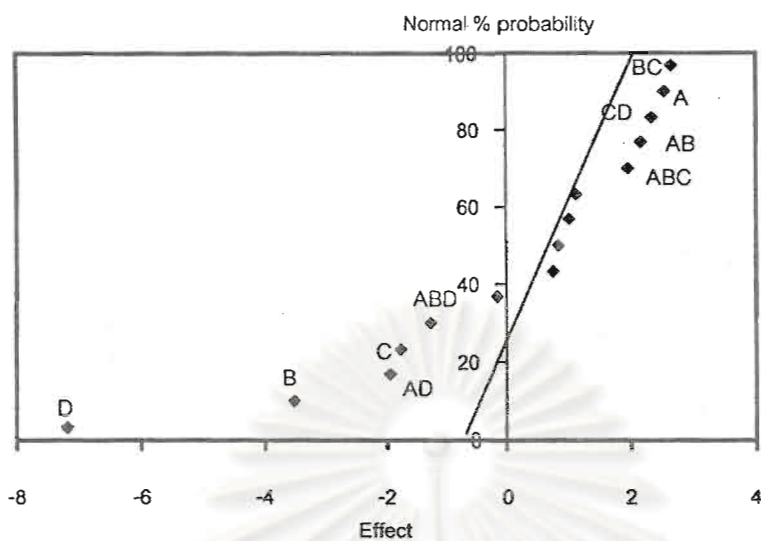
รูปที่ 4.11 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของการกำจัดกำมะถันไฟโรต์เมื่อมีการเปลี่ยนระดับของตัวแปร



#### จ. ผลของปัจจัยต่างๆต่อร้อยละการขจัดกำมะถันอินทรีย์

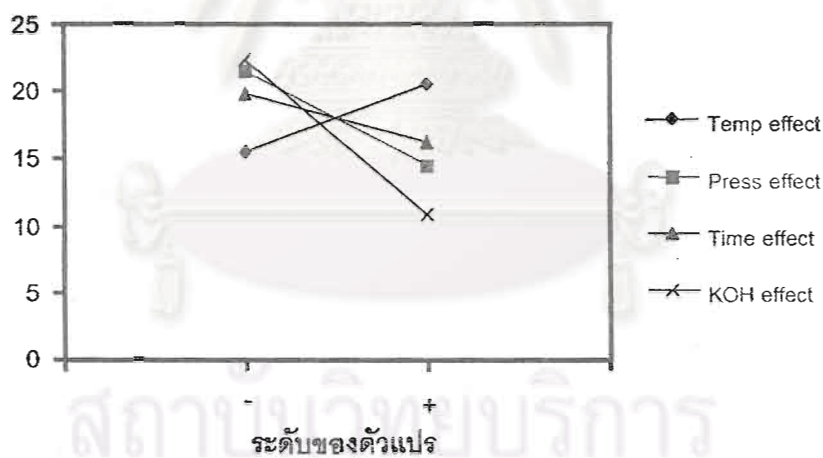
จากรูปที่ 4.12 และ 4.13 ตัวแปรอิสระทุกตัวในช่วงที่ทำการศึกษา มีผลต่อการขจัดกำมะถันอินทรีย์ การเพิ่มอุณหภูมิช่วยให้การขจัดกำมะถันอินทรีย์ดีขึ้น เนื่องจากกำมะถันอินทรีย์เป็นกำมะถันที่สร้างพันธะเคมีกับโครงสร้างของถ่านหินและเป็นพันธะที่มีเสถียรภาพจึงต้องใช้อุณหภูมิสูงในการสลายพันธะ การขจัดกำมะถันอินทรีย์จะเกิดได้ดีที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสขึ้นไป แต่ในงานวิจัยนี้ไม่สามารถทำที่อุณหภูมิสูงถึง 400 องศาเซลเซียสเพราะจะทำให้การสูญเสียน้ำหนักของถ่านหินสูงมากกว่าร้อยละ 25 และถ่านหินเสถียรภาพคือหลอมเกาะตัวเป็นก้อน การเพิ่มความดัน และเวลาทำให้แนวโน้มการขจัดลดลง การเติมโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ในช่วงที่ทำการศึกษาทำให้การขจัดกำมะถันอินทรีย์ลดลงด้วยเช่นกัน จากตารางที่ 4.4 สังเกตได้ว่าการขจัดกำมะถันอินทรีย์ลดลงในขณะที่การขจัดกำมะถันไพไรต์สูงขึ้น อาจเกิดจากกำมะถันที่แตกตัวจากไพไรต์มีมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงและมีการเติมโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ แต่อุณหภูมิและปฏิกิริยาระหว่างเอทานอลกับโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ที่เติมไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดแก๊สไฮโดรเจนปริมาณมากพอที่จะทำปฏิกิริยากับกำมะถันที่แตกตัว และโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้โครงสร้างของถ่านหินเกิดการเปลี่ยนแปลงและอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้ความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาของพันธะต่างๆในถ่านหินเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นถ้าปริมาณกำมะถันและแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์รอบๆอนุภาคถ่านหินมีมาก โอกาสที่จะเกิดพันธะระหว่างคาร์บอนกับกำมะถัน (C-S) ในรูปของกำมะถันอินทรีย์จึงอาจเกิดขึ้นได้ (Ibarra et. al., 1994 and Chen et. al., 1998) นอกจากนี้ปริมาณสารอินทรีย์ในถ่านหินก็มีผลต่อประสิทธิภาพในการขจัดกำมะถันด้วยเช่นกัน โดยเฉพาะสารอินทรีย์ที่เกิดจากธาตุหมู่ที่ 1 อาจเกิดปฏิกิริยากับกำมะถันและแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดเป็นสารประกอบซัลไฟด์ประเภทอื่นที่ไม่สามารถวิเคราะห์ทางเคมีได้ ทำให้ประสิทธิภาพการขจัดกำมะถันต่ำลงและการประมาณค่าของกำมะถันอินทรีย์มากกว่าความเป็นจริง (Gryglewicz, 1995 and Chen et. al., 1998)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.12 Normal probability plot ของผลเนื่องจากปัจจัยหลักและปฏิกริยาสัมพันธ์ต่างๆที่มีต่อการจัดกำมะถันอินทรีย์

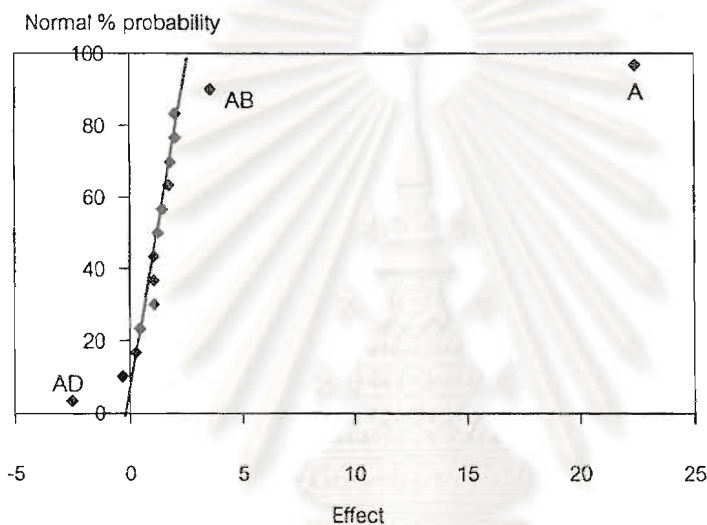
ค่าเฉลี่ยผลตอบสนอง



รูปที่ 4.13 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของการจัดกำมะถันอินทรีย์เมื่อมีการเปลี่ยนระดับของตัวแปร

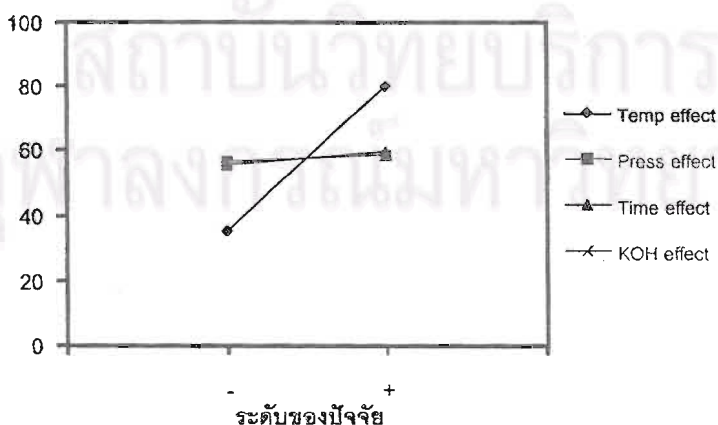
จ. ผลของปัจจัยต่างๆ ต่อร้อยละการขจัดกัมมันตรวม

จากรูปที่ 4.14 แสดงว่าตัวแปรอิสระที่มีผลต่อร้อยละการขจัดกัมมันตรวมคือ อุณหภูมิ เนื่องจากการขจัดกัมมันตรวมส่วนใหญ่ในถ่านหินซึ่งได้แก่กัมมันตฟิโรตและกัมมันตอินทรีย์ขึ้นกับอุณหภูมิด้วยเช่นกัน จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่าความดันและโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ไม่มีผลต่อการขจัดกัมมันตรวมโดยตรง เพราะผลเนื่องจากความดันหรือโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียวไม่มีความสำคัญ แต่ผลของปัจจัยทั้งสองจะขึ้นกับการเปลี่ยนระดับของอุณหภูมิด้วยดังจะเห็นได้ว่ามีปฏิริยาสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับความดัน และอุณหภูมิกับโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 4.14 Normal probability plot ของผลเนื่องจากปัจจัยหลักและปฏิริยาสัมพันธ์ต่างๆที่มีต่อการขจัดกัมมันตรวม

ค่าเฉลี่ยผลตอบสนอง



รูปที่ 4.15 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของการขจัดกัมมันตรวมเมื่อมีการเปลี่ยนระดับของตัวแปร

ตารางที่ 4.9 แสดงการเปรียบเทียบผลของการสกัดกัมมะถันรวมของงานวิจัยอื่นๆกับงานวิจัยนี้ ในงานวิจัยนี้ใช้ภาวะที่รุนแรงน้อยกว่างานวิจัยอื่นที่ทำการสกัดที่ภาวะเหนือวิกฤตเช่นเดียวกันและให้ผลการสกัดกัมมะถันต่ำกว่า เนื่องจากกัมมะถันส่วนใหญ่ในถ่านหินซึ่งอยู่ในรูปกัมมะถันไฟไรต์และกัมมะถันอินทรีย์ต้องใช้อุณหภูมิสูงในการสกัด

ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบผลการสกัดกัมมะถันรวมของงานวิจัยอื่นๆกับงานวิจัยนี้

ผู้วิจัย	ตัวทำละลาย	ภาวะการทดลอง	ร้อยละการสกัดกัมมะถันรวม
Li and Guo	Ethanol Ethanol/KOH	Supercritical 400 °C	30-59
Meffe et al.	Methanol	Supercritical 400-450 °C	34-53
Hippo et al.	Methanol/KOH	Supercritical 400 °C	33-65
สุพรรณิ รัตนกานตะดิลก	Methanol/H <sub>2</sub> O	120-180 °C	40-62
กฤติกา จารุทะวีย์	Ethanol Ethanol-KOH	Supercritical 250-350 °C	13.7-47.7

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อร้อยละผลได้ของถ่านหินได้แก่อุณหภูมิ การเพิ่มอุณหภูมิทำให้ถ่านหินเกิดการสูญเสียน้ำหนักมากขึ้น
2. ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อร้อยละการขจัดเถ้ามากที่สุดได้แก่โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ การเติมโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ช่วยให้การขจัดเถ้าดีขึ้น
3. ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อร้อยละการขจัดกำมะถันรวมได้แก่อุณหภูมิและเวลา การเพิ่มอุณหภูมิและเวลาทำให้แนวโน้มการขจัดกำมะถันรวมดีขึ้น
4. ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อร้อยละการขจัดกำมะถันซัลเฟตได้แก่ความดัน เวลา และโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์
5. ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อร้อยละการขจัดกำมะถันไพไรต์และกำมะถันอินทรีย์ได้แก่อุณหภูมิและโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ การขจัดกำมะถันไพไรต์และกำมะถันอินทรีย์ดีขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ แต่การเติมโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้การขจัดกำมะถันอินทรีย์ต่ำลงซึ่งแตกต่างจากการขจัดกำมะถันไพไรต์ที่ดีขึ้นเมื่อเติมโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์
6. การขจัดกำมะถันทั้งจากถ่านหินที่มีกำมะถันต่ำและสูงต้องใช้ภาวะในการขจัดที่รุนแรงคืออุณหภูมิและความดันสูง โดยเฉพาะถ่านหินที่มีปริมาณกำมะถันอินทรีย์สูง
7. ภาวะที่เหมาะสมที่สามารถขจัดกำมะถันรวมได้สูงสุดคือ  
ถ่านหินกำมะถันต่ำ

อุณหภูมิ = 350 องศาเซลเซียส

ความดัน = 6.89 เมกะปาสคาล

เวลา = 60 นาที

โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ = 3 กรัมต่อลิตร

ร้อยละการขจัดกำมะถันรวม = 44.1

ร้อยละการขจัดกำมะถันซัลเฟต = 12.6

ร้อยละการขจัดกำมะถันไพไรต์ = 61.1

ร้อยละการขจัดกำมะถันอินทรีย์ = 45.7

#### ถ่านหินกำมะถันสูง

อุณหภูมิ = 350 องศาเซลเซียส

ความดัน = 8.27 เมกะปาสคาล

เวลา = 60 นาที

ไปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ = 5 กรัมต่อลิตร

ร้อยละการขจัดกำมะถันรวม = 47.7

ร้อยละการขจัดกำมะถันซัลเฟต = 58.0

ร้อยละการขจัดกำมะถันไพไรต์ = 89.4

ร้อยละการขจัดกำมะถันอินทรีย์ = 8.8

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาลักษณะการกระจาย สมบัติทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของกำมะถันรูปต่างๆ ในถ่านหิน เพื่อประโยชน์ในการเลือกวิธีการและภาวะในการขจัดที่เหมาะสม
2. ควรใช้เตาเผาชนิดอื่นที่มีอุณหภูมิต่ำเหมาะสมตลอดทั้งเตา
3. วิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สและของเหลวที่เกิดจากปฏิกิริยาว่ามีสารประกอบใดบ้างที่มีคุณค่าและสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ต่อไป

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

ฉัตรชัย ฉัตรเจริญมิตร. การขจัดกำมะถันจากถ่านหินโดยไพโรไลซิสที่อุณหภูมิต่ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาเคมีเทคนิค บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.

มณฑไพด แห่งทรัพย์สิน์เจลีก. จลนพลศาสตร์การขจัดกำมะถันในถ่านหินด้วยกระบวนการเมเยอร์ส. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาเคมีเทคนิค บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.

สุพร. การขจัดกำมะถันจากถ่านหินด้วยเมทานอล-น้ำและเมทานอล-ไฮโดรเจนซัลไฟด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาเคมีเทคนิค บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.

สุรพล อุปติสสกุล. สถิติ : การวางแผนการทดลองเล่ม 1. พิมพ์ครั้งที่ 3. สหมิตรออฟเซต : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2536.

อุทัย ไสธนะพันธ์ และ รพีพล ภโวภาท. Supercritical fluids ตอนที่ 1 : หลักการเบื้องต้น. วารสารศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 3 (มิถุนายน 2536) : 37-50.

### ภาษาอังกฤษ

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

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

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

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

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

- ASTM Standard, D 3286. Gross Calorific Values of Coal and Coke by the Isothermal-Jacket Bomb Calorimeter : American Society for Testing Materials. U.S.A., 1989.
- Box, G.E.P. and Behnken, D.W. Technometrics 2 (1960) : 459.
- Chen H., Li B., Yang J. and Zhang B. Transformation of sulfur during pyrolysis and hydrolysis of coal. Fuel 77 (1998) : 487-493.
- Elliott, R. C. Coal desulfurization prior to combustion. 1<sup>st</sup> ed. : New Jersey Noyes Data Corporation, 1978.
- Garcia R., Moinelo, S.R. and Snape, C.E. A spectroscopic study of structural changes occurring in supercritical gas extraction of Spanish lignite with alcohols. Fuel 72 (1993) : 427-433.
- Gryglewicz G. Sulfur transformations during pyrolysis of a high sulfur polish coking coal. Fuel 74 (1995) : 356-361.
- Ibarra, J.V., Bonet, A.J. and Moliner R. Release of volatile sulfur compounds during low temperature pyrolysis of coal. Fuel 73 (1994) : 933-939.
- Ibarra, J.V., Palacios, J.M., Moliner R. and Bonet, A.J. Evidence of reciprocal organic matter-pyrite interactions affecting sulfur removal during coal pyrolysis. Fuel 73 (1994) : 1046-1050.
- Li W. and Guo S. Supercritical desulfurization of high rank coal with alcohol-water and alcohol-KOH. Fuel Processing Technology 46 (1996): 143-155.
- Lugue de Castro, M.D., Valcarcel M. and Tena M.T. Analytical supercritical fluid extraction. Germany : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1994.
- Masahiro S., Takahiro M. and Kunio A. Co-solvent effect of tetralin or ethanol on supercritical toluene extraction of coal. Fuel 70 (1991) : 545-549.
- Mayer, R. A. Coal Desulfurization. New York : Marcel Dekker, Inc., 1977.
- Meffe, S., Perkson A., and Trass, O. Coal beneficiation and organic sulfur removal. Fuel 75 (1996): 25-30.
- Merrick D. Coal combustion and conversion technology. London : Macmillan Publishers LTD. 1984.
- Montgomery, D.C. Design and analysis of experiments. United States of America : John Wiley & Sons, Inc., 1976.
- Pajares, J. A. and Tascon, J. M. D. Coal science volume II. London : Elsevier. 1995.



Sugawara K., Abe K., Sugawara T., Nishiyama Y and Sholes, M.A. Dynamic behaviour of sulfur forms in rapid pyrolysis of coals with alkali treatment. Fuel 74 (1995) : 1823-1829.

Tadafumi A., Shun-ichi T., Shinji A. and Kunio A. A new two-stages process for supercritical fluid extraction of coal with tetralin pretreatment. Fuel 75 (1996) : 1124-1128.



สถาบันวิจัยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

### การวิเคราะห์สมบัติถ่านหิน

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

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

###### หลักการ

นำตัวอย่างถ่านหินที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 250 ไมโครเมตร มาให้ความร้อนในตู้อบ (drying oven) ที่อุณหภูมิประมาณ 105-110 องศาเซลเซียสเพื่อให้ไอน้ำระเหยจากถ่านหิน ค่าความชื้นคำนวณได้จากน้ำหนักของถ่านหินที่หายไป

###### เครื่องมือ

1. ตู้อบ
2. ถ้วยกระเบื้อง (porcelain crucible) พร้อมฝาปิด
3. เดสซิเคเตอร์ (desiccator)

###### วิธีการทดลอง

1. อบถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาในตู้อบที่อุณหภูมิ 105-110 องศาเซลเซียส ประมาณ 30 นาที ทิ้งให้เย็นในเดสซิเคเตอร์ประมาณ 15 นาที ชั่งน้ำหนักและบันทึกผล
2. ชั่งตัวอย่างถ่านหินประมาณ 1 กรัม ใส่ถ้วยกระเบื้องที่ทราบน้ำหนักแน่นอน ปิดฝาทันที บันทึกน้ำหนักตัวอย่างถ่านหิน
3. นำเข้าตู้อบที่อุณหภูมิประมาณ 105-110 องศาเซลเซียสนาน 1 ชั่วโมง (จนกระทั่งน้ำหนักของตัวอย่างถ่านหินคงที่)
4. นำถ้วยกระเบื้อง ใส่ในเดสซิเคเตอร์ ทิ้งให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้อง ชั่งน้ำหนักของถ้วยกระเบื้องที่มีตัวอย่างถ่านหินที่อบแล้วพร้อมฝาปิด บันทึกผล

###### การคำนวณ

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

เมื่อ

$$M = \text{ร้อยละของปริมาณความชื้น}$$

- $W_1$  = น้ำหนักของถาดอะลูมิเนียมพร้อมฝาปิด รวมน้ำหนักถ่านหินเริ่มต้นก่อนอบ (กรัม)  
 $W_2$  = น้ำหนักของถาดอะลูมิเนียมพร้อมฝาปิด รวมน้ำหนักถ่านหินหลังการอบ (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

นำตัวอย่างถ่านหินที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 250 ไมโครเมตร มาให้ความร้อนในเตาเผา (muffle furnace) ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียสจนน้ำหนักคงที่ ร้อยละปริมาณเถ้าคำนวณจากน้ำหนักที่เหลืออยู่หลังการเผา

### เครื่องมือ

1. เตาเผา
2. ถ้วยกระเบื้องพร้อมฝา
3. เดสซิเคเตอร์

### วิธีการทดลอง

1. เมาถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียสนาน 1 ชั่วโมง นำออกมาทำให้เย็นในเดสซิเคเตอร์ ชั่งน้ำหนัก และบันทึกผล
2. ชั่งตัวอย่างถ่านหินประมาณ 1 กรัม ใส่ในถ้วยกระเบื้องที่ทราบน้ำหนักแน่นอน ปิดฝาทันที บันทึกน้ำหนักตัวอย่างถ่านหิน (หรืออาจใช้ตัวอย่างถ่านหินที่ผ่านการอบหาความชื้นแล้ว)
3. นำถ้วยกระเบื้องที่มีตัวอย่างถ่านหินพร้อมฝา เข้าเตาเผาที่อุณหภูมิห้องโดยไม่ต้องปิดฝา ค่อยๆ ให้ความร้อนด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่ทำให้อุณหภูมิของเตาเผาถึง 450-500 องศาเซลเซียส ภายใน 1 ชั่วโมง
4. นำถ้วยกระเบื้องและฝาดูออกจากเตาเผา ปิดฝาและทิ้งให้เย็นในเดสซิเคเตอร์ ชั่งน้ำหนักและบันทึกผล

### การคำนวณ

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

เมื่อ

A	=	ร้อยละของเถ้า
$W_3$	=	น้ำหนักของครุชชีเบลพร้อมฝา และเถ้า (กรัม)
$W_4$	=	น้ำหนักของครุชชีเบลพร้อมฝา (กรัม)
W	=	น้ำหนักตัวอย่างถ่านหิน (กรัม)

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

#### หลักการ

นำตัวอย่างถ่านหินที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 250 ไมโครเมตร ให้ความร้อนในเตาเผาแบบท่อ(tubular furnace) ปริมาณสารระเหยคำนวณได้จากน้ำหนักของตัวอย่างถ่านหินที่หายไป

#### เครื่องมือ

1. เตาเผาแบบท่อ
2. ถ้วยทำจากนิกเกิล (nickel crucible) พร้อมฝา
3. เดสซิเคเตอร์

#### วิธีการทดลอง

1. เมาครุชชีเบลพร้อมฝาในเตาเผาอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที
2. นำออกจากเตาเผา ทิ้งให้เย็นในเดสซิเคเตอร์จนถึงอุณหภูมิห้อง ชั่งน้ำหนักของครุชชีเบลพร้อมฝา บันทึกผล
3. ชั่งตัวอย่างถ่านหินประมาณ 1 กรัม ใส่ในถ้วยนิกเกิลที่ทราบน้ำหนักแน่นอน ปิดฝาให้สนิท บันทึกน้ำหนักตัวอย่าง
4. นำถ้วยนิกเกิลพร้อมตัวอย่างถ่านหินเผาในเตาเผาแบบท่อ ให้ความร้อนเป็นช่วง เริ่มต้นให้ความร้อนแก่ถ่านหินที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส นาน 6 นาที และ 950 องศาเซลเซียสอีก 6 นาทีตามลำดับ
5. นำถ้วยนิกเกิลออกจากเตาเผา ทิ้งให้เย็นในเดสซิเคเตอร์ ชั่งน้ำหนักของถ้วยนิกเกิลพร้อมฝาและถ่านหินที่เหลือ บันทึกผล

#### การคำนวณ

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

เมื่อ

$$V = \text{ร้อยละของสารระเหย}$$

$$M = \text{ร้อยละของความชื้น}$$

$$\begin{aligned}
 W_5 &= \text{น้ำหนักของครุชชีเบิลพร้อมฝาและน้ำหนักของถ่านหินก่อนเผา} \\
 &\quad \text{(กรัม)} \\
 W_6 &= \text{น้ำหนักของครุชชีเบิลพร้อมฝาและน้ำหนักของถ่านหินหลังเผา} \\
 &\quad \text{(กรัม)} \\
 W &= \text{น้ำหนักตัวอย่างถ่านหินเริ่มต้น (กรัม)}
 \end{aligned}$$

#### 1.4 ปริมาณคาร์บอนคงตัวในตัวอย่างถ่านหิน

##### การคำนวณ

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

## 2. การหาค่าความร้อนของถ่านหิน (Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke by Adiabatic Bomb Calorimeter : ASTM D 2015)

### หลักการ

เผาตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ภายใต้บรรยากาศแก๊สออกซิเจน ความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ภายในบอมบ์จะถ่ายเทให้กับน้ำที่อยู่รอบๆ ค่าความร้อนคำนวณได้จากผลคูณของความแตกต่างของอุณหภูมิน้ำ (ก่อนและหลังการจุดระเบิด) กับค่าความจุความร้อนของเครื่องแคลอริมิเตอร์ (calorimeter) ซึ่งหาได้จากการเผากรดเบนโซอิก (benzoic acid) ภายใต้ภาวะเดียวกัน

### เครื่องมือ

Adiabatic bomb calorimeter

### สารเคมี

1. น้ำกลั่น
2. กรดเบนโซอิก ( $C_6H_5COOH$ ) ควรได้มาตรฐานของ National Institute of Standard and Technology
3. เมทิลออเรนจ์ (methyl orange), เมทิลเรด (methyl red) หรือเมทิลเพอเพิล (methyl purple)
4. แก๊สออกซิเจน ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5
5. สารละลายมาตรฐานโซเดียมคาร์บอเนต ความเข้มข้น 0.0709 N (3.76 กรัมต่อลิตร) สารละลายนี้ปริมาตร 1 มิลลิลิตรมีค่าเท่ากับ 1 แคลอรี (4.2 จูล)
6. น้ำล้างบอมบ์ ละลายสารละลายเมทิลออเรนจ์เข้มข้น 1 มิลลิลิตรในน้ำกลั่น 1 ลิตร

## วิธีการวิเคราะห์

การหาค่าความจุความร้อนมาตรฐานของบอมบ์แคลอรีมิเตอร์

1. ชั่งกรดเบนโซอิกประมาณ 1 กรัม ใส่ในถ้วยใส่ตัวอย่างของเครื่อง
2. ตัดลวด (fuse wire) ความยาวประมาณ 10 เซนติเมตร ผูกที่ปลายทั้งสองข้างของส่วนจุดระเบิด ให้ลวดแตะผิวถ่านในถ้วย
3. ล้างภายในบอมบ์ให้สะอาดด้วยน้ำกลั่น และเติมน้ำกลั่นลงในบอมบ์ 1 มิลลิลิตร
4. ประกอบบอมบ์ ปิดฝาให้แน่น อัดแก๊สออกซิเจนจนมีความดัน 20-30 บรรยากาศ และต้องเท่ากันทุกครั้ง ระวังอย่าให้ตัวอย่างกระจายจากถ้วยใส่ตัวอย่าง
5. ปรับอุณหภูมิของน้ำให้ต่ำกว่าอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้องประมาณ 1-2 องศาเซลเซียส ซึ่งให้น้ำหนัก 2000 กรัมใส่ในถังของเครื่อง
6. นำบอมบ์ที่อัดแก๊สออกซิเจนแล้ววางลงในถังน้ำที่ปรับอุณหภูมิ อย่าให้มีฟองแก๊สออกซิเจนรั่วจากบอมบ์ ต่อหัวไฟฟ้าสำหรับจุดระเบิด เปิดเครื่องกวน
7. ทิ้งไว้ 5 นาทีเพื่อให้อุณหภูมิต่างที่ ปรับอุณหภูมิของน้ำในเครื่องให้เท่ากัน
8. เมื่ออุณหภูมิของน้ำคงที่ บันทึกเป็นอุณหภูมิเริ่มต้น ( $t_1$ ) กดปุ่มจุดระเบิด
9. คอยปรับอุณหภูมิของน้ำทั้งสองที่ให้เท่ากัน เมื่ออุณหภูมิต่างที่อีกครั้ง บันทึกอุณหภูมินั้นๆ เป็นอุณหภูมิสุดท้าย ( $t_2$ )
10. ปิดเครื่องและนำบอมบ์ออกจากเครื่อง ค่อยๆลดความดัน ถังภายในมีเขม่าหรือเผาไหม้ไม่หมดให้ทำใหม่
11. ล้างภายในบอมบ์ทุกส่วนด้วยน้ำล้างที่เตรียมไว้ จนหมดความเป็นกรด และมีปริมาตร 250 มิลลิลิตร ไตเตรตน้ำล้างด้วยสารละลายมาตรฐานโซเดียมคาร์บอเนต บันทึกปริมาตรที่ใช้
12. วัดความยาวลวดที่เหลือ บันทึกผล

## การคำนวณ

$$E = [(Hg) + e_1 + e_2]/t \quad \text{cal}^\circ\text{C}$$

เมื่อ

- $E$  = ค่าความจุความร้อนของเครื่องแคลอรีมิเตอร์
- $H$  = ความร้อนการเผาไหม้ของกรดเบนโซอิก (แคลอรีต่อกรัม)
- $g$  = น้ำหนักกรดเบนโซอิกที่ใช้ (กรัม)
- $e_1$  = ปริมาตรของสารละลายที่ใช้ไตเตรต (มิลลิลิตร), 1 มิลลิลิตรเทียบเท่ากับ 1 แคลอรี
- $e_2$  = ความยาวลวดที่ถูกเผาไหม้ (เซนติเมตร)  $\times$  2.33 (แคลอรีต่อเซนติเมตร)

$$t = t_f - t_i \text{ (องศาเซลเซียส)}$$

การหาค่าความร้อนของถ่านหิน

ทำการทดลองเหมือนที่กล่าวมาทุกประการตั้งแต่ข้อ 1-12 โดยเปลี่ยนจากกรดเบนโซอิกเป็นถ่านหิน แล้วคำนวณค่าความร้อนได้จากสมการต่อไปนี้

$$Q_v(\text{gross}) = [(tE) - e_1 - e_2 - e_3]/g \quad \text{cal/g}$$

เมื่อ

$$Q_v(\text{gross}) = \text{ค่าความร้อนของถ่านหิน (แคลอรีต่อกรัม)}$$

$$t = t_f - t_i \text{ (องศาเซลเซียส)}$$

$$E = \text{ค่าความจุความร้อนของเครื่องแคลอริมิเตอร์ (แคลอรีต่อองศาเซลเซียส)}$$

$$e_1 = \text{ปริมาตรของสารละลายที่ใช้ไตเตรต (มิลลิลิตร), 1 มิลลิลิตรเทียบเท่ากับ 1 แคลอรี}$$

$$e_2 = \text{ความยาวหลอดที่ถูกเผาไหม้ (เซนติเมตร) \times 2.3 (แคลอรีต่อเซนติเมตร)}$$

$$e_3 = 13.18 \text{ (แคลอรีต่อกรัม)} \times \text{ร้อยละกำมะถันรวม} \times \text{น้ำหนักถ่านหินที่ใช้ (กรัม)}$$

### 3. การวิเคราะห์ปริมาณกำมะถันรวมและรูปแบบกำมะถัน (Total Sulfur and Forms of Sulfur : ASTM D 2492 and D 3177)

#### 3.1 ปริมาณกำมะถันรวม (Standard Test Method for Total Sulfur in the Analysis

Sample of Coal and Coke : ASTM D 3177 Method B : Bomb Washing Method)

#### หลักการ

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

#### เครื่องมือ

1. เตาเผา (muffle furnace)
2. ถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาปิด
3. เดสซิเคเตอร์

#### สารเคมี

1. น้ำกลั่น
2. แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น (conc.  $\text{NH}_4\text{OH}$ ) ความถ่วงจำเพาะ 0.90



3. สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เจือจาง (1+10) ผสมแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 ส่วนกับน้ำกลั่น 10 ส่วนโดยปริมาตร
4. กรดเกลือ (1+1) ผสมกรดเกลือเข้มข้น 1 ส่วนกับน้ำกลั่น 1 ส่วนโดยปริมาตร
5. สารละลายแบเรียมคลอไรด์ ( $\text{BaCl}_2$ ) ละลายแบเรียมคลอไรด์ 100 กรัมในน้ำกลั่นและเจือจางให้ได้ปริมาตร 1 ลิตร
6. สารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ( $\text{AgNO}_3$ ) ละลายซิลเวอร์ไนเตรต 0.43 กรัมในน้ำกลั่น และปรับปริมาตรสารละลายให้เป็น 100 มิลลิลิตร
7. กระดาษกรองเบอร์ 1 และเบอร์ 42

#### วิธีการทดลอง

1. นำน้ำที่ได้จากการล้างบอมบ์และไตเตรตแล้วมาปรับให้เป็นกลางด้วยสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เจือจาง (จาก pH = 5.5 เป็น pH = 7.0)
2. นำไปต้มจนเดือดแล้วกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 ล้างกระดาษกรองให้ทั่วด้วยน้ำร้อน 5-6 ครั้ง
3. เติมกรดเกลือ (1+1) 1 มิลลิลิตร นำไปต้มและเติมสารละลายแบเรียมคลอไรด์ 10 มิลลิลิตรทีละน้อยด้วยปิเปต คนให้ทั่วตลอดเวลา ต้มต่อให้เดือดอีก 15 นาที ตั้งทิ้งไว้ค้างคืนหรืออย่างน้อย 2 ชั่วโมง
4. กรองตะกอนแบเรียมซัลเฟตด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 ล้างด้วยน้ำร้อนจนหมดแบเรียมคลอไรด์ (ทดสอบได้ด้วยวิธีการหยดสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตลงในน้ำล้างตะกอน 8-10 มิลลิลิตรแล้วน้ำไม่ขุ่น)
5. นำกระดาษกรองที่มีตะกอนแบเรียมซัลเฟตใส่ด้วยกระเบื้องที่ทราบน้ำหนักแน่นอน ห่อกระดาษหลวมๆ เพื่อป้องกันตะกอนกระเด็นออกจากถ้วย
6. เฝ้าที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสจนน้ำหนักคงที่ นำออกจากเตาเผา ปิดฝาและทิ้งให้เย็นในเดสซิเคเตอร์
7. ชั่งน้ำหนักและบันทึกผล

#### การคำนวณ

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

เมื่อ

A = น้ำหนักตะกอนแบเรียมซัลเฟต( $\text{BaSO}_4$ )จากตัวอย่าง (กรัม)

B = น้ำหนักตะกอนแบเรียมซัลเฟตจากตัวอย่าง (กรัม)

C = น้ำหนักตัวอย่างด้านหินเริ่มต้น (กรัม)

### 3.2 รูปแบบกำมะถันในถ่านหิน (Standard Test Method for Forms of Sulfur in Coal : ASTM D 2492)

#### หลักการ

กำมะถันซัลเฟตแยกได้โดยกรดเกลือ และกำมะถันไฟไรต์สามารถคำนวณได้จากปริมาณธาตุเหล็กที่เป็นองค์ประกอบ ส่วนกำมะถันอินทรีย์คำนวณได้จากผลต่างของกำมะถันรวมกับกำมะถันซัลเฟตและไฟไรต์

#### 3.2.1 กำมะถันซัลเฟต

##### เครื่องมือ

1. เตาเผา
2. ครุฑิเบลทำจากกระเบื้อง พร้อมฝาปิด

##### สารเคมี

1. แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น (ความถ่วงจำเพาะ 0.90)
2. สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (1:10)
3. สารละลายแบเรียมคลอไรด์ (100 กรัมต่อลิตร)
4. น้ำโบรมีนอิ่มตัว เดิมโบรมีนมากเกินไปในน้ำ 1 ลิตร (ความสามารถในการละลาย 42 กรัมต่อลิตร)
5. เอธานอล
6. กรดเกลือเข้มข้น (ความถ่วงจำเพาะ 1.19)
7. สารละลายกรดเกลือ (2:3) ผสมกรดเกลือเข้มข้น 2 ส่วนกับน้ำกลั่น 3 ส่วนโดยปริมาตร
8. สารละลายเมทิลออเรนจ์ ละลายเมทิลออเรนจ์ 0.02 กรัมในน้ำร้อน 100 มิลลิลิตร และกรอง
9. สารละลายซิลเวอร์ไนเตรต (0.43 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร)

##### วิธีการทดลอง

1. ชั่งตัวอย่างน้ำหนัก 2-5 กรัม ใส่ในปิกเกอร์
2. เติมกรดเกลือ (2:3) ปริมาตร 50 มิลลิลิตรที่ละน้อย พร้อมคนให้ทั่ว
3. เติมเอธานอล 2-3 หยด ต้มให้เดือดอ่อนๆ นาน 30 นาที
4. กรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 ล้างด้วยน้ำร้อนหลายๆครั้ง จนกระทั่งไม่มีกรดเกลือค้างอยู่บนกระดาษกรอง เก็บตะกอนที่ได้จากการกรองเพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณไฟไรต์ต่อไป

5. เติมน้ำโบรมีนอิ่มตัว 5 มิลลิลิตร ต้มให้เดือดอย่างน้อย 5 นาที เพื่อออกซิไดซ์เหล็กและไลโบรมีนที่มากเกินไป ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
6. ตกตะกอนเหล็กโดยค่อยๆเติมแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น จนกระทั่งสารละลายเป็นเบสเล็กน้อยเมื่อทดสอบด้วยกระดาษลิตมัส เติมแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ให้มากเกินไปอีก 5 มิลลิลิตร และคนตลอดเวลา
7. กรองตะกอนด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 ล้างตะกอนด้วยสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (1:10) ที่ร้อนหลายๆครั้ง
8. เติมกรดเกลือเข้มข้นลงในสารละลายที่กรองได้ จนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนเป็นสีชมพูเมื่อใช้เมทิลออเรนจ์เป็นอินดิเคเตอร์ เติมกรดเกลือเข้มข้นให้เกินพออีก 1 มิลลิลิตร
9. ต้มสารละลายที่กรองได้ให้เดือด ค่อยๆเติมสารละลายแบเรียมคลอไรด์ปริมาตร 10 มิลลิลิตรลงไปช้าๆโดยใช้ปิเปต ต้มให้เดือดต่ออีก 15 นาที ทิ้งไว้ค้างคืนที่อุณหภูมิห้อง
10. กรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 ล้างตะกอนด้วยน้ำร้อนหลายๆครั้ง จนน้ำล้างตะกอนปราศจากคลอไรด์ไอออน ซึ่งทดสอบได้โดยการหยดสารละลายซิลเวอร์ไนเตรดแล้วไม่ทำให้ขุ่น
11. นำตะกอนที่กรองได้พร้อมกระดาษกรอง ใส่ในครุชีเบลล์ที่ทราบน้ำหนักแน่นอนเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง หรือจนกระทั่งน้ำหนักคงที่ นำออกจากเตาเผา และทิ้งให้เย็นในเดสซิเคเตอร์ ชั่งน้ำหนักและบันทึกผล

#### การคำนวณ

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

เมื่อ

A = น้ำหนักตะกอนแบเรียมซัลเฟตจากตัวอย่าง (กรัม)

B = น้ำหนักตะกอนแบเรียมซัลเฟตจาก blank (กรัม)

C = น้ำหนักถ่านหินเริ่มต้น (กรัม)

### 3.2.2 กำมะถันไฟไรต์

#### สารเคมี

1. สารละลายเหล็กมาตรฐาน
2. สารละลายแลนทานัม ละลายแลนทานัมคลอไรด์ ( $\text{LaCl}_3$ ) 175 กรัมใน น้ำกลั่นแล้วเจือจางเป็น 1 ลิตร
3. กรดไนตริก (1+7) ผสมกรดไนตริกเข้มข้น 1 ส่วนกับน้ำกลั่น 7 ส่วน

#### วิธีวิเคราะห์

1. เติมกรดไนตริก (1+7) 50 มิลลิลิตรลงในภาชนะที่ใส่ถ่านหินซึ่งผ่านการ สกัดกำมะถันซัลเฟตแล้ว นำไปต้มให้เดือดอ่อนๆ นาน 30 นาที
2. กรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 ล้างด้วยน้ำกลั่นจนมีปริมาตรเกือบ 200 มิลลิลิตร
3. เทสารละลายข้อ 2 ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 200 มิลลิลิตร เจือจางด้วย น้ำกลั่นจนมีปริมาตร 200 มิลลิลิตร
4. บีบเปิดสารละลายข้อ 3 มา 10 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วเติมสารละลายแลนทานัมคลอไรด์ 10 มิลลิลิตร
5. เจือจางด้วยกรดเกลือ (1+49) จนมีปริมาตร 100 มิลลิลิตร
6. นำสารละลายข้อ 5 มาวิเคราะห์ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชัน (atomic absorption spectrometer) โดยใช้ความยาวคลื่นในการ วิเคราะห์ดังนี้  
 ความยาวคลื่น 248.3 นาโนเมตร (ความเข้มข้นเหล็ก 0 ถึง 5 พีพีเอ็ม)  
 ความยาวคลื่น 372.0 นาโนเมตร (ความเข้มข้นเหล็ก 5 ถึง 100 พีพีเอ็ม)  
 ความยาวคลื่น 344.1 นาโนเมตร (ความเข้มข้นเหล็ก >100 พีพีเอ็ม)  
 Flame : air/acetylene (lean)
7. การเตรียมสารละลายสอบเทียบ (calibration solution) เตรียมสาร ละลายสอบเทียบให้มีความเข้มข้นครอบคลุมช่วงความเข้มข้นของสาร ละลายที่ต้องการทดสอบ โดยบีบเปิดสารละลายเหล็กมาตรฐานปริมาตร ที่เหมาะสมใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร เติมสารละลาย แลนทานัมคลอไรด์ 10 มิลลิลิตร เจือจางจนได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ด้วยกรดเกลือ (1+49)

### การคำนวณ

$$\text{กัมมะถันไฟไรต์, \%} = [F \times A \times V \times C \times P \times (T-B)]/W$$

เมื่อ

- F = 1.148, ค่าคงที่ไร้หน่วย
- A = 20, ค่าคงที่ไร้หน่วย
- V = 100 มิลลิลิตร, ปริมาตรสารละลายที่ต้องการทดสอบ
- C =  $10^{-6}$  กรัมต่อไมโครกรัม, แปลงหน่วยจากไมโครกรัมเป็นกรัม
- P = 100, ค่าคงที่ไร้หน่วยเพื่อเปลี่ยนจากสัดส่วนโดยน้ำหนักเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก
- T = ความเข้มข้นของเหล็กในสารละลายทดสอบ (ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร)
- B = ความเข้มข้นของเหล็กในสารละลายทดสอบ blank (ไมโคร-กรัมต่อมิลลิลิตร)
- W = น้ำหนักของถ่านหิน (กรัม)

### 3.2.3 กัมมะถันอินทรีย์

คำนวณจากผลต่างดังสมการ

$$\text{ร้อยละกัมมะถันอินทรีย์} = \text{ร้อยละกัมมะถันรวม} - \text{ร้อยละกัมมะถันซัลเฟต} - \text{ร้อยละกัมมะถันไฟไรต์}$$

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ข

### ตัวอย่างการคำนวณการวิเคราะห์ทางสถิติ

#### 1. การทดลองแบบแฟคทอเรียล

##### 1.1 สัญลักษณ์ของแฟคทอเรียล

ก. อักษรภาษาอังกฤษตัวใหญ่ (A, B, C) แทนปัจจัยที่ต้องการศึกษาเช่น อุณหภูมิ

↓

ฤษตัวใหญ่ที่เขียนรวมกัน (Combination) เช่น AB, AC, ABC หมายถึง (interaction)

ฤษตัวเล็กที่เขียนรวมกันเช่น ab, ac, abc หมายถึงการทดลองซึ่งเกิด

จากการรวมกันของอิทธิพลปัจจัยต่างๆเรียกว่า treatment combination

การทดลองที่แต่ละปัจจัยมีเพียง 2 ระดับ จะแทนแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยเป็น -1 และ +1

โดย -1 แทนระดับต่ำ และ +1 แทนระดับสูงตามลำดับ

ปัจจัย	ระดับ	
	-1	+1
อุณหภูมิ (A), °C	250	350
ความดัน (B), MPa	5.51	8.27
เวลา (C), min	30	60
โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ (D), g/L	0	5

สัญลักษณ์แทนการทดลองซึ่งเกิดจากการรวมกันของอิทธิพลปัจจัยต่างๆ มีความหมายคือ การทดลองที่ปรากฏสัญลักษณ์ของปัจจัยใดแสดงว่าทำการทดลองที่ระดับ +1 ของปัจจัยนั้น และ ปัจจัยที่ไม่ปรากฏสัญลักษณ์ทำที่ระดับ -1 เช่น

(1) แสดงว่าทำการทดลองที่ระดับ -1 ทุกปัจจัย

- a ทำการทดลองที่ระดับอุณหภูมิ +1 และปัจจัยอื่นๆทำที่ระดับ -1 ดังนั้นภาวะของการทดลองคือ อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความดัน 5.51 เมกกะปาสคาล เวลา 30 นาที และไม่เติมโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์
- abcd ทำการทดลองที่ระดับ +1 ทุกปัจจัย เป็นต้น

## 1.2 ความหมายของคำที่สำคัญ

อิทธิพลหลัก (main effect) หมายถึงอิทธิพลของปัจจัยที่ศึกษา

ปฏิริยาสัมพันธ์ (interaction) หมายถึงการแสดงออกของระดับต่างๆในปัจจัยหนึ่งไม่เท่ากันเมื่อเปรียบเทียบจากระดับหนึ่งไปอีกระดับหนึ่งของอีกปัจจัย

อิทธิพลแฟคทอเรียล (factorial effects) หมายถึงอิทธิพลต่างๆทั้งอิทธิพลหลักและปฏิริยาสัมพันธ์ทั้งหมดในการทดลองซึ่งจะมีเท่ากับ (จำนวนการรวมตัว-1) หรือเท่ากับองศาอิสระ (degree of freedom) ของสิ่งทดลอง

## 2. ตัวอย่างการคำนวณ

ตัวอย่างการคำนวณการวิเคราะห์ความแปรปรวนจะใช้ข้อมูลของร้อยละการขาดกำมะถันไฟรต์ รูปแบบของ treatment combinations อิทธิพลแฟคทอเรียล และค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการคำนวณแสดงในตาราง ข.1

เครื่องหมาย + และ - คือ +1 และ -1 ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์ของการเปรียบเทียบ หรืออิทธิพลแฟคทอเรียลต่างๆนั่นเอง ดังนั้นอิทธิพลแฟคทอเรียล A คือการเปรียบเทียบระหว่างระดับ -1 และ +1 ของปัจจัย A

วิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์คือ

อิทธิพลแฟคทอเรียล A : ให้ค่า + แก่ treatment combinations ที่มีสัญลักษณ์ a นอกนั้นให้ค่า -

อิทธิพลแฟคทอเรียล B : ให้ค่า + แก่ treatment combinations ที่มีสัญลักษณ์ b นอกนั้นให้ค่า -

อิทธิพลปฏิริยาสัมพันธ์ AB : ให้คูณสัมประสิทธิ์ของ A กับ B เข้าด้วยกันได้เป็นสัมประสิทธิ์ของ AB

ตาราง ข1 ค่าสัมประสิทธิ์ของอิทธิพลต่างๆที่ใช้ในการคำนวณการวิเคราะห์ความแปรปรวน

Treatment combinations	Factorial effects														
	A	B	AB	C	AC	BC	ABC	D	AD	BD	ABD	CD	ACD	BCD	ABCD
1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1
a	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1
b	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1
ab	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1
c	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1
ac	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1
bc	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1
abc	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
d	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1
ad	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1
bd	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1
abd	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1
cd	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
acd	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
bcd	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1
abcd	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

สถาบันวิจัยประชากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตัวอย่างการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองที่มี 2 ตัวแปรคือ A และ B ซึ่งมีจำนวนระดับเป็น a และ b ตามลำดับ ทำการทดลองซ้ำ n ครั้ง แสดงในตาราง ข2

ตาราง ข2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของ 2 ตัวแปร

SOV	SS	DF	MS	$F_0$
A	$SS_A$	a-1	$MS_A = SS_A/DF_A$	$MS_A/MS_E$
B	$SS_B$	b-1	$MS_B = SS_B/DF_B$	$MS_B/MS_E$
AB	$SS_{AB}$	(a-1)(b-1)	$MS_{AB} = SS_{AB}/DF_{AB}$	$MS_{AB}/MS_E$
Error	$SS_E$	ab(n-1)	$MS_E = SS_E/DF_E$	
Total	$SS_T$	Abn-1		

SOV = source of variation

SS = sums of squares

DF = degree of freedom

MS = mean of square

เมื่อ

$$SS_A = (\text{contrast}_A)^2/n2^k$$

$$SS_B = (\text{contrast}_B)^2/n2^k$$

$$SS_{AB} = (\text{contrast}_{AB})^2/n2^k$$

a b n

$$SS_T = \sum_{i=1} \sum_{j=1} \sum_{k=1} y_{ijk}^2 - y^2 \dots / N ; N = \text{จำนวนค่าสังเกตทั้งหมด}$$

$$SS_E = SS_T - SS_A - SS_B - SS_{AB}$$

การทำ contrast เพื่อดูอิทธิพลของปัจจัยใดๆหาได้โดยคุณเครื่องหมายบวกหรือลบใน สดมภ์ของปัจจัยนั้นๆกับผลการทดลองที่ได้ในแต่ละ treatment combinations แล้วนำมาบวกกันทั้งหมด ในการทดลองที่มีหลายตัวแปรสามารถสร้างตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนได้ในทำนองเดียวกัน ดังแสดงในตาราง ข4 ซึ่งเป็นตัวอย่างการคำนวณโดยใช้ข้อมูลร้อยละการขจัดกัมมันไพไรต์

ตาราง ข3 ข้อมูลการทดลองร้อยละการกำจัดกำมะถันไฟโรต์

Treatment Combination	Replications		I+II	I <sup>2</sup>	II <sup>2</sup>	I <sup>2</sup> +II <sup>2</sup>
	I	II				
1	7.9	9.1	17.1	62	83	146
a	63.1	60.7	123.8	3977	3688	7665
b	8.8	6.5	15.2	76	41	118
ab	79.8	76.5	156.3	6363	5850	12213
c	10.8	11.9	22.7	115	142	258
ac	70.8	72.0	142.8	5013	5178	10191
bc	20.6	18.4	39.0	422	339	762
abc	32.3	72.3	104.7	1046	5233	6279
d	18.0	16.4	34.4	324	267	592
ad	68.6	65.4	134.0	4707	4281	8988
bd	31.4	29.6	61.0	985	874	1860
abd	75.3	76.8	152.1	5663	5902	11566
cd	22.6	20.5	43.1	510	418	928
acd	81.4	82.7	164.1	6629	6831	13460
bcd	25.4	26.2	51.5	643	684	1327
abcd	93.0	85.7	178.8	865	7351	16001
SUM	-	-	1440.3	45192	47168	92361
SUM <sup>2</sup> /32	-	-	64830.7	-	-	-

$$SS_T = 92361.06 - 64830.71$$

$$= 27530.36$$

ตาราง ๗4 การคำนวณหา contrast

Treatment Combination	I+II	A	B	AB	C	AC	BC	ABC	D	AD	BD	ABD	CD	ACD	BCD	ABCD
1	17.05	-17.05	-17.05	17.05	-17.05	17.05	17.05	-17.05	-17.05	17.05	17.05	-17.05	17.05	-17.05	-17.05	17.05
a	123.79	123.79	-123.79	-123.79	-123.79	-123.79	123.79	123.79	-123.79	-123.79	123.79	123.79	123.79	123.79	-123.79	-123.79
b	15.22	-15.22	15.22	-15.22	-15.22	15.22	-15.22	15.22	-15.22	15.22	-15.22	15.22	15.22	-15.22	15.22	-15.22
ab	156.26	156.26	156.26	156.26	-156.26	-156.26	-156.26	-156.26	-156.26	-156.26	-156.26	-156.26	156.26	156.26	156.26	156.26
c	22.70	-22.70	-22.70	22.70	22.70	-22.70	-22.70	22.70	-22.70	22.70	22.70	-22.70	-22.70	22.70	22.70	-22.70
ac	142.76	142.76	-142.76	-142.76	142.76	142.76	-142.76	-142.76	-142.76	-142.76	142.76	142.76	-142.76	-142.76	142.76	142.76
bc	38.98	-38.98	38.98	-38.98	38.98	-38.98	38.98	-38.98	-38.98	38.98	-38.98	38.98	-38.98	38.98	-38.98	38.98
abc	104.68	104.68	104.68	104.68	104.68	104.68	104.68	104.68	-104.68	-104.68	-104.68	-104.68	-104.68	-104.68	-104.68	-104.68
d	34.40	-34.40	-34.40	34.40	-34.40	34.40	34.40	-34.40	34.40	-34.40	-34.40	34.40	-34.40	34.40	34.40	-34.40
ad	134.04	134.04	-134.04	-134.04	-134.04	-134.04	134.04	134.04	134.04	134.04	-134.04	-134.04	-134.04	-134.04	134.04	134.04
bd	60.97	-60.97	60.97	-60.97	-60.97	60.97	-60.97	60.97	60.97	-60.97	60.97	-60.97	-60.97	60.97	-60.97	60.97
abd	152.09	152.09	152.09	152.09	-152.09	-152.09	-152.09	-152.09	152.09	152.09	152.09	152.09	-152.09	-152.09	-152.09	-152.09
cd	43.05	-43.05	-43.05	43.05	43.05	-43.05	-43.05	43.05	43.05	-43.05	-43.05	43.05	43.05	-43.05	-43.05	43.05
acd	164.07	164.07	-164.07	-164.07	164.07	164.07	-164.07	-164.07	164.07	164.07	-164.07	-164.07	164.07	164.07	-164.07	-164.07
bcd	51.53	-51.53	51.53	-51.53	51.53	-51.53	51.53	-51.53	51.53	-51.53	51.53	-51.53	51.53	-51.53	51.53	-51.53
abcd	178.75	178.75	178.75	178.75	178.75	178.75	178.75	178.75	178.75	178.75	178.75	178.75	178.75	178.75	178.75	178.75
CONTRAST	-	872.55	76.62	-22.40	52.70	-4.53	-73.90	-73.94	197.43	5.46	58.94	17.74	59.11	119.49	30.97	103.37

ตาราง ๗5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละการขจัดกัมมันตภาพรังสี

SOV	DF	SS	MS	F0
A	1	23791.78	23791.78	256.98
B	1	183.47	183.47	1.98
AB	1	15.68	15.68	0.17
C	1	86.79	86.79	0.94
AC	1	0.64	0.64	0.01
BC	1	170.66	170.66	1.84
ABC	1	170.86	170.86	1.85
D	1	1218.02	1218.02	13.16
AD	1	0.93	0.93	0.01
BD	1	108.56	108.56	1.17
ABD	1	9.83	9.83	0.11
CD	1	109.17	109.17	1.18
ACD	1	446.16	446.16	4.82
BCD	1	29.97	29.97	0.32
ABCD	1	333.90	333.90	3.61
ERROR	16	1481.31	92.58	
TOTAL	31	28157.74		

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

ตารางผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนและการวิเคราะห์การถดถอย

ตาราง ค1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละผลได้ของถ่านหิน

Source of variation	Degree of freedom	Sum of square	Mean of square	F <sub>0</sub>
A	1	635.07	635.07	626.63
B	1	10.92	10.92	10.78
AB	1	2.26	2.26	2.23
C	1	3.14	3.14	3.10
AC	1	0.12	0.12	0.12
BC	1	0.36	0.36	0.36
ABC	1	0.73	0.73	0.72
D	1	6.85	6.85	6.75
AD	1	5.34	5.34	5.27
BD	1	1.23	1.23	1.22
ABD	1	1.42	1.42	1.40
CD	1	6.68	6.68	6.59
ACD	1	5.18	5.18	5.11
BCD	1	3.98	3.98	3.93
ABCD	1	0.56	0.56	0.56
ERROR	16	16.22	1.01	
TOTAL	31	700.07		

กำหนดระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05

ตารางที่ ค2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละการลดเก่า

Sorce of variation	Degree of freedom	Sum of square	Mean of square	F <sub>0</sub>
A	1	0.46	0.46	0.59
B	1	2.98	2.98	3.80
AB	1	7.54	7.54	9.60
C	1	0.44	0.44	0.56
AC	1	7.16	7.16	9.12
BC	1	10.80	10.80	13.76
ABC	1	4.60	4.60	5.86
D	1	175.44	175.44	223.47
AD	1	20.25	20.25	25.79
BD	1	13.04	13.04	16.61
ABD	1	0.48	0.48	0.62
CD	1	4.72	4.72	6.01
ACD	1	18.28	18.28	23.29
BCD	1	1.42	1.42	1.81
ABCD	1	19.77	19.77	25.19
ERROR	16	12.56	0.79	
TOTAL	31	296.97		

กำหนดระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละการขาดก้ามะถันซัลเฟต

Sorce of variation	Degree of freedom	Sum of square	Mean of square	F <sub>0</sub>
A	1	0.04	0.04	0.01
B	1	138.91	138.91	27.99
AB	1	97.28	97.28	19.60
C	1	226.92	226.92	45.72
AC	1	2.58	2.58	0.52
BC	1	186.21	186.21	37.52
ABC	1	22.69	22.69	4.57
D	1	127.08	127.08	25.61
AD	1	59.32	59.32	11.95
BD	1	0.21	0.21	0.04
ABD	1	95.79	95.79	19.30
CD	1	138.15	138.15	27.84
ACD	1	4.29	4.29	0.86
BCD	1	200.76	200.76	40.45
ABCD	1	14.03	14.03	2.83
ERROR	16	79.40	4.96	
TOTAL	31	1393.65		

กำหนดระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค4 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละการขาดกำมะถันไฟไรต์

Sorce of variation	Degree of freedom	Sum of square	Mean of square	F <sub>0</sub>
A	1	26119.27	26119.27	7526.40
B	1	437.39	437.39	126.04
AB	1	11.62	11.62	3.35
C	1	278.38	278.38	80.22
AC	1	43.14	43.14	12.43
BC	1	32.43	32.43	9.35
ABC	1	32.52	32.52	9.37
D	1	757.98	757.98	218.42
AD	1	41.00	41.00	11.82
BD	1	9.31	9.31	2.68
ABD	1	17.92	17.92	5.16
CD	1	9.49	9.49	2.73
ACD	1	189.17	189.17	54.51
BCD	1	3.59	3.59	1.03
ABCD	1	118.90	118.90	34.26
ERROR	16	55.53	3.47	
TOTAL	31	28157.64		

กำหนดระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ ค5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละการขจัดกำมะถันอินทรีย์

Sorce of variation	Degree of freedom	Sum of square	Mean of square	F <sub>0</sub>
A	1	51.61	51.61	34.09
B	1	97.17	97.17	64.18
AB	1	37.80	37.80	24.97
C	1	24.49	24.49	16.18
AC	1	5.57	5.57	3.68
BC	1	56.64	56.64	37.41
ABC	1	31.00	31.00	20.48
D	1	414.62	414.62	273.86
AD	1	29.99	29.99	19.81
BD	1	10.03	10.03	6.62
ABD	1	12.66	12.66	8.36
CD	1	43.28	43.28	28.59
ACD	1	8.20	8.20	5.42
BCD	1	4.35	4.35	2.87
ABCD	1	0.17	0.17	0.11
ERROR	16	24.22	1.51	
TOTAL	31	851.81		

กำหนดระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ค6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละการขจัดกัมมันตรวม

Sorce of variation	Degree of freedom	Sum of square	Mean of square	F <sub>0</sub>
A	1	4032.65	4032.65	1513.66
B	1	9.28	9.28	3.48
AB	1	104.65	104.65	39.28
C	1	34.78	34.78	13.05
AC	1	25.34	25.34	9.51
BC	1	1.36	1.36	0.51
ABC	1	16.92	16.92	6.35
D	1	11.85	11.85	4.45
AD	1	49.78	49.78	18.68
BD	1	0.81	0.81	0.30
ABD	1	0.82	0.82	0.31
CD	1	9.33	9.33	3.50
ACD	1	34.06	34.06	12.78
BCD	1	10.11	10.11	3.79
ABCD	1	26.25	26.25	9.85
ERROR	16	42.63	42.63	
TOTAL	31	4410.61		

กำหนดระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ตาราง ค7 การวิเคราะห์การถดถอยของร้อยละผลได้ของถ่านหิน

Regression Statistics					
Multiple R	0.9783				
R Square	0.9571				
Adjusted R Square	0.9468				
Standard Error	1.0961				
Observations	32				

ANOVA					
	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	6	670.0313	111.6719	92.9547	0.0000
Residual	25	30.0339	1.2014		
Total	31	700.0652			

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value
Intercept	86.9466	0.1938	448.7364	0.0000
A	-4.4549	0.1938	-22.9918	0.0000
B	-0.5842	0.1938	-3.0152	0.0058
D	0.4625	0.1938	2.3871	0.0249
AD	0.4084	0.1938	2.1075	0.0453
CD	-0.4569	0.1938	-2.3582	0.0265
ACD	-0.4023	0.1938	-2.0763	0.0483

กำหนดระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ค8 การวิเคราะห์การถดถอยของร้อยละการขจัดเก้

<i>Regression Statistics</i>					
Multiple R		0.9738			
R Square		0.9483			
Adjusted R Square		0.9236			
Standard Error		0.8554			
Observations		32			

ANOVA					
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>
Regression	10	281.6021	28.1602	38.4854	0.0000
Residual	21	15.3659	0.7317		
Total	31	296.9680			

	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>
Intercept	10.8964	0.1512	72.0588	0.0000
AB	0.4854	0.1512	3.2100	0.0042
AC	-0.4730	0.1512	-3.1282	0.0051
BC	-0.5811	0.1512	-3.8426	0.0009
ABC	0.3792	0.1512	2.5079	0.0204
D	2.3415	0.1512	15.4843	0.0000
AD	-0.7954	0.1512	-5.2601	0.0000
BD	-0.6384	0.1512	-4.2215	0.0004
CD	0.3840	0.1512	2.5393	0.0191
ACD	-0.7558	0.1512	-4.9983	0.0001
ABCD	-0.7861	0.1512	-5.1985	0.0000

กำหนดระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05

ตารางที่ ๑๑ การวิเคราะห์การถดถอยของร้อยละการขจัดกำมะถันซัลเฟต

<i>Regression Statistics</i>	
Multiple R	0.9419
R Square	0.8871
Adjusted R Square	0.8334
Standard Error	2.7367
Observations	32

ANOVA

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>
Regression	10	1236.3713	123.6371	16.5078	0.0000
Residual	21	157.2820	7.4896		
Total	31	1393.6533			

	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>
Intercept	53.8538	0.4838	111.3170	0.0000
B	-2.0835	0.4838	-4.3067	0.0003
AB	1.7435	0.4838	3.6039	0.0017
C	2.6629	0.4838	5.5043	0.0000
BC	-2.4123	0.4838	-4.9863	0.0001
ABC	0.8421	0.4838	1.7407	0.0964
AC	0.2839	0.4838	0.5868	0.5636
D	1.9928	0.4838	4.1191	0.0005
ABD	1.7302	0.4838	3.5763	0.0018
CD	-2.0778	0.4838	-4.2948	0.0003
BCD	2.5047	0.4838	5.1773	0.0000

กำหนดระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05

## ตาราง ค10 การวิเคราะห์การถดถอยของร้อยละการขจัดกำมะถันไฟโรต์

<i>Regression Statistics</i>	
Multiple R	0.9977
R Square	0.9954
Adjusted R Square	0.9932
Standard Error	2.4932
Observations	32

## ANOVA

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>
Regression	10	28027.1027	2802.7103	450.8950	0.0000
Residual	21	130.5335	6.2159		
Total	31	28157.6362			

	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>
Intercept	46.3133	0.4407	105.0822	0.0000
A	28.5697	0.4407	64.8230	0.0000
B	3.6971	0.4407	8.3885	0.0000
C	2.9495	0.4407	6.6922	0.0000
AC	1.1611	0.4407	2.6344	0.0155
BC	-1.0067	0.4407	-2.2842	0.0329
ABC	-1.0081	0.4407	-2.2873	0.0327
D	4.8669	0.4407	11.0428	0.0000
ABD	-0.7484	0.4407	-1.6980	0.1043
ACD	2.4313	0.4407	5.5166	0.0000
ABCD	1.9276	0.4407	4.3737	0.0003

กำหนดระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05

## ตาราง ค11 การวิเคราะห์การถดถอยของร้อยละการขจัดกำมะถันอินทรีย์

<i>Regression Statistics</i>	
Multiple R	0.9796
R Square	0.9597
Adjusted R Square	0.9343
Standard Error	1.3439
Observations	32

ANOVA					
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>
Regression	12	817.4932	68.1244	37.7171	0.0000
Residual	19	34.3177	1.8062		
Total	31	851.8110			

	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>
Intercept	8.9810	0.2376	37.8022	0.0000
A	1.2700	0.2376	5.3456	0.0000
B	-1.7425	0.2376	-7.3346	0.0000
C	-0.8749	0.2376	-3.6825	0.0016
D	-3.5995	0.2376	-15.1510	0.0000
AB	1.0868	0.2376	4.5746	0.0002
BC	1.3304	0.2376	5.5999	0.0000
AD	-0.9681	0.2376	-4.0750	0.0006
BD	0.5598	0.2376	2.3561	0.0294
CD	1.1630	0.2376	4.8952	0.0001
ABC	0.9843	0.2376	4.1429	0.0006
ABD	-0.6291	0.2376	-2.6478	0.0159
ACD	0.5063	0.2376	2.1310	0.0464

กำหนดระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05

## ตาราง ค12 การวิเคราะห์การถดถอยของร้อยละการขจัดกำมะถันรวม

<i>Regression Statistics</i>	
Multiple R	0.9902
R Square	0.9805
Adjusted R Square	0.9737
Standard Error	1.9357
Observations	32

## ANOVA

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>
Regression	8	4324.4261	540.5533	144.2641	0.0000
Residual	23	86.1803	3.7470		
Total	31	4410.6064			

	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>
Intercept	28.8236	0.3422	84.2330	0.0000
A	11.2259	0.3422	32.8061	0.0000
AB	1.8084	0.3422	5.2849	0.0000
AD	-1.2472	0.3422	-3.6449	0.0014
C	1.0425	0.3422	3.0465	0.0057
AC	0.8899	0.3422	2.6007	0.0160
ABC	0.7270	0.3422	2.1247	0.0446
ACD	1.0317	0.3422	3.0149	0.0062
ABCD	0.9058	0.3422	2.6471	0.0144

กำหนดระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05





## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวกฤติกา จารุทะวีย์ เกิดวันที่ 24 ธันวาคม 2518 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2540 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเมื่อ พ.ศ. 2541



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย