

## เอกสารอ้างอิง

1. งานถ่านหิน กองเชื้อเพลิงธรรมชาติ, "พลังงานจากถ่านหินในประเทศไทย," ข่าวสารการธรณี, ปีที่ 31 ฉบับที่ 3, 26-38, 2529.
2. \_\_\_\_\_, "แนวทางการใช้ลิแกนด์ในประเทศไทย," ข่าวสารการธรณี, ปีที่ 32 ฉบับที่ 1, 120-126, 2530.
3. ฝ่ายวิเคราะห์วิจัย กองเชื้อเพลิงธรรมชาติ, "ถ่านหินกับการวิเคราะห์," ข่าวสารการธรณี, ปีที่ 1 ฉบับที่ 1, 135-142, 2530.
4. ASTM Standards, D 388, "Coal by Rank," American Society for Testing and Materials, U.S.A., 1985.
5. Meyer, R.A., Coal Handbook, pp. 1-50, pp. 210-300, Marcel Dekker Ltd., New York, 1st ed., 1981.
6. Eliot, R. C., Coal Desulfurization Prior to Combustion, pp. 1-208, Noyes Data Corporation Park Ridge, NJ., 1st ed., 1978.
7. Nishioka, M., Lee, M. L., Castle, R. N., "Sulphur Heterocycles in Coal-derived Products," Fuel, 65, 392-395, 1986.
8. Mendizabal, E., "Low Temperature Process for Coal Desulfurization," Lawrence Berkeley Laboratory of the University of California, Report for the U.S. Energy Research and Development Administration, August 1976.
9. Araya, P. E., Ohlbaum, R. B., Droguett, S. E., "Study of the treatment of Subbituminous Coal by NaOH Solutions," Fuel, 60, 1127-1130, 1981.
10. Joshi, J. B., et al., "Modeling of Three Phase Reactors: A Case of Oxydesulfurization of Coal," AIChE Journal, 27(6), 937-945, 1981.
11. Slagel, D., Shah, Y.T., Joshi, J.B., "Kinetics of Oxydesulfurization of Upper Freeport Coal," Ind. Eng. Chem. Process. Des. Dev., 19, 294-300, 1980.
12. Oshinowo, T. and Ofi, O., "Kinetics of Chemical Desulphurization of Coal in Aqueous Ferric Chloride," The Canadian Journal of Chemical Engineering, 65, 481-486, 1987.
13. สมศักดิ์ คำรงค์เลิศ, พลิวิตโคเซชั่น, หน้า 1-10, 55-66, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร, พิมพ์ครั้งที่ 1, 2528.

14. พล สาเททอง, "ฟลูอิดไอเซชันปรีทัศน์," เอกสารประกอบการสัมมนาทางวิชาการ เรื่อง Fluidization Technology III and Energy Technology I, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยร่วมกับสถาบันวิศวกรรมเคมี (I.G.C.) Toulouse ประเทศฝรั่งเศส, 22-24 ก.ค. 2529.
15. Levenspiel, O., Chemical Reaction Engineering, pp. 357-399, Wiley, New York, 2 nd ed., 1972.
16. Boron, D.J., Taylor, S.R., "Mild Oxidations of Coal," Fuel, 64 (2), 209-211, 1985.
17. Vasilakos, N.P., Clinton, C.S., "Chemical Beneficiation of Coal with Aqueous Hydrogen Peroxide/Sulphuric Acid Solutions," Fuel, 63, 1561-1563, 1984.
18. Meyers, R.A., "Desulfurize Coal Chemically," Hydrocarbon Processing, 53 (6), 93-95, June 1975.
19. Ludmila Lompa-Krzymin, "Complete Removal of Sulphur from Coal Using Solutions Containing Cupric Ions," Canadian Pat CA1,159,001, December 20, 1983.
20. วิทยา ปันสุวรรณ, "การขจัดกำมะถันในถ่านหินโดยวิธีออกซิเดชัน," วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2527.
21. สมชัย อัครทิวา, ประเสริฐ สกีกิจสกุลผลม, "การขจัดกำมะถันในถ่านหินด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์," วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2526.
22. กัดทิมา ศิริจิระชัย, "การขจัดกำมะถันในถ่านหินโดยวิธีออกซิเดชันในสารละลายเบส," วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2528.
23. เอกชัย อานนท์กิจพานิช, "การขจัดกำมะถันจากถ่านหินด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์," วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2530.
24. ASTM Standards, D 3173, "Test for Moisture in the Sample of Coal and Coke," American Society for Testing and Materials, U.S.A., 1986.
25. ASTM Standards, D 3174, "Test for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke," American Society for Testing and Materials, U.S.A., 1986.

26. ASTM Standards, D 3175, "Test for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke," American Society for Testing and Materials, U.S.A., 1986.
27. ASTM Standards, D 2015, "Test for Gross Calorific Value of Solid Fuel by the Adiabatic Bomb Calorimeter," American Society for Testing and Materials, U.S.A., 1986.
28. ASTM Standards, D 3177, "Total Sulfur in the Analysis Sample of Coal and Coke," American Society for Testing and Materials, U.S.A., 1986.
29. ASTM Standards, D 2492, "Form of Sulfurs in the Analysis Sample of Coal and Coke," American Society for Testing and Materials, U.S.A., 1986.

ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก.

### วิธีการวิเคราะห์

การวิเคราะห์ถ่านหินแบบประมาณ (proximate analysis) : ASTM D3172

ก.1 การหาปริมาณความชื้นในถ่านหิน (moisture content in coal), ASTM D3173

หลักการ นำตัวอย่างถ่านหินที่จะวิเคราะห์ร้อนผ่านตะแกรงขนาด 250 ไมครอน แล้วให้ความร้อนคงที่ในตู้อบ (drying oven) ที่อุณหภูมิประมาณ 105-110°ซ เพื่อให้ไอน้ำระเหยออกไปจากถ่านหิน และค่าความชื้นสามารถคำนวณได้จากน้ำหนักถ่านหินที่ลดลง เครื่องมือ ตู้อบ (drying oven), ถาดอวลูมิเนียม, desiccator วิธีการทดลอง

1. อบถาดอวลูมิเนียมพร้อมฝาในตู้อบที่อุณหภูมิ 110°ซ ประมาณ 30 นาที จากนั้นนำเข้า desiccator ทิ้งให้เย็น นำไปชั่งน้ำหนักและบันทึกผล
2. ชั่งตัวอย่างถ่านหินประมาณ 1 กรัมใส่ถาดอวลูมิเนียมที่ทราบน้ำหนัก ปิดฝา
3. นำไปเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 110°ซ จนน้ำหนักคงที่
4. นำถาดอวลูมิเนียมจากตู้อบทิ้งให้เย็นใน desiccator แล้วชั่งน้ำหนัก บันทึกผล

ผล

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

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

เมื่อ  $M$  = ร้อยละของปริมาณความชื้น (% moisture content)  
 $W_1$  = น้ำหนักของถาดอวลูมิเนียมพร้อมฝาและน้ำหนักถ่านหินก่อนอบ (กรัม)  
 $W_2$  = น้ำหนักของถาดอวลูมิเนียมพร้อมฝาและน้ำหนักถ่านหินหลังอบ (กรัม)  
 $W$  = น้ำหนักตัวอย่างถ่านหิน (กรัม)

ก.2 การหาปริมาณเถ้าในถ่านหิน (ash content in coal), ASTM D3174

หลักการ นำตัวอย่างถ่านหินที่จะวิเคราะห์ร้อนผ่านตะแกรงขนาด 250 ไมครอน แล้วนำไปเผาให้ความร้อนในเตาเผา (muffle furnace) ที่อุณหภูมิ 500°ซ นาน 30 นาที แล้วเพิ่มความร้อนเป็น 825°ซ จนกระทั่งได้น้ำหนักคงที่ จำนวนร้อยละของปริมาณเถ้าสามารถคำนวณได้จากน้ำหนักที่เหลืออยู่ภายหลังการเผาแล้ว

เครื่องมือ เตาเผา (muffle furnace), porcelain crucible, desiccator

## วิธีการทดลอง

1. เเผา crucible พร้อมฝาที่อุณหภูมิ 825°ซ เป็นเวลาประมาณ 30 นาที ในเตาเผา แล้วนำออกมาทิ้งให้เย็นใน desiccator ชั่งน้ำหนัก บันทึกผล
2. ชั่งน้ำหนักถ่านหินประมาณ 1 กรัม ใส่ใน crucible
3. นำเข้าเตาเผาพร้อมฝาปิดให้มีช่องว่างเล็กน้อยเผาที่อุณหภูมิ 500°ซ นานประมาณ 30 นาที แล้วเพิ่มอุณหภูมิเป็น 825°ซ จนน้ำหนักคงที่ จึงนำ crucible ออกจากเตาเผา ทิ้งให้เย็นใน desiccator ชั่งน้ำหนัก บันทึกผล

## สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$A = \frac{W_p - W_4}{W} \times 100$$

- เมื่อ
- A = ร้อยละของปริมาณเถ้า (% ash content)
  - $W_p$  = น้ำหนักของ crucible พร้อมฝาปิดและเถ้าหลังจากเผา (กรัม)
  - $W_4$  = น้ำหนักของ crucible พร้อมฝาปิดและถ่านหินก่อนเผา (กรัม)
  - W = น้ำหนักตัวอย่างถ่านหิน (กรัม)

ก.3 การหาปริมาณสารระเหยในถ่านหิน (volatile matter in coal), ASTM D3175

หลักการ นำตัวอย่างถ่านหินที่จะวิเคราะห์ร้อนผ่านตะแกรงขนาด 250 ไมครอน แล้วเผาให้ความร้อนในเตาเผาแบบท่อ (tube furnace) ปริมาณสารระเหยสามารถคำนวณจากการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างถ่านหิน

เครื่องมือ เตาเผาแบบท่อ (tube furnace), nickle crucible พร้อมฝาปิด, desiccator

## วิธีการทดลอง

1. เเผา nickle crucible พร้อมฝาที่อุณหภูมิ 950°ซ เป็นเวลา 30 นาที นำออกจากเตาเผาทิ้งให้เย็นใน desiccator ชั่งน้ำหนัก บันทึกผล
2. ชั่งน้ำหนักถ่านหินประมาณ 1 กรัม ใส่ใน nickle crucible
3. นำไปเผาในเตาเผาโดยปิดฝา nickle crucible ให้มีช่องว่างเล็กน้อย โดยให้ความร้อนเป็น 2 ช่วง ๆ ละ 6 นาที ช่วงแรกเป็นการเริ่มต้นให้ความร้อนถ่านหินที่อุณหภูมิ 300°ซ 3 นาที และที่อุณหภูมิ 600°ซ 3 นาที ช่วงที่สองเผาที่กึ่งกลางเตาเผาที่อุณหภูมิ 950°ซ นาน 6 นาที
4. ชั่งน้ำหนัก nickle crucible และถ่านหินที่เหลือพร้อมฝาปิด บันทึกผล

## สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$V = \frac{W_5 - W_6}{W} \times 100 - M$$

- เมื่อ
- V = ร้อยละของสารระเหย (% volatile matter)
  - M = ร้อยละของปริมาณความชื้น
  - $W_5$  = น้ำหนัก crucible พร้อมฝาปิดรวมน้ำหนักถ่านหินก่อนเผา (กรัม)
  - $W_6$  = น้ำหนัก crucible พร้อมฝาปิดรวมน้ำหนักถ่านหินหลังเผา (กรัม)
  - W = น้ำหนักตัวอย่างถ่านหิน (กรัม)

## ก.4 การหาปริมาณคาร์บอนคงตัวในถ่านหิน (fixed carbon in coal)

## สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$\text{ร้อยละคาร์บอนคงตัว} = 100 - \text{ร้อยละปริมาณความชื้น} - \text{ร้อยละปริมาณสารระเหย} \\ - \text{ร้อยละปริมาณเถ้า}$$

## การหาปริมาณกำมะถัน

## ก.5 การหาปริมาณกำมะถันรวม (total sulfur) โดยวิธี Eschka method, ASTM D3177

หลักการ ตัวอย่างถ่านหินที่จะวิเคราะห์จะถูกเผาพร้อมกับ Eschka mixture โดยที่กำมะถันที่ประกอบอยู่ในถ่านหินจะเปลี่ยนเป็นรูปของซัลเฟตไอออน และหาปริมาณกำมะถันในรูปของแบเรียมซัลเฟต ( $BaSO_4$ )

เครื่องมือ เตาเผา (muffle furnace), crucible, บีกเกอร์, hot plate, กรวยกรองพร้อมกระดาษกรองเบอร์ 1 และ 42

## สารเคมี

1. น้ำกลั่น
2. สารละลายแบเรียมคลอไรด์ ( $BaCl_2$ ) ความเข้มข้น 100 กรัม/ลิตร
3. Eschka mixture ประกอบด้วยแมกนีเซียมออกไซด์ ( $MgO$ ) กับ โซเดียมคาร์บอเนต ( $Na_2CO_3$ ) ในอัตราส่วน 2:1 โดยน้ำหนัก
4. สารละลายกรดเกลือ (HCl) 1:9
5. methyl orange indicator
6. สารละลายโซเดียมคาร์บอเนต ( $Na_2CO_3$ )

## วิธีการทดลอง

1. ชั่งน้ำหนักถ่านหินประมาณ 1 กรัม ผสมกับ 3 กรัมของ Eschka mixture ใน crucible โดยให้ถ่านหินและ Eschka mixture ผสมกันอย่างทั่วถึง แล้วปิดทับด้วย 1 กรัมของ Eschka mixture
2. นำเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิ 825°ซ ประมาณ 3 ชั่วโมง จนกระทั่งสีดำของถ่านหินหมดไป
3. นำ crucible ออกจากเตาเผา ย่อยสารใน crucible ด้วยน้ำร้อน 100 มล. เป็นเวลาประมาณครึ่งชั่วโมง
4. กรองและล้างตะกอนด้วยน้ำร้อนจนสารละลายได้ปริมาตร 250 มล.
5. ทำสารละลายที่กรองได้ให้เป็นกรดด้วย HCl 1:9
6. ทำสารละลายให้เป็นกลางด้วย  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  โดยใช้ methyl orange เป็น indicator
7. ทำให้เป็นกรดเล็กน้อยโดยใช้ HCl 1:9
8. ต้มสารละลายให้เดือด แล้วเติมสารละลาย  $\text{BaCl}_2$  อย่างช้า ๆ 10 มล. ด้วยปิเปตในขณะที่กวนสารละลายตลอดเวลา ต้มสารละลายต่อไปประมาณ 15 นาที จะได้ตะกอนสีขาวขุ่นของ  $\text{BaSO}_4$  ตั้งทิ้งไว้ค้างคืน หรืออย่างน้อย 2 ชั่วโมง
9. กรองตะกอน  $\text{BaSO}_4$  ด้วยกระดาษกรอง ashless เบอร์ 42 ล้างตะกอนด้วยน้ำร้อนหลาย ๆ ครั้ง จนคลอไรด์หมด ทดสอบได้ด้วย  $\text{AgNO}_3$
10. นำตะกอนที่กรองได้พร้อมกระดาษกรองพับใส่ crucible ที่ทราบน้ำหนักมาเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิ 925°ซ ประมาณ 3 ชั่วโมง นำออกจากเตาเผา ทิ้งให้เย็นใน desiccator แล้วชั่งหาน้ำหนักตะกอน  $\text{BaSO}_4$  ที่เกิดขึ้น
11. blank correction วิเคราะห์เหมือนกับ 1-9 แต่ไม่ต้องใส่ถ่านหิน สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$\text{ร้อยละปริมาณกำมะถันรวม} = \frac{(A - B) \times 13.738}{C}$$

- เมื่อ
- A = น้ำหนักของตะกอน  $\text{BaSO}_4$  ที่ได้จากตัวอย่าง (กรัม)
- B = น้ำหนักของตะกอน  $\text{BaSO}_4$  ที่ได้จาก blank (กรัม)
- C = น้ำหนักของตัวอย่างถ่านหินที่ใช้ (กรัม)



การหารูปแบบของกำมะถัน (forms of sulfur) : ASTM D2492

ก.6 การหาปริมาณกำมะถันซัลเฟต (sulfate sulfur)

หลักการ กำมะถันซัลเฟตสามารถที่จะถูกสกัดออกจากถ่านหินได้ โดยสารละลายกรดเกลือเจือจาง และจะวิเคราะห์ผลออกมาในรูปของตะกอนแบเรียมซัลเฟต

เครื่องมือ เตาเผา (muffle furnace), crucible, hot plate, บีกเกอร์, กรวยกรองพร้อมกระดาษกรองเบอร์ 1 และ 42

สารเคมี

1. สารกรดเกลือ (HCl) 2:3
2. สารละลายแบเรียมคลอไรด์ ( $BaCl_2$ ) 100 กรัม/ลิตร
3. สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น
4. สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ 1:10
5. น้ำโบรมีนอิ่มตัว
6. methyl orange indicator
7. สารละลายเอซิลแอลกอฮอล์ร้อยละ 95 โดยปริมาตร

วิธีการทดลอง

1. ชั่งตัวอย่างถ่านหินประมาณ 2 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ เติมสารละลาย HCl 2:3 50 มล. จากนั้นใส่เอซิลแอลกอฮอล์ประมาณ 2 มล. คนให้ทั่วถึงกัน แล้วปิดด้วยกระดาษนาฬิกา
2. ต้มบน hot plate ให้สารละลายค่อย ๆ เดือด เป็นเวลาประมาณครึ่งชั่วโมง
3. กรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 ด้วยความระมัดระวัง ล้างตะกอนด้วยน้ำร้อนหลาย ๆ ครั้ง จนแน่ใจว่าล้าง HCl ทั้งหมดที่สกัดได้ ตะกอนที่ได้จากการกรองจะเก็บไว้เพื่อหากำมะถันไฟไรต์ต่อไป
4. สารละลายที่ได้จากการกรองนำมาเติมน้ำโบรมีน ( $Br_2$ ) 5 มล. แล้วต้มให้เดือดอย่างน้อย 5 นาที
5. เติมสารละลาย  $NH_4OH$  อย่างช้า ๆ จนกระทั่งเป็นด่างเล็กน้อย (ทดสอบโดยใช้กระดาษลิตมัส) แล้วเติมให้เกินพออีก 5 มล. จะเกิดตะกอนสีน้ำตาลแดงของ  $Fe(OH)_3$
6. กรองตะกอนผ่านกระดาษเบอร์ 1 ล้างตะกอนด้วย  $NH_4OH$  1:10 ที่ร้อน 2-3 ครั้ง
7. นำสารละลายที่ได้จากการกรองเติม methyl orange 2-3 หยด ทำให้เป็นกรดด้วย HCl เข้มข้น
8. ต้มบน hot plate ให้เดือด แล้วเติมสารละลาย  $BaCl_2$  อย่างช้า ๆ 10 มล. ด้วยปิเปตในขณะที่กวนสารละลายตลอดเวลา ต้มสารละลายต่อไปอีก 15 นาที จะได้ตะกอนสีขาวขุ่นของ  $BaSO_4$  ตั้งทิ้งไว้ค้างคืน หรืออย่างน้อย 2 ชั่วโมง

9. กรองตะกอน  $BaSO_4$  ด้วยกระดาษกรอง ashless เบอร์ 42 ล้างตะกอนด้วยน้ำร้อนหลาย ๆ ครั้ง จนคลอไรด์หมด ทดสอบได้ด้วย  $AgNO_3$

10. นำตะกอนที่กรองได้พร้อมกระดาษกรองใส่ crucible ที่ทราบน้ำหนักแล้วเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิ  $925^\circ$  C ประมาณ 3 ชั่วโมง นำออกจากเตาเผาทิ้งให้เย็นใน desiccator ชั่งน้ำหนักของตะกอน  $BaSO_4$  ที่เกิดขึ้น

11. blank correction ทำการทดลองเหมือนข้างต้น แต่ไม่ต้องใส่ถ่านหินเท่านั้น

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$\text{ร้อยละปริมาณกำมะถันซัลเฟต} = \frac{(A^* - B^*) \times 13.738}{C^*}$$

เมื่อ  $A^* =$  น้ำหนักของตะกอน  $BaSO_4$  ที่ได้จากตัวอย่าง (กรัม)

$B^* =$  น้ำหนักของตะกอน  $BaSO_4$  ใน blank (กรัม)

$C^* =$  น้ำหนักของตัวอย่างถ่านหินที่ใช้ (กรัม)

#### ก.7 การหาปริมาณกำมะถันไพไรต์ (pyritic sulfur)

หลักการ กำมะถันไพไรต์จะถูกสกัดออกมาจากถ่านหินโดยต้มสารละลาย  $HNO_3$  และวิเคราะห์ออกมาในรูปของเหล็กโดย atomic absorption spectrophotometer และปริมาณเหล็กที่ได้จะเปลี่ยนเป็นรูปของกำมะถันไพไรต์อีกทีหนึ่ง

เครื่องมือ atomic absorption spectrophotometer, ขวดวัดปริมาตร,

ปิเปต

สารเคมี สารละลาย  $HNO_3$  1:7, น้ำกลั่น

วิธีการทดลอง

1. นำตะกอนและกระดาษกรองจากการวิเคราะห์หาปริมาณกำมะถันซัลเฟตมาชั่งด้วย  $HNO_3$  50 มล. ประมาณ 30 นาที หรือทิ้งค้างคืน

2. กรองสารละลายและล้างตะกอนด้วยน้ำเย็นจนสารละลายมีปริมาตรประมาณ 150 มล.

3. ทำสารละลายให้เจือจางด้วยน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 250 มล. ในขวดวัดปริมาตร

4. วัดหาปริมาณเหล็กด้วย atomic absorption spectrophotometer

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$\% \text{ Fe} = \frac{(\text{ความเข้มข้น Fe, ppm})(\text{vol. เริ่มต้น})(\text{dilution})(10^{-6})(100)}{(\text{น.น. ถ่านหิน, กรัม})}$$

$$\text{ร้อยละปริมาณกำมะถันไพไรต์} = \% \text{ Fe} \times 1.148$$

ก.8 การหาปริมาณกำมะถันอินทรีย์ (organic sulfur)

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$\text{ร้อยละปริมาณกำมะถันอินทรีย์} = \text{ร้อยละปริมาณกำมะถันรวม} - \text{ร้อยละปริมาณกำมะถันไพไรต์} - \text{ร้อยละปริมาณกำมะถันซัลเฟต}$$

ก.9 การหาค่าความร้อนของถ่านหิน (heating value) : ASTM D2015

การหาค่าน้ำหนักสมมูล (water equivalent) ของบอมบ์คาลอรีมิเตอร์

วิธีทดลอง

1. ชั่งกรดเบนโซอิก (benzoic acid) หนัก 0.9-1.0 กรัม มาอัดเป็นเม็ดโดยใช้เครื่องอัด จากนั้นนำกรดเบนโซอิกอัดก้อนนี้มาชั่งน้ำหนักอีกครั้ง บันทึกน้ำหนัก
2. ตัดลวด (fuse wire) ยาว 10 ซม. มาผูกระหว่างปลายทั้งสองของหัวบอมบ์
3. นำกรดเบนโซอิกอัดก้อนมาวางใน crucible จากนั้นจึงนำ crucible นี้ไปวางในตำแหน่งบนหัวบอมบ์ จัดให้ลวดที่ผูกไว้โค้งจนแตะผิวหน้าของกรดเบนโซอิก
4. เติมน้ำกลั่นในออกซิเจนบอมบ์ 1 มล. โดยใช้ปิเปต
5. ประกอบหัวบอมบ์กับออกซิเจนบอมบ์เข้าด้วยกัน ชันเกลียวให้แน่น แล้วนำไปอัดก๊าซออกซิเจนจนมีความดันประมาณ 25-30 บรรยากาศ
6. เติมน้ำลงในถังบอมบ์ 1 ลิตร โดยให้น้ำมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้องประมาณ 2-3°ซ นำออกซิเจนบอมบ์ที่อัดก๊าซเรียบร้อยแล้ววางในถังบอมบ์ เติมน้ำลงไปอีก 1 ลิตร เลียบสายจุดระเบิด 2 เส้นต่อกับบอมบ์ ปิดฝาของเครื่อง
7. เปิดสวิตช์ให้เครื่องกวนทำงาน ทุก ๆ นาที บันทึกค่าอุณหภูมิน้ำ เมื่อเครื่องเดินประมาณ 5 นาที กดปุ่มจุดระเบิด บันทึกค่าอุณหภูมิที่จุดระเบิดนี้ และอ่านอุณหภูมิของน้ำที่เพิ่มสูงขึ้นทุกนาที จนกระทั่งอุณหภูมิสูงสุด แล้วลดหรือคงที่ในที่สุด
8. ปิดสวิตช์ของเครื่อง นำออกซิเจนบอมบ์ออกมาปล่อยก๊าซจากบอมบ์ให้หมด

9. ล้างหัวขอมบ์และออกซิเจนขอมบ์ รวมทั้ง crucible ด้วยน้ำกลั่นเติม methyl orange จนหมดกรด (น้ำที่ล้างไม่เป็นสีชมพู)

10. นำน้ำล้างที่ได้ไปไทเตรทกับ 0.0725 N  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  บันทึกมล.ของ  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ที่ใช้ไป

11. วัดความยาวของลวดที่เหลือ  
สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$W = \frac{Hg + e_1 + e_2}{t}$$

เมื่อ W = ค่าน้ำหนักสมมูลของเครื่องขอมบ์แคลอรีมิเตอร์, แคลอรีต่อองศาเซลเซียส

H = ค่าความร้อนของการเผาไหม้กรดเบนโซอิก = 6318 แคลอรีต่อกรัม

g = น้ำหนักของกรดเบนโซอิกที่ทดลอง (กรัม)

$e_1$  = การแก้ค่าความร้อนของการเกิดกรดไนตริก, แคลอรี  
= จำนวนมล.ของ 0.0725 N  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ที่ใช้ไทเตรท

$e_2$  = การแก้ค่าความร้อนของลวด, แคลอรี  
= (2.3) x (ความยาวของลวดที่ใช้ไปเป็น ซม.)

t = อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น, °ซ

การหาค่าความร้อน (heating value)

วิธีการทดลอง

1. วางแผ่นแอสเบสตอส (asbestos) ลงใน crucible จากนั้นชั่งน้ำหนัก ถ่านหินตัวอย่างประมาณ 1 กรัมลงใน crucible

2. ทำการทดลองเช่นเดียวกับกรณีกรดเบนโซอิก

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$H = \frac{tw - e_1 - e_2 - e_3}{g'}$$

เมื่อ H = ค่าความร้อนของการเผาไหม้ถ่านหิน (heating value), แคลอรีต่อกรัม

- $t$  = อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นซึ่งได้แก่ค่าเนื่องจากเทอร์โมมิเตอร์แล้ว, °ซ  
 $= t_c - t_u - r_1(b-a) + r_2(c-b)$   
 $t_c$  = อุณหภูมิสูงสุดของการเผาไหม้, °ซ  
 $t_u$  = อุณหภูมิเริ่มจุดระเบิด, °ซ  
 $r_1$  = อัตราการลดลงของอุณหภูมิก่อนการจุดระเบิด 5 นาที (องศาเซลเซียสต่อนาที)  
 $r_2$  = อัตราการลดลงของอุณหภูมิหลังจากอุณหภูมิสูงสุด (องศาเซลเซียสต่อนาที)  
 $a$  = เวลาก่อนการจุดระเบิด (นาที)  
 $b$  = เวลาที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 60% ของการเพิ่มอุณหภูมิทั้งหมด (นาที)  
 $c$  = เวลาตั้งแต่เริ่มทดลองจนถึงเมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกว้างที่สุด (นาที)  
 $w$  = ค่าน้ำหนักสมมูล (แคลอรี/°ซ)  
 $e_1$  = การแก้ค่าความร้อนของการเกิดกรดไนตริก, แคลอรี  
 $=$  จำนวนมล. ของ 0.0725 N  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ที่ใช้ไทเทรต  
 $e_2$  = การแก้ค่าความร้อนของกรดซัลฟูริก  
 $= 14 \times (\% \text{ กำมะถัน}), (\% \text{ กำมะถัน หาได้จากหัวข้อถัดไป})$   
 $e_3$  = การแก้ค่าความร้อนของลวด, แคลอรี  
 $= (2.3) \times (\text{ความยาวของลวดที่ใช้ไปเป็น ซม.})$   
 $g'$  = น้ำหนักของถ่านหินที่ทดลอง (กรัม)

การหาปริมาณกำมะถันในถ่านหิน

วิธีการทดลอง

1. นำน้ำล้างขอมบ์ภายหลังการไทเทรตกับ  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  แล้ว มาต้มจนเดือดแล้วกรองขณะร้อนด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 ล้างตะกอนด้วยน้ำร้อนหลาย ๆ ครั้ง (ให้ได้ปริมาตรประมาณ 250 มล.)
2. นำสารละลายที่ได้มาเติมสารละลาย  $\text{Br}_2$  (อิ่มตัว) 1 มล.
3. ทำให้เป็นกรดด้วยสารละลาย  $\text{HCl}$  1:9 แล้วนำไปต้มจนเดือด
4. เติมสารละลาย  $\text{BaCl}_2$  ลงไปที่ละลายจนครบ 10 มล. ต้มต่อไปประมาณ 15 นาที หลังจากนั้นตั้งทิ้งไว้อย่างน้อย 2 ชั่วโมง หรือทิ้งคืนจะเกิดตะกอนสีขาวขุ่นของ  $\text{BaSO}_4$
5. กรองตะกอนด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 (ashless) ล้างตะกอนด้วยน้ำร้อนหลายครั้ง ๆ จนคลอไรต์หมด ทดสอบได้ด้วย  $\text{AgNO}_3$

6. นำตะกอนที่กรองได้พร้อมกระดาษกรองพับใส่ crucible ทราบน้ำหนักแล้ว มาเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิ 925°ซ ประมาณ 3 ชั่วโมง นำออกจากเตาเผา ทิ้งให้เย็นใน desiccator แล้วชั่งหาน้ำหนักตะกอน BaSO<sub>4</sub> ที่เกิดขึ้น บันทึกผล

7. blank correction วิเคราะห์เหมือนกับ 1-7 แต่ไม่ต้องใส่ถ่านหิน สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$\text{ร้อยละปริมาณกำมะถัน} = \frac{(A - B) \times 13.738}{C}$$

เมื่อ A = น้ำหนักของตะกอน BaSO<sub>4</sub> ที่ได้จากตัวอย่าง (กรัม)  
 B = น้ำหนักของตะกอน BaSO<sub>4</sub> ที่ได้จาก blank (กรัม)  
 C = น้ำหนักของตัวอย่างถ่านหินที่ใช้ (กรัม)

#### ก.10 การหาปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

หลักการ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีสมบัติเป็น reducing agent เมื่อทำปฏิกิริยากับ KMnO<sub>4</sub> ซึ่งเป็น oxidizing agent ในสารละลายกรดจะทำให้ oxidation state ของ O<sup>1-</sup> ใน H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> เปลี่ยนเป็น O<sub>2</sub><sup>0</sup> จึงหาปริมาณ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ได้โดย direct titration ด้วยสารละลายมาตรฐาน

สารเคมี

1. สารละลายมาตรฐาน 0.02 โมลาร์ โพตัสเซียมเปอร์มังกาเนต KMnO<sub>4</sub>
2. สารละลายกรดซัลฟูริก 1 โมลาร์
3. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่ต้องการวิเคราะห์

วิธีการ บีบอัดสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 2.0 มล. เติมน้ำให้เป็น 20 มล. และ 1 โมลาร์ กรดซัลฟูริก 20 มล. ไตเตรตด้วย 0.02 โมลาร์ KMnO<sub>4</sub> จนถึงจุดยุติ blank correction ทำเช่นเดียวกันแต่ไม่ใส่สารตัวอย่าง

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$1 \text{ มล. } 0.02 \text{ โมลาร์ โพตัสเซียมเปอร์มังกาเนต} = \text{ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ } 1.701 \text{ มก.}$$

ภาคผนวก ข.

ข้อมูลและการคำนวณ

การคำนวณ

ร้อยละปริมาณสารระเหย

$$\text{(แบบไม่รวมความชื้น)} = \frac{1}{100 - M} \text{ ร้อยละปริมาณสารระเหย} \times 100$$

ร้อยละปริมาณเถ้า

$$\text{(แบบไม่รวมความชื้น)} = \frac{1}{100 - M} \text{ ร้อยละปริมาณเถ้า} \times 100$$

ร้อยละปริมาณคาร์บอนคงตัว

$$\text{(แบบไม่รวมความชื้น)} = \frac{1}{100 - M} \text{ ร้อยละปริมาณคาร์บอนคงตัว} \times 100$$

ร้อยละปริมาณกำมะถันรวม

$$\text{(แบบไม่รวมความชื้น)} = \frac{1}{100 - M} \text{ ร้อยละปริมาณกำมะถันรวม} \times 100$$

ร้อยละปริมาณกำมะถันซัลเฟต

$$\text{(แบบไม่รวมความชื้น)} = \frac{1}{100 - M} \text{ ร้อยละปริมาณกำมะถันซัลเฟต} \times 100$$

ร้อยละปริมาณกำมะถันไพไรต์

$$\text{(แบบไม่รวมความชื้น)} = \frac{1}{100 - M} \text{ ร้อยละปริมาณกำมะถันไพไรต์} \times 100$$

ร้อยละการลดปริมาณกำมะถันรวม (แบบไม่รวมความชื้น)

$$= \frac{\text{ร้อยละของกำมะถันรวมเริ่มต้น} - \text{ร้อยละของกำมะถันรวมหลังกระบวนการ}}{\text{ร้อยละของกำมะถันรวมเริ่มต้น}} \times 100$$

ร้อยละการลดปริมาณกำมะถันซัลเฟต (แบบไม่รวมความชื้น)

$$= \frac{\text{ร้อยละของกำมะถันซัลเฟตเริ่มต้น} - \text{ร้อยละของกำมะถันซัลเฟตหลังกระบวนการ}}{\text{ร้อยละของกำมะถันรวมเริ่มต้น}} \times 100$$

ร้อยละการลดปริมาณกำมะถันไพไรต์ (แบบไม่รวมความชื้น)

$$= \frac{\text{ร้อยละของกำมะถันไพไรต์เริ่มต้น} - \text{ร้อยละของกำมะถันไพไรต์หลังกระบวนการ}}{\text{ร้อยละของกำมะถันรวมเริ่มต้น}} \times 100$$

ร้อยละการลดปริมาณเถ้า (แบบไม่รวมความชื้น)

$$= \frac{\text{ร้อยละของเถ้าเริ่มต้น} - \text{ร้อยละของเถ้าหลังกระบวนการ} \times 100}{\text{ร้อยละของเถ้าเริ่มต้น}}$$

ร้อยละการเพิ่มค่าความร้อน (แบบไม่รวมความชื้น)

$$= \frac{\text{ค่าความร้อนเริ่มต้น} - \text{ค่าความร้อนหลังกระบวนการ} \times 100}{\text{ค่าความร้อนเริ่มต้น}}$$

หมายเหตุ M = ร้อยละค่าความชื้น

MFB = การคำนวณแบบไม่รวมความชื้น (moisture free basis)

MAF = การคำนวณแบบไม่รวมเถ้าและค่าความชื้น (moisture ash free basis)

การคำนวณความเข้มข้นของไฟไรต์ในถ่านหิน

ความหนาแน่นของถ่านหิน = 0.8245 กรัม/ลบ.ซม. (สำหรับแม่เมาะ 1)

ตั้งน้ำมันหนักถ่านหิน X กรัม (MAF) จะมีปริมาตร =  $\frac{X}{0.8245}$  ลบ.ซม.

ถ่านหิน 100 กรัม มีกำมะถันไฟไรต์ = Y กรัม

" X " " " =  $\frac{X \times Y}{100}$  กรัม

กำมะถัน 64.128 กรัม เป็นไฟไรต์ = 119.975 กรัม

"  $\frac{XY}{100}$  " " " =  $\frac{119.975XY}{100 \times 64.128}$  กรัม

=  $\frac{XY}{100 \times 64.128}$  โมล

ตั้งนั้นคิดเป็นความเข้มข้นไฟไรต์ =  $\frac{Y \times 0.8245}{100 \times 64.128}$  โมล/ลบ.ซม.

=  $\frac{Y \times 0.8245 \times 1000}{100 \times 64.128}$  กิโลโมล/ลบ.ม.

=  $\frac{Y \times 0.8245 \times 10}{64.128}$  กิโลโมล/ลบ.ม.



ข้อมูลสำหรับการคำนวณความเข้มข้นของกำมะถันไพไรต์และสัดส่วนการเปลี่ยนแปลง

ตารางที่ ข.1 และ ข.2 ข้อมูลสำหรับการคำนวณความเข้มข้นกำมะถันไพไรต์ของตารางที่ 4.9

เวลา (นาที)	4% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>				5% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>				7% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>			
	ถ้ำ (%)	ปริมาณกำมะถัน (%)			ถ้ำ (%)	ปริมาณกำมะถัน (%)			ถ้ำ (%)	ปริมาณกำมะถัน (%)		
		ซิลเฟต	ไพไรต์	รวม		ซิลเฟต	ไพไรต์	รวม		ซิลเฟต	ไพไรต์	รวม
0	37.64	1.08	3.66	5.89	36.39	1.10	3.90	5.80	43.66	1.08	4.49	5.84
10	37.58	0.52	1.69	5.37	35.84	0.47	1.88	5.25	39.97	0.45	2.06	4.74
20	36.46	0.43	1.47	4.91	34.12	0.34	1.45	4.66	38.88	0.32	1.63	4.58
30	35.34	0.34	1.44	4.56	33.18	0.26	1.45	4.42	37.94	0.22	1.45	4.37
45	-	-	-	-	32.52	0.23	1.35	4.23	37.04	0.14	1.40	4.14
60	33.39	0.25	1.32	4.27	30.74	0.21	1.23	4.05	36.04	0.12	1.35	3.90
90	32.83	0.23	1.12	4.24	-	-	-	-	-	-	-	-

Time (min)	4% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>			5% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>			7% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>		
	Pyritic S (NAF)	Mt. Coal, g (NAF)	Cp (kmol/m <sup>3</sup> )	Pyritic S (NAF)	Mt. Coal, g (NAF)	Cp (kmol/m <sup>3</sup> )	Pyritic S (NAF)	Mt. Coal, g (NAF)	Cp (kmol/m <sup>3</sup> )
0	5.87	3.48	0.755	6.13	3.35	0.788	7.97	4.56	1.025
10	2.71	3.51	0.348	2.93	3.49	0.377	3.43	4.05	0.441
20	2.31	3.43	0.297	2.20	3.35	0.283	2.67	4.05	0.343
30	2.23	3.36	0.286	2.17	3.31	0.279	2.34	3.93	0.300
45	-	-	-	2.00	3.25	0.257	2.22	3.88	0.286
60	1.98	3.26	0.255	1.78	3.18	0.228	2.11	3.76	0.271
90	1.67	3.13	0.214	-	-	-	-	-	-



ตารางที่ ข.5 และ ข.6 ข้อมูลสำหรับการคำนวณความเข้มข้นกำมะถันไพไรต์ของตารางที่ 4.11

เวลา (นาที)	อัตราการไหล 1.06 l/min				อัตราการไหล 1.25 l/min				อัตราการไหล 1.49 l/min			
	เถ้า (%)	ปริมาณกำมะถัน (%)			เถ้า (%)	ปริมาณกำมะถัน (%)			เถ้า (%)	ปริมาณกำมะถัน (%)		
		ซิลเฟต	ไพไรต์	รวม		ซิลเฟต	ไพไรต์	รวม		ซิลเฟต	ไพไรต์	รวม
0	43.69	1.00	2.16	6.66	44.76	0.79	3.38	6.81	44.82	0.88	3.31	6.54
10	41.20	0.55	1.30	5.90	42.71	0.31	1.80	5.22	41.71	0.24	1.82	5.18
20	39.48	0.24	1.24	5.54	40.63	0.15	1.34	4.95	41.15	0.14	1.32	4.57
30	39.09	0.17	1.21	4.64	38.15	0.11	1.21	4.60	38.83	0.14	1.18	4.52
45	38.04	0.12	1.15	4.36	35.80	0.08	1.14	4.55	35.68	0.08	1.13	4.50
60	35.90	0.10	0.99	4.30	32.19	0.06	1.05	4.35	32.23	0.07	0.98	4.08
90	33.55	0.06	0.72	4.03	-	-	-	-	32.04	0.03	0.83	3.86

Time (min)	Flowrate 1.06 l/min			Flowrate 1.25 l/min			Flowrate 1.49 l/min		
	XPyritic SInt.Coal,g (NAF)	Cp (NAF)	kcal/m <sup>3</sup>	XPyritic SInt.Coal,g (NAF)	Cp (NAF)	kcal/m <sup>3</sup>	XPyritic SInt.Coal,g (NAF)	Cp (NAF)	kcal/m <sup>3</sup>
0	3.84	4.41	0.493	6.12	4.63	0.787	6.00	4.37	0.771
10	2.21	4.12	0.284	3.14	4.39	0.404	3.12	4.09	0.401
20	2.05	4.02	0.263	2.26	4.07	0.290	2.24	4.01	0.288
30	1.99	4.01	0.255	1.96	3.86	0.252	1.93	3.82	0.248
45	1.84	3.83	0.239	1.78	3.67	0.228	1.76	3.64	0.226
60	1.84	3.73	0.199	1.55	3.43	0.199	1.45	3.36	0.186
90	1.08	3.83	0.139	-	-	-	1.22	3.43	0.157

ตารางที่ ข.7 และ ข.8 ข้อมูลสำหรับการคำนวณความเข้มข้นกำมะถันไฟไรต์ของตารางที่ 4.12

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ 10 (°ซ)				อุณหภูมิ 20 (°ซ)				อุณหภูมิ 30 (°ซ)			
	ถ้ำ (%)	ปริมาณกำมะถัน (%)			ถ้ำ (%)	ปริมาณกำมะถัน (%)			ถ้ำ (%)	ปริมาณกำมะถัน (%)		
		ซิลเฟต	ไฟไรต์	รวม		ซิลเฟต	ไฟไรต์	รวม		ซิลเฟต	ไฟไรต์	รวม
0	46.68	0.79	2.98	6.76	44.76	0.79	3.38	6.81	40.67	0.92	2.70	6.95
10	45.93	0.35	2.52	6.60	42.71	0.31	1.80	5.22	37.95	0.43	1.94	5.23
20	44.73	0.21	1.85	6.14	40.63	0.15	1.34	4.95	36.82	0.14	1.08	4.96
30	44.70	0.20	1.73	5.51	38.15	0.11	1.21	4.60	33.96	0.15	0.85	4.14
45	41.27	0.22	1.11	4.97	35.80	0.08	1.14	4.55	30.55	0.12	0.78	4.10
60	34.64	0.16	1.01	4.91	32.19	0.06	1.05	4.35	28.45	0.05	0.73	3.92
90	31.37	0.07	1.01	4.66	-	-	-	-	-	-	-	-

Time (min)	Temp 10 Deg.C			Temp 20 Deg.C			Temp 30 Deg.C		
	Pyritic Sulf. (MAF)	Sulf. Coal, g (MAF)	Cp (kcal/m <sup>3</sup> )	Pyritic Sulf. (MAF)	Sulf. Coal, g (MAF)	Cp (kcal/m <sup>3</sup> )	Pyritic Sulf. (MAF)	Sulf. Coal, g (MAF)	Cp (kcal/m <sup>3</sup> )
0	5.59	4.42	0.719	6.12	4.63	0.787	4.55	4.11	0.585
10	4.66	4.56	0.599	3.14	4.39	0.404	3.13	3.98	0.402
20	3.35	4.28	0.430	2.26	4.07	0.290	1.71	3.85	0.220
30	3.13	4.44	0.402	1.96	3.86	0.252	1.29	3.81	0.168
45	1.89	4.01	0.243	1.78	3.67	0.228	1.12	3.56	0.144
60	1.55	3.54	0.199	1.55	3.43	0.199	1.02	3.39	0.131
90	1.47	3.52	0.189	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ ข.9 และ ข.10 ข้อมูลสำหรับการคำนวณความเข้มข้นกำมะถันไพไรต์ของตารางที่ 4.13

เวลา (นาที)	แม่เมาะ 1				แม่เมาะ 2				แม่เมาะ 3				แม่เมาะ 4			
	ได้กำ (%)	ปริมาณกำมะถัน (%)			ได้กำ (%)	ปริมาณกำมะถัน (%)			ได้กำ (%)	ปริมาณกำมะถัน (%)			ได้กำ (%)	ปริมาณกำมะถัน (%)		
		ซัลเฟต	ไพไรต์	รวม		ซัลเฟต	ไพไรต์	รวม		ซัลเฟต	ไพไรต์	รวม		ซัลเฟต	ไพไรต์	รวม
0	44.76	0.79	3.38	6.81	23.27	0.58	0.28	3.69	11.31	0.74	0.12	3.11	13.08	0.41	0.11	2.41
10	42.71	0.31	1.80	5.22	21.34	0.11	0.22	2.95	10.62	0.12	0.08	2.35	12.44	0.09	0.10	2.01
20	40.63	0.15	1.34	4.95	21.51	0.10	0.20	2.93	10.21	0.11	0.06	2.36	11.96	0.09	0.10	2.00
30	38.15	0.11	1.21	4.60	18.84	0.10	0.17	2.84	9.73	0.11	0.06	2.32	11.54	0.08	0.10	1.94
45	35.80	0.08	1.14	4.55	18.52	0.10	0.16	2.83	9.58	0.10	0.06	2.28	11.36	0.07	0.09	1.90
60	32.19	0.06	1.05	4.35	16.83	0.10	0.14	2.79	9.43	0.09	0.06	2.26	10.89	0.07	0.08	1.90
90	-	-	-	-	16.31	0.10	0.08	2.73	8.36	0.10	0.06	2.30	9.23	0.06	0.04	1.88

หมายเหตุ ความหนาแน่นของถ่านหินแม่เมาะ 1 = 0.8245 กรัม/ลบ.ซม.  
 ความหนาแน่นของถ่านหินแม่เมาะ 2 = 0.6025 กรัม/ลบ.ซม.  
 ความหนาแน่นของถ่านหินแม่เมาะ 3 = 0.5463 กรัม/ลบ.ซม.  
 ความหนาแน่นของถ่านหินแม่เมาะ 4 = 0.5750 กรัม/ลบ.ซม.

Time (min)	MaeMoh 1			MaeMoh 2			MaeMoh 3			MaeMoh 4		
	Pyritic Sulfur (MAF)	Coal Mt. (MAF)	Cp g/kaol/m <sup>3</sup>	Pyritic Sulfur (MAF)	Coal Mt. (MAF)	Cp g/kaol/m <sup>3</sup>	Pyritic Sulfur (MAF)	Coal Mt. (MAF)	Cp g/kaol/m <sup>3</sup>	Pyritic Sulfur (MAF)	Coal Mt. (MAF)	Cp g/kaol/m <sup>3</sup>
	0	6.12	4.63	0.787	0.36	3.18	0.0338	0.14	2.66	0.0114	0.13	2.76
10	3.14	4.39	0.404	0.28	2.99	0.0259	0.09	2.64	0.0075	0.11	2.71	0.0102
20	2.26	4.07	0.290	0.25	3.04	0.0236	0.07	2.63	0.0056	0.11	2.75	0.0102
30	1.96	3.86	0.252	0.21	2.76	0.0194	0.07	2.57	0.0056	0.11	2.65	0.0101
45	1.78	3.67	0.228	0.20	2.80	0.0182	0.07	2.57	0.0056	0.10	2.64	0.0091
60	1.55	3.43	0.199	0.17	2.71	0.0156	0.07	2.53	0.0056	0.09	2.62	0.0081
90	-	-	-	0.10	2.75	0.0089	0.07	2.56	0.0055	0.04	2.55	0.0040

ข้อมูลสำหรับการทดสอบหาขั้นตอนควบคุมอัตราเร็วการเข้าทำปฏิกิริยาของรูปที่ 4.30-4.34

Time (min)	4x H2O2			5x H2O2			7x H2O2		
	X	$1-(1-X)^{1/3}$	$1-3(1-X)^{2/3}+2(1-X)$	X	$1-(1-X)^{1/3}$	$1-3(1-X)^{2/3}+2(1-X)$	X	$1-(1-X)^{1/3}$	$1-3(1-X)^{2/3}+2(1-X)$
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	0.539	0.2275	0.1317	0.522	0.2181	0.1220	0.570	0.2452	0.1509
20	0.607	0.2675	0.1764	0.641	0.2893	0.2026	0.665	0.3055	0.2229
30	0.621	0.2763	0.1869	0.646	0.2926	0.2067	0.707	0.3359	0.2626
45	-	-	-	0.674	0.3118	0.2310	0.721	0.3466	0.2771
60	0.662	0.3034	0.2203	0.711	0.3389	0.2666	0.736	0.3585	0.2934
90	0.717	0.3435	0.2729	-	-	-	-	-	-

Time (min)	5x H2O2			7x H2O2			10x H2O2		
	X	$1-(1-X)^{1/3}$	$1-3(1-X)^{2/3}+2(1-X)$	X	$1-(1-X)^{1/3}$	$1-3(1-X)^{2/3}+2(1-X)$	X	$1-(1-X)^{1/3}$	$1-3(1-X)^{2/3}+2(1-X)$
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	0.405	0.1589	0.0677	0.487	0.1995	0.1035	0.394	0.1538	0.0637
20	0.530	0.2225	0.1265	0.632	0.2834	0.1954	0.687	0.3210	0.2430
30	0.609	0.2689	0.1779	0.680	0.3160	0.2365	0.734	0.3569	0.2912
45	0.629	0.2814	0.1931	0.710	0.3381	0.2656	-	-	-
60	0.697	0.3283	0.2526	0.747	0.3675	0.3059	0.779	0.3954	0.3454
90	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Time (min)	Flowrate 1.06 l/min			Flowrate 1.25 l/min			Flowrate 1.49 l/min		
	X	$1-(1-X)^{1/3}$	$1-3(1-X)^{2/3}+2(1-X)$	X	$1-(1-X)^{1/3}$	$1-3(1-X)^{2/3}+2(1-X)$	X	$1-(1-X)^{1/3}$	$1-3(1-X)^{2/3}+2(1-X)$
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	0.424	0.1680	0.0752	0.487	0.1995	0.1035	0.480	0.1959	0.1001
20	0.467	0.1892	0.0939	0.632	0.2834	0.1954	0.626	0.2795	0.1907
30	0.483	0.1974	0.1015	0.680	0.3160	0.2365	0.678	0.3146	0.2346
45	0.515	0.2143	0.1181	0.710	0.3381	0.2656	0.707	0.3359	0.2626
60	0.596	0.2607	0.1685	0.747	0.3675	0.3059	0.759	0.3777	0.3202
90	0.718	0.3442	0.2739	-	-	-	0.796	0.4113	0.3684

Time (min)	Temp 10 Deg.C			Temp 20 Deg.C			Temp 30 Deg.C		
	X	$1-(1-X)^{1/3}$	$1-3(1-X)^{2/3}+2(1-X)$	X	$1-(1-X)^{1/3}$	$1-3(1-X)^{2/3}+2(1-X)$	X	$1-(1-X)^{1/3}$	$1-3(1-X)^{2/3}+2(1-X)$
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	0.167	0.0591	0.0101	0.487	0.1995	0.1035	0.313	0.1176	0.0383
20	0.402	0.1575	0.0666	0.632	0.2834	0.1954	0.624	0.2782	0.1892
30	0.441	0.1762	0.0822	0.680	0.3160	0.2365	0.718	0.3442	0.2739
45	0.662	0.3034	0.2203	0.710	0.3381	0.2656	0.754	0.3734	0.3142
60	0.723	0.3481	0.2792	0.747	0.3675	0.3059	0.776	0.3927	0.3415
90	0.737	0.3593	0.2945	-	-	-	-	-	-

Time (min)	MaeMoh 2			MaeMoh 3			MaeMoh 4		
	X	$1-(1-X)^{1/3}$	$1-3(1-X)^{2/3}+2(1-X)$	X	$1-(1-X)^{1/3}$	$1-3(1-X)^{2/3}+2(1-X)$	X	$1-(1-X)^{1/3}$	$1-3(1-X)^{2/3}+2(1-X)$
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	0.234	0.0850	0.0205	0.342	0.1302	0.0465	0.097	0.0334	0.0033
20	0.302	0.1129	0.0354	0.509	0.2111	0.1149	0.097	0.0334	0.0033
30	0.424	0.1689	0.0760	0.509	0.2111	0.1149	0.106	0.0367	0.0039
45	0.462	0.1867	0.0915	0.509	0.2111	0.1149	0.195	0.0698	0.0139
60	0.538	0.2269	0.1311	0.509	0.2111	0.1149	0.283	0.1087	0.0329
90	0.737	0.3593	0.2945	0.518	0.2159	0.1198	0.646	0.2926	0.2067

ภาคผนวก ค.

การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (simple linear regression)

การถดถอยเชิงเส้น เป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามกับตัวแปรอิสระ  
หนึ่งตัว โดยที่ความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสองเป็นเส้นตรง ดังสมการ

$$y = a + bx$$

โดยที่ a คือ ค่าคงที่เท่ากับจุดตัดบนแกน y เมื่อกำหนดให้  $x = 0$

b คือ ความชันของเส้นตรง

เทคนิคหนึ่งที่น่าสนใจในการหาสมการของเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง x และ  
y คือ วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least squares) ซึ่งจะให้สมการเส้นตรงที่ลากขึ้นแล้วทำให้ค่า  
เบี่ยงเบนระหว่างข้อมูลจริงกับค่าที่พยากรณ์มีค่าน้อยที่สุด ค่าเบี่ยงเบนของ  $y_i$  กับค่าพยากรณ์  
เท่ากับ  $y_i - \hat{y}_i$  ดังนั้นผลบวกกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนคือ

$$\sum_{i=1}^n |y_i - (a + bx_i)|^2$$

วิธีการกำลังน้อยที่สุดก็คือการหาค่า a และ b ซึ่งทำให้ผลบวกกำลังสองของค่าเบี่ยง  
เบนมีค่าน้อยสุด การคำนวณกระทำได้โดยอาศัยหลักทางคณิตศาสตร์ในการหาจุดต่ำสุดหรือสูงสุด  
ดังนี้

$$\text{minimize } \sum_{i=1}^n |y_i - (a + bx_i)|^2 = S$$

$$\partial S / \partial a = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i) = 0$$

$$\sum_{i=1}^n y_i = na + b \sum_{i=1}^n x_i \quad \dots \quad (\text{ค.1})$$

$$\partial S / \partial b = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i) (x_i) = 0$$

$$\sum_{i=1}^n x_i y_i = a \sum_{i=1}^n x_i + b \sum_{i=1}^n x_i^2 \quad \dots \quad (\text{ค.2})$$

เมื่อแก้สมการ ค.1 และ ค.2 สามารถหาค่า a และ b ได้จาก

$$b = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - (\sum_{i=1}^n x_i) (\sum_{i=1}^n y_i)}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x}$$

โดยที่  $\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}$  ,  $\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$

สัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (the coefficient of determination)

สัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ คือ ตัวชี้ที่ใช้แสดงขนาดของความแปรปรวนที่เกิดขึ้นในตัวแปรตามที่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระ

ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ,  $r^2$  มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

ถ้า  $r^2$  มีค่าเท่ากับ 0 แสดงว่า ความแปรปรวนทั้งหมดที่เกิดขึ้นในตัวแปรตามไม่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระ

ถ้า  $r^2$  มีค่าเท่ากับ 1 แสดงว่าความแปรปรวนทั้งหมดที่เกิดขึ้นในตัวแปรตามสามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระ

ความแปรปรวนที่เกิดขึ้นในตัวแปรตามก็คือ ผลรวมของความแปรปรวนที่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระและความแปรปรวนที่ไม่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระ นั่นคือ

$$\text{total variance} = \text{explained variance} + \text{unexplained variance}$$

$$\text{total variance} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 / (n-1)$$



$$\text{explained variance} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 / (k-1)$$

$$\text{unexplained variance} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 / (n-k)$$

เมื่อ  $n$  คือ จำนวนข้อมูล และ  $k$  คือ จำนวนตัวแปร ในกรณีที่เป็นการวัดความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามกับตัวแปรอิสระเพียงตัวเดียว  $k = 2$

สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (the coefficient of correlation)

สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เป็นดัชนีที่ใช้แสดงค่าความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างตัวแปรตามกับตัวแปรอิสระ มีค่าเท่ากับรากที่สองของสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ มีค่าอยู่ระหว่าง  $-1$  ถึง  $1$

ถ้า  $r = -1$  แสดงว่าตัวแปรตามมีความสัมพันธ์กับตัวแปรอิสระในเชิงเส้นตรงในเชิงผกผัน นั่นคือ เมื่อตัวแปรอิสระมีค่ามากขึ้นตัวแปรตามจะมีค่าน้อยลง

ถ้า  $r = +1$  แสดงว่าตัวแปรตามมีความสัมพันธ์กับตัวแปรอิสระในเชิงเส้นตรง นั่นคือ เมื่อตัวแปรอิสระมีค่ามากขึ้นตัวแปรตามจะมีค่ามากขึ้น

ถ้า  $r = 0$  แสดงว่าตัวแปรตามไม่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรอิสระในเชิงเส้นตรง โดยที่อาจจะมีความสัมพันธ์กันในแบบอื่น หรือไม่มีความสัมพันธ์กันเลยก็ได้

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{\left[ n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right] \left[ n \sum_{i=1}^n y_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n y_i \right)^2 \right]}}$$

ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (standard error)

ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานเป็นดัชนีที่ใช้วัดการกระจายของค่า  $y$  รอบเส้นถดถอย

$$\text{ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2 / (n - k)}$$

โดยที่  $n =$  จำนวนข้อมูล

$k =$  จำนวนตัวแปร สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามกับตัวแปรอิสระ

เพียงตัวเดียว  $k = 2$

## ประวัติผู้เขียน

นาย กฤษดา นลาฤทธิ์ เกิดที่จังหวัดกรุงเทพ ฯ เมื่อวันที่ 27 มีนาคม พ.ศ. 2507  
ได้รับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เกียรตินิยมอันดับสอง) สาขาเคมีวิศวกรรม ภาควิชาเคมีเทคนิค  
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2529

