



## เอกสารอ้างอิง

1. รายงานเชื้อเพลิงและพลังงานของประเทศไทย 2530 สำนักงานการพลังงานแห่งชาติ  
กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและการพลังงาน.
2. งานถ่านหิน กองเชื้อเพลิงธรรมชาติ, "พลังงานจากถ่านหินในประเทศไทย," ข่าวสารการ  
ธรณี, 31, 26-38, 2529.
3. ASTM Standards, D388, "Coal by Rank," American Society for Testing  
and Materials, U.S.A., 1987.
4. Meyer, R. A., Coal Handbook, pp. 1-50, Marcel Dekker Ltd., New York,  
1981.
5. Elliot, M. A., Chemical of Coal Utilization, pp. 414-419, pp. 1394-  
1395, Second Supplementary Volume, John Wiley & Sons, Inc.,  
1981.
6. Elliot, R. C., Coal Desulfurization Prior to Combustion, pp. 6-43,  
Noyes Data Corporation, Park Ridge, New Jersey, 1978.
7. Nishioka, M., M. L. Lee, and R. N. Castle, "Sulphur Heterocycles  
in Coal-Derived Products," Fuel, 65, 392-395, 1986.
8. Nankervis, J. C. and R. B. Furlong, "Phase Changes in Mineral  
Matter of North Dakota Lignites Caused by Heating to  
1200 °C," Fuel, 59, 425-430, 1980.
9. Lallai, A., G. Mura, and A. Viola, "Removal of Sulfur during the  
Combustion of Coal by Adding Limestone," International  
Chemical Engineering, 19(3), 445-453, 1979.
10. Gioia, F. and G. Mura, "Influence of Catalysts on SO<sub>2</sub> Control in  
Coal Combustion with Limestone," International Chemical  
Engineering, 20(3), 458-465, 1980.
11. Burdett, N. A., "The Inhibition of the Limestone Sulphation Process  
during Fluidized Bed Combustion - A Theoretical Approach,"  
J. Inst. Energy., 429, 198-208, 1983.

12. Slack, A. V., "Throwaway Process : Dry Systems," Pollution Control Review, Vol.4, 20-41, Noyes Data Corporation, New Jersey, 1971.
13. Boynton, R. S., Chemistry and Technology of Lime and Limestone, pp. 128-129, John Wiley & Sons, New York, 2<sup>nd</sup> ed., 1980.
14. อรุณรัตน์ วุฒิมงคลชัย, "ตัวแปรที่มีผลต่อคุณภาพของถ่านหินอัดก้อน," วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2528.
15. ดวงพร ชีรภาพไพสิฐ, "การขจัดกำมะถันในถ่านหินอัดก้อนโดยใช้ปูนขาว," วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2530.
16. Erten, M. H., "Comparison of Sulfur Absorption Capabilities of Pure Lime and Limestone in Coal Combustion Zone and Flue Gas Desulfurization Systems," Process. Util. High Sulfur Coals, Proc. Int. Conf., 451-466, 1985.
17. Simon, G. A., A. R. Garman, and A. A. Boni, "The Kinetic Rate of SO<sub>2</sub> Sorption by Cao," AIChE., 33(2), 211-217, 1987.
18. ASTM Standards, D2013, "Preparing Coal Samples for analysis," American Society for Testing and Materials, U.S.A., 1986.
19. ASTM Standards, D3172, "Proximate Analysis of Coal and Coke," American Society for Testing and Materials, U.S.A., 1986.
20. ASTM Standards, D3173, "Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke," American Society for Testing and Materials, U.S.A., 1986.
21. ASTM Standards, D3174, "Test Method for Ash in the Analysis of Coal and Coke," American Society for Testing and Materials, U.S.A., 1986.
22. ASTM Standards, D3175, "Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Coal and Coke," American Society for Testing and Materials, U.S.A., 1986.

23. ASTM Standards, D2015, "Test Method for Gross Calorific Value of Solid Fuel by the Adiabatic Bomb Calorimeter," American Society for Testing and Materials, U.S.A., 1987.
24. ASTM Standards, D2492, "Forms of Sulfur in Coal," American Society for Testing and Materials, U.S.A., 1987.
25. ASTM Standards, D3177, "Total Sulfur in the Analysis Sample of Coal and Coke," American Society for Testing and Materials, U.S.A., 1987.
26. ASTM Standards, D1551, "Sulfur in Petroleum Oils (Quartz-Tube Method)," American Society for Testing and Materials, U.S.A., 1987.
27. ASTM Standards, D4239, "Sulfur in the Analysis Sample of Coal and Coke Using High Temperature Tube Furnace Combustion Methods," American Society for Testing and Materials, U.S.A., 1987.
28. Ibarra, J. V. and J. M. Palacios, "Analysis of Coal and Char Ashes and Their Ability for Sulphur Retention," Fuel, 68, 861-867 1989.

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

วิธีวิเคราะห์



1) การเตรียมตัวอย่างถ่านหิน (Preparing coal samples for analysis) : ASTM D 2013

วิธีทดลอง

- นำตัวอย่างถ่านหิน 5 กิโลกรัม มาบดด้วยเครื่องบดแบบฆ้อน (Hammer mill) แล้วนำไปผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 4 (4.75 มม.) ซึ่งน้ำหนักถ่านหินที่ผ่านตะแกรงร่อนให้ได้อย่างน้อย 95 % ของน้ำหนักถ่านหินทั้งหมด แบ่งด้วยริฟเฟิล (Riffle) ให้มีน้ำหนักอย่างน้อย 2000 กรัม ตามตารางที่ ก.1
- นำตัวอย่างถ่านหินมาบดให้ละเอียดขึ้นด้วยเครื่องบดแบบ Cross beater mill แล้วนำไปผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 8 (2.36 มม.) ซึ่งน้ำหนักถ่านหินให้ได้อย่างน้อย 95 % แล้วแบ่งด้วยริฟเฟิล ให้มีน้ำหนักอย่างน้อย 500 กรัม
- ร่อนตัวอย่างถ่านหินด้วยตะแกรงร่อนเบอร์ 20 (850 ไมครอน) แบ่งด้วยริฟเฟิล ให้มีน้ำหนักอย่างน้อย 250 กรัม
- บดตัวอย่างถ่านหินด้วยเครื่องบดแบบ Ball mill แล้วร่อนผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 60 (250 ไมครอน) ให้ผ่านได้ทั้งหมด แล้วแบ่งด้วยริฟเฟิลอีกครั้ง ให้มีน้ำหนักอย่างน้อย 50 กรัม

ตารางที่ ก.1 การเตรียมตัวอย่างถ่านหินที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์

บดให้มือน้ำหนักอย่างน้อย 95 % เมื่อผ่านตะแกรงร่อนเบอร์	แบ่งให้มือน้ำหนักอย่างน้อย (กรัม)
4 (4.75 มม.)	2000
8 (2.36 มม.)	500
20 (850 ไมครอน)	250
60 (250 ไมครอน)	50

หมายเหตุ สำหรับตัวอย่างถ่านหินแม่เมาะ 3 เตรียมโดยการผสมถ่านหินแม่เมาะ 2 และถ่านหินแหล่งแม่เมาะที่มีร้อยละกำมะถันรวมประมาณ 8 ในอัตราส่วน 3:1

2) การวิเคราะห์ถ่านหินแบบประมาณ (Proximate analysis) : ASTM D 3172

2.1 ความชื้น (moisture) : ASTM D3173

วิธีทดลอง

- อบถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาในเตาอบ (drying oven) ที่อุณหภูมิ 104 -110 °ซ เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำเข้าเดสิเคเตอร์ (desiccator) ที่งไว้ประมาณ 15 นาที นำไปชั่งและบันทึกน้ำหนัก
- ชั่งตัวอย่างถ่านหินประมาณ 1 กรัม ลงในถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาที่ทราบน้ำหนักแล้ว บันทึกน้ำหนักตัวอย่างถ่านหิน
- นำไปเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 104 -110 °ซ เป็นเวลา 1 ชั่วโมงหรือจนกว่าน้ำหนักตัวอย่างถ่านหินคงที่
- นำถาดอลูมิเนียมออกมาทิ้งไว้ให้เย็นลง แล้วนำเข้าเดสิเคเตอร์ประมาณ 15 นาที จึงชั่งน้ำหนักถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาที่มีตัวอย่างอบแล้วอยู่ภายใน บันทึกผล

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

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

เมื่อ  $M$  = ร้อยละของความชื้น

$W_1$  = น้ำหนักของถาดอลูมิเนียมพร้อมฝารวมกับน้ำหนักตัวอย่างถ่านหินเริ่มต้นก่อนอบ (กรัม)

$W_2$  = น้ำหนักของถาดอลูมิเนียมพร้อมฝารวมกับน้ำหนักตัวอย่างถ่านหินที่อบแล้ว (กรัม)

$W$  = น้ำหนักของตัวอย่างถ่านหิน (กรัม)

2.2 เถ้า (ash) : ASTM D3174

วิธีการทดลอง

- เเผาครุซีเบิลพอร์ซเลน (porcelain crucible) พร้อมฝาในเตาเผา (muffle furnace) ที่อุณหภูมิ 750 °ซ เป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง นำ

- ออกมาทำให้เย็นในเดสิเกเตอร์ ซึ่งน้ำหนักครุชชีเบลพร้อมฝา
- ชั่งน้ำหนักตัวอย่างถ่านหินใส่ครุชชีเบล ประมาณ 1 กรัม
  - นำไปเผาบนตะเกียงเบนเซน จนควันระเหยหมด
  - ใส่ครุชชีเบลพร้อมฝาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 750 °C เป็นเวลาประมาณ 2 ชั่วโมง หรือน้ำหนักถ่านหินถ่วงที่
  - นำครุชชีเบลออกจากเตาเผา วางทิ้งไว้ให้เย็นลง แล้วนำไปใส่ในเดสิเกเตอร์ ซึ่งน้ำหนักพร้อมบันทึกผล

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

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

เมื่อ A = ร้อยละของถ่าน

$W_3$  = น้ำหนักของครุชชีเบลพร้อมฝาที่มีถ่าน (กรัม)

$W_4$  = น้ำหนักของครุชชีเบลพร้อมฝา (กรัม)

W = น้ำหนักของตัวอย่างถ่านหิน (กรัม)

### 2.3 ปริมาณสารระเหยในตัวอย่างถ่านหิน (Volatile Matter) : ASTM D3175

วิธีการทดลอง

- เผาครุชชีเบลพร้อมฝาในเตาเผาอุณหภูมิ 950 °C ประมาณ 30 นาที นำออกจากเตาเผา ทำให้เย็นในเดสิเกเตอร์ แล้วชั่งน้ำหนักของครุชชีเบลพร้อมฝา บันทึกผล
- ชั่งตัวอย่างถ่านหินใส่ในครุชชีเบลประมาณ 1 กรัม
- ปิดฝาครุชชีเบลให้เรียบร้อย นำไปให้ความร้อนโดยอยู่เหนือปากเตาเผา (tubular furnace) อุณหภูมิประมาณ 300 °C เป็นเวลา 3 นาที
- หย่อนครุชชีเบลให้อยู่บริเวณปากเตา อุณหภูมิประมาณ 600 °C เป็นเวลา 3 นาที
- หย่อนครุชชีเบลให้อยู่กึ่งกลางเตา อุณหภูมิประมาณ 950 °C เป็นเวลา 6 นาที
- นำครุชชีเบลออกมาทิ้งไว้ให้เย็น แล้วนำไปใส่ไว้ในเดสิเกเตอร์ประมาณ 15 นาที นำไปชั่งและบันทึกผล

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$V = 100(W_5 - W_6) / W - M$$

- เมื่อ  $V$  = ร้อยละของสารระเหย  
 $M$  = ร้อยละของความชื้น  
 $W_1$  = น้ำหนักของครุชชีเบิลพร้อมฝา รวมกับน้ำหนักถ่านหินก่อนเผา (กรัม)  
 $W_2$  = น้ำหนักของครุชชีเบิลพร้อมฝา รวมกับน้ำหนักถ่านหินหลังเผา (กรัม)  
 $W$  = น้ำหนักตัวอย่างถ่านหิน (กรัม)

#### 2.4 ปริมาณคาร์บอนคงตัวในตัวอย่างถ่านหิน (fixed carbon)

##### สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

ร้อยละของคาร์บอนคงตัว =  $100 - \text{ร้อยละของความชื้น} - \text{ร้อยละของเถ้า} - \text{ร้อยละของสารระเหย}$

#### 3) การหาค่าความร้อนของถ่านหิน (Gross heating value) : ASTM D2015

##### วิธีการทดลอง

- ปูเส้นใยแอสเบสตอส (asbestos) ลงในถ้วยเผาไหม้ จากนั้นใส่ตัวอย่างถ่านหินประมาณ 1 กรัม ซึ่งน้ำหนักให้ละเอียดถึง 0.0001 กรัม
- วางออกซิเจนบอมบ์บนที่ตั้ง ถอดฝาบอมบ์ออกแล้ววางบนขาตั้งบอมบ์ จากนั้นวัดและตัดลวดยาวประมาณ 10 ซม. นำมาผูกไว้ระหว่างปลายทั้งสองของอิเล็กทรอนิกส์ที่อยู่ที่ด้านล่างของฝาบอมบ์
- วางถ้วยที่บรรจุถ่านหิน ลงบนห่วงอิเล็กทรอนิกส์ใต้ฝาบอมบ์ จัดให้ลวดที่ผูกไว้โค้งเป็นรูปตัวยูและอยู่บนผิวหน้าของถ่านหิน
- เติมน้ำกลั่นลงในออกซิเจนบอมบ์ 1 มิลลิลิตร
- ประกอบฝาบอมบ์กับตัวบอมบ์เข้าด้วยกัน ชันเกลียวและปิดวาล์วปล่อยก๊าซให้แน่นด้วยมือ นำไปอัดก๊าซออกซิเจนอย่างช้า ๆ จนมีความดัน 20 -25 บรรยากาศ
- เติมน้ำอุณหภูมิประมาณ 24-25 °C ลงในถังแช่บอมบ์ 1 ลิตร นำออกซิเจนบอมบ์ที่อัดก๊าซไว้เรียบร้อยแล้ววางลงในถังแช่บอมบ์ เสียบสายอิเล็กทรอนิกส์ 2 เส้น เข้ากับขั้วอิเล็กทรอนิกส์บนฝาบอมบ์ เติมน้ำลงไปในถังอีก 1 ลิตร
- ตรวจสอบว่ามีฟองก๊าซฟุ้งขึ้นมาจากส่วนต่าง ๆ ของฝาบอมบ์หรือไม่ก่อน แล้วปิดฝาเครื่อง ลดระดับเทอร์โมมิเตอร์และเครื่องกวานลงมา
- เปิดสวิทช์ให้เครื่องกวนทำงาน ทุก ๆ 30 วินาที บันทึกค่าอุณหภูมิของน้ำที่อยู่ในถังหุ้มของระบบบอมบ์ (jacket) และน้ำในถังแช่บอมบ์ เมื่อได้ค่าใกล้เคียง



ต่างกันไม่เกิน 0.01 °ซ จึงกดปุ่มจุดระเบิด

- หยุดการทดลองเมื่ออุณหภูมิของน้ำในถังแช่บอมบ์เพิ่มขึ้นจนคงที่จากการอ่านทุกนาที ไม่ต่ำกว่า 2 ค่าต่อเนื่องกัน

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$Hg = (t(W) - e1 - e2 - e3 - e4) / g$$

เมื่อ Hg = Gross heat of combustion, cal/g

t = อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น; องศาเซลเซียส

W = ค่าน้ำสมมูลของเครื่องบอมบ์คาลอรีมิเตอร์ (Water Equivalent), แคลอรี/องศาเซลเซียส

e1 = การแก้ค่าความร้อนของการเกิด HNO<sub>3</sub>  
= มิลลิลิตรของ 0.0709 N. Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>

e2 = การแก้ค่าความร้อนของการเกิด H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>  
= 13.7 x (%S) , cal

e3 = การแก้ค่าความร้อนของ fuse wire  
= 2.3 x ความยาวลวดที่ไหม้ไป, เซนติเมตร

e4 = การแก้ค่าความร้อนของ cotton thread = 0

g = น้ำหนักของตัวอย่าง, กรัม

#### 4) การหารูปแบบกำมะถัน (forms of sulfur) : ASTM D2492

##### 4.1 การหาปริมาณกำมะถันซัลเฟต (sulfate sulfur)

###### วิธีการทดลอง

- ชั่งตัวอย่างถ่านหินประมาณ 2 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ เติมสารละลาย HCl (2:3) 50 มิลลิลิตร แล้วเติมสารละลายเอธิลแอลกอฮอล์ ประมาณ 2 มิลลิลิตร คนให้ทั่วแล้วปิดด้วยกระดาษนิกา
- ต้มให้สารละลายค่อย ๆ เดือด เป็นเวลา 30 นาที
- กรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 ล้างตะกอนด้วยน้ำร้อนหลาย ๆ ครั้ง จนแน่ใจว่าล้าง HCl ได้หมด กระดาษกรองและตะกอนที่ได้จากการกรอง เก็บไว้เพื่อนำไปวิเคราะห์หากำมะถันไนไตรต์ต่อไป
- สารละลายที่ได้จากการกรอง นำมาเติมน้ำโบรมีน (Bromine water) 5

- มิลลิลิตร ต้มให้เดือดอย่างน้อย 5 นาที
- เติมสารละลาย  $\text{NH}_4\text{OH}$  อย่างช้าๆ จนกระทั่งเป็นด่างเล็กน้อย (ทดสอบโดยใช้กระดาษลิตมัส) แล้วเติมให้เกินพออีก 5 มิลลิลิตร คนสารละลายอย่างสม่ำเสมอ จะเกิดตะกอนสีน้ำตาลแดงของ  $\text{Fe}(\text{OH})_3$
  - กรองตะกอนผ่านกระดาษกรองเบอร์ 1 ล้างตะกอนด้วย  $\text{NH}_4\text{OH}$  (1:10) ที่ร้อน 2 - 3 ครั้ง
  - นำสารละลายที่ได้มาเติม methyl orange 2-3 หยดทำให้เป็นกรด ด้วย  $\text{HCl}$  เข้มข้น
  - ต้มสารละลายให้เดือดเติม  $\text{BaCl}_2$  อย่างช้าๆ 10 มิลลิลิตร กวนสารละลายตลอดเวลา ต้มสารละลายต่อไปอีก 15 นาที จะได้ตะกอนสีขาวขุ่นของ  $\text{BaSO}_4$  ตั้งทิ้งไว้อย่างน้อย 2 ชั่วโมง
  - กรองตะกอน  $\text{BaSO}_4$  ด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 ล้างตะกอนด้วยน้ำร้อนหลาย ๆ ครั้งจนหมดคลอไรด์ไอออน ซึ่งตรวจสอบโดยใช้  $\text{AgNO}_3$
  - นำตะกอนที่กรองได้พร้อมกระดาษกรองใส่ครุชชีเบลที่ทราบน้ำหนักแล้ว เผลด้วยตะเกียงเบนเซนจนกระดาษกรองไหม้หมด จากนั้นนำครุชชีเบลเข้าเตาเผา ที่อุณหภูมิ  $800^\circ\text{C}$  เป็นเวลาประมาณ 2 ชั่วโมง หรือจนตะกอน  $\text{BaSO}_4$  มีน้ำหนักคงที่
  - นำครุชชีเบลออกจากเตาเผา ทำให้เย็นในเดสิเกเตอร์ ชั่งน้ำหนักตะกอน  $\text{BaSO}_4$
  - ทำ Blank correction ทำการทดลองเหมือนข้างต้นทุกประการแต่ไม่ใช้ตัวอย่าง ถ่านหิน เพื่อตรวจสอบว่าสารเคมีที่ใช้ มีปริมาณกำมะถันซัลเฟตอยู่เล็กน้อยเพียงใด
- สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

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

เมื่อ  $A =$  น้ำหนักตะกอน  $\text{BaSO}_4$  (กรัม)

$B =$  น้ำหนักตะกอน  $\text{BaSO}_4$  ใน blank (กรัม)

$C =$  น้ำหนักตัวอย่างถ่านหิน (กรัม)

#### 4.2 การหาปริมาณกำมะถันไพไรต์ (pyritic sulfur)

ทำการวิเคราะห์ที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
วิธีการทดลอง

- นำตะกอนที่ได้จากการวิเคราะห์หาปริมาณกำมะถันซัลเฟต มาย่อยด้วยสารละลาย

$\text{HNO}_3$  (1:7) 50 มิลลิลิตร ประมาณ 30 นาที หรือทิ้งค้างคืน

- กรองสารละลายด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 ล้างตะกอนด้วยน้ำเย็นอย่างน้อย 6 ครั้ง
- ทำสารละลายให้เจือจางด้วยน้ำกลั่น จนได้ปริมาตร 250 มิลลิลิตร
- นำไปวัดหาปริมาณเหล็กด้วยเครื่อง atomic absorption spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 248.3 นาโนเมตร

การเตรียม standard curve ของเหล็ก

- นำสารละลายมาตรฐานของเหล็กที่มีความเข้มข้น 1000 ppm มา 2.5 มล. ทำให้เป็น 100 มล. ในขวดปริมาตรขนาด 100 มล. จะได้ความเข้มข้นของเหล็ก 25 ppm
  - บีบสารละลายที่มีความเข้มข้นของเหล็ก 25 ppm มา 1 มล. ทำให้เป็น 10 มล. ในขวดปริมาตรขนาด 10 มล. จะได้ความเข้มข้นของเหล็ก 2.5 ppm
  - บีบสารละลายที่มีความเข้มข้นของเหล็ก 25 ppm มา 2 มล. ทำให้เป็น 10 มล. ในขวดปริมาตรขนาด 10 มล. จะได้ความเข้มข้นของเหล็ก 5 ppm
  - บีบสารละลายที่มีความเข้มข้นของเหล็ก 25 ppm มา 3 มล. ทำให้เป็น 10 มล. ในขวดปริมาตรขนาด 10 มล. จะได้ความเข้มข้นของเหล็ก 7.5 ppm
  - บีบสารละลายที่มีความเข้มข้นของเหล็ก 25 ppm มา 4 มล. ทำให้เป็น 10 มล. ในขวดปริมาตรขนาด 10 มล. จะได้ความเข้มข้นของเหล็ก 10 ppm
  - นำสารละลายมาตรฐานที่มีความเข้มข้นของเหล็ก 2.5, 5, 7.5 และ 10 ppm มาวัดค่า absorbance โดยเครื่อง atomic absorption spectrophotometer
  - สร้าง standard curve ระหว่างค่า absorbance กับความเข้มข้นของเหล็ก
  - จากค่า absorbance ของสารละลายที่วิเคราะห์ได้ สามารถหาปริมาณเหล็กได้
  - จากปริมาณเหล็กที่ทราบ นำไปคำนวณหาปริมาณกำมะถันไฟไรต์ในตัวอย่างถ่านหินได้
- สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$\text{ร้อยละของเหล็ก} = 1/4 (x/W)$$

เมื่อ  $x$  = ความเข้มข้นของเหล็กที่อ่านจาก standard curve (ppm)

$W$  = น้ำหนักของตัวอย่างถ่านหิน (ppm)

$$\text{ร้อยละของกำมะถันไฟไรต์} = \text{ร้อยละของเหล็ก} \times 1.148$$

หมายเหตุ แสดงที่มาของสูตร

หน่วย ppm = มิลลิกรัม/ลิตร

สมมติว่าปริมาณเหล็ก  $y$  มิลลิกรัม/ลิตร ในสารละลายตัวอย่าง 10 มล.

นั่นคือ สารละลายตัวอย่าง 10 มล. มีปริมาณเหล็ก  $(10)y/1000$  มิลลิกรัม

สารละลายตัวอย่าง 250 มล. มีปริมาณเหล็ก  $(10)(250)y/1000$  มิลลิกรัม

น้ำหนักถ่านหิน  $W$  กรัม มีปริมาณเหล็ก  $(10)(250)y/1000 \times 1000$  กรัม

น้ำหนักถ่านหิน 100 กรัม มีปริมาณเหล็ก  $1/4 (y/W)$  กรัม

ถ้ามีปริมาณเหล็ก 55.85 กรัม จะเป็นซัลเฟอร์ในรูป ( $FeS_2$ )  $32 \times 2$  กรัม

ปริมาณเหล็ก  $1/4 (y/W)$  กรัม จะเป็นซัลเฟอร์ในรูป ( $FeS_2$ )

$$= (32 \times 2/55.85)(1/4)(y/W) \text{ กรัม}$$

$$= 1.148 \times \text{ร้อยละของเหล็ก}$$

#### 4.3 การหาปริมาณกำมะถันอินทรีย์ (organic sulfur)

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

ร้อยละของกำมะถันอินทรีย์ = ร้อยละของกำมะถันรวม - ร้อยละของกำมะถันซัลเฟต

- ร้อยละของกำมะถันไพไรต์

#### 5) การหาปริมาณกำมะถันรวม (Total sulfur) โดยวิธี Eschka : ASTM D3177

วิธีการทดลอง

- ชั่งถ่านหิน 1 กรัม ผสมกับสาร Eschka ( $MgO:Na_2CO_3 = 2:1$ ) 3 กรัม ในครุชชีเบล แล้วปิดทับด้วยสาร Eschka อีก 1 กรัม
- นำไปเผาบนตะเกียงเบนเซน จนควันระเหยหมด
- นำเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิ 800 °C ประมาณ 3 ชั่วโมง
- นำครุชชีเบลออกจากเตาเผา ย่อยสารในครุชชีเบลด้วยน้ำร้อน 100 มิลลิลิตร เป็นเวลาประมาณ 30 นาที
- กรองสารละลายด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 ล้างด้วยน้ำร้อนหลายๆ ครั้ง จนมีปริมาตร 250 มิลลิลิตร
- ทำสารละลายที่กรองได้ให้เป็นกรดด้วย  $HCl$  (1:9)
- ทำสารละลายให้เป็นกลางด้วย  $Na_2CO_3$  โดยใช้ methyl orange เป็นอินดิเคเตอร์

- ทำให้เป็นกรดเล็กน้อยโดยเติม HCl (1:9) 1 มิลลิลิตร
- ต้มสารละลายให้เดือด แล้วเติมสารละลาย BaCl<sub>2</sub> อย่างช้าๆ 10 มิลลิลิตร  
คนตลอดเวลาขณะต้ม ต้มสารละลายต่อไปอีกประมาณ 15 นาที จะเกิดตะกอนขาว  
ขุ่นของ BaSO<sub>4</sub> ตั้งทิ้งไว้อย่างน้อย 2 ชั่วโมง
- กรองตะกอน BaSO<sub>4</sub> ด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 ล้างตะกอนด้วยน้ำร้อนหลาย ๆ  
ครั้งจนหมดคลอไรด์ไอออน ทดสอบด้วยสารละลาย AgNO<sub>3</sub>
- นำตะกอนที่กรองได้พร้อมกระดาษกรอง ใส่ครุชชีเบลที่ทราบน้ำหนักแล้ว เฝายบน  
ตะเกียงบนเซนจนกระดาษกรองไหม้หมด นำเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิ 800 °C เป็น  
เวลาประมาณ 2 ชั่วโมง หรือจนน้ำหนักตะกอน BaSO<sub>4</sub> คงที่
- นำครุชชีเบลออกจากเตาเผา ทำให้เย็นในเดสิเกเตอร์ ชั่งน้ำหนักตะกอน BaSO<sub>4</sub>
- ทำ Blank correction โดยทดลองเหมือนข้างต้นทุกประการ เพียงแต่ไม่ใช่  
ตัวอย่างถ่านหิน

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

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

- เมื่อ A = น้ำหนักตะกอน BaSO<sub>4</sub> (กรัม)  
 B = น้ำหนักตะกอน BaSO<sub>4</sub> ใน blank (กรัม)  
 C = น้ำหนักตัวอย่างถ่านหิน (กรัม)

6) การหาคำมะถันในหลอดแก้วควอร์ตซ์ : ASTM D1551, D4239

การวิเคราะห์โดยวิธีนี้ ถ่านหินตัวอย่างต้องมีร้อยละกำมะถันรวมไม่เกิน 5 จึงจะได้  
ข้อมูลที่น่าเชื่อถือและมีความแม่นยำ 95%

ในงานวิจัยนี้ ทำการทดลองโดยใช้ตัวอย่างเดียวกันซ้ำสองครั้ง โดยพบว่ามีความแตก  
ต่างกันในการทดลองซ้ำตามที่แสดงในตารางที่ ก.2 สำหรับตัวอย่างที่ให้ค่าสูง ต้องทำการ  
ทดลองใหม่

ตารางที่ ก.2 แสดงความแตกต่างที่ยอมรับได้ในการทดลองซ้ำ สำหรับการทดลองหาค่ามอดิน  
ในหลอดแก้วควอร์ตซ์

ร้อยละค่ามอดินรวม	ความแตกต่างไม่เกิน
0-0.5	0.07
0.5-1.0	0.10
1.0-2.0	0.15
2.0-3.0	0.26
3.0-5.0	0.43

วิธีการทดลอง

- เปิดสวิตช์ให้เตาเผา (tube furnace) ร้อนจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการ
- ชั่งถ่านหินใส่ในเรือฟอร์ชเลนที่ทราบน้ำหนักแล้ว ให้มีน้ำหนักดังนี้คือ  
น้ำหนัก 0.50 กรัม สำหรับถ่านหินที่มีค่ามอดินไม่เกิน 4 %  
น้ำหนัก 0.25 กรัม สำหรับถ่านหินที่มีค่ามอดินมากกว่า 4 %
- ใส่สารละลาย  $H_2O_2$  30 มิลลิลิตร ใน primary absorber และ 10 มิลลิลิตร  
ใน secondary absorber พร้อมประกอบเครื่องมือต่าง ๆ
- เปิดปั๊มสุญญากาศ (vacuum pump) เพื่อปรับอัตราการไหลของอากาศเท่ากับ  
2.5 ลิตร/นาที
- ปิดปั๊ม ใส่เรือฟอร์ชเลนที่ตำแหน่งปากเตา เปิดปั๊มเป็นเวลา 2 นาที
- ปิดปั๊ม เลื่อนเรือฟอร์ชเลนเข้าไปอีกประมาณ 3 -4 เซนติเมตร เปิดปั๊มเป็น  
เวลา 4 นาที
- ปิดปั๊ม เลื่อนเรือฟอร์ชเลนเข้าไปอยู่กลางเตา เปิดปั๊มเป็นเวลา 9 นาที (ใช้  
อากาศ 3 นาที และใช้ออกซิเจน 6 นาที)
- ปิดปั๊มเลื่อนหลอดแก้วควอร์ตซ์ออก ใช้จุกปิด primary absorber ตรง adapter  
ที่ใส่สีกครุ่นหนึ่ง จึงล้าง spray trap, secondary absorber และ adapter  
ด้วยน้ำกลั่นปริมาณไม่เกิน 20 มิลลิลิตร แล้วเทลงใน flask
- เติมนินดิเคเตอร์ (methyl red : bromocresol green = 1:3) 3 - 4

หยด ลงในสารละลายที่ได้ จากนั้นไทเทรตด้วยสารละลาย NaOH มาตรฐาน  
(0.06 N) จดปริมาณ NaOH ที่ใช้

- ทำ blank correction โดยทำการทดลองเหมือนข้างต้นทุกประการ เพียงแต่  
ไม่ใช้ตัวอย่างถ่านหิน

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$S = 16.03(A - B)N / 10W$$

เมื่อ S = ร้อยละโดยน้ำหนักของกำมะถัน

A = ปริมาตรของ NaOH ที่ใช้ (มิลลิลิตร)

B = ปริมาตรของ NaOH ที่ใช้สำหรับ blank (มิลลิลิตร)

N = normality ของ NaOH

W = น้ำหนักถ่านหิน (กรัม)

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการคำนวณ

1. หาร้อยละกำมะถันในถ่านหินที่ถูกปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ถ่านหิน

ข้อมูลการทดลอง : ถ่านหินแม่เมาะ 1 ที่อุณหภูมิ 800 °ซ CaO/S = 1

ครั้งที่ 1	A = ปริมาตรของ NaOH ที่ใช้	=	5.75	มม.
	B = ปริมาตรของ NaOH ที่ใช้สำหรับ blank	=	0	มม.
	N = normality ของ NaOH	=	0.0301	N.
	W = น้ำหนักของถ่านหิน	=	0.5000	กรัม

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$S = 16.03(A - B)N / 10W$$
$$= 16.03(5.75 - 0)(0.0301) / 10(0.5000)$$

ร้อยละกำมะถันในถ่านหินที่ถูกปล่อยออกมา ครั้งที่ 1 = 0.55

ครั้งที่ 2	A =	5.90	มม.
	B =	0	มม.
	N =	0.0301	N.
	W =	0.5000	กรัม

ร้อยละกำมะถันในถ่านหินที่ถูกปล่อยออกมา ครั้งที่ 2 = 0.57

ร้อยละกำมะถันในถ่านหินที่ถูกปล่อยออกมาเฉลี่ย = 0.56

2. หาร้อยละกำมะถันในก๊าซที่ถูกปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ถ่านหิน เทียบกับกำมะถันทั้งหมด

ข้อมูลการทดลอง : ถ่านหินแม่เมาะ 1 ที่อุณหภูมิ 800 °ซ CaO/S = 1

มีร้อยละกำมะถันรวม = 2.20

ร้อยละกำมะถันในก๊าซที่ถูกปล่อยออกมาเทียบกับกำมะถันทั้งหมด =  $0.56 \times 100 / 2.20$   
= 25.5

3. หาร้อยละกำมะถันในก๊าซที่ถูกดูดซับโดยปูนขาว เทียบกับกำมะถันทั้งหมด



ข้อมูลการทดลอง : ถ่านหินแม่เมาะ 1 ที่อุณหภูมิ 800 °ซ

ที่อุณหภูมิ 800 °ซ  $CaO/S = 0$

ร้อยละกำมะถันในก๊าซที่ถูกปล่อยออกมาเทียบกับกำมะถันทั้งหมด = 63.2

ที่อุณหภูมิ 800 °ซ  $CaO/S = 1$

ร้อยละกำมะถันในก๊าซที่ถูกปล่อยออกมาเทียบกับกำมะถันทั้งหมด = 25.5

ร้อยละกำมะถันในก๊าซที่ถูกดูดจับโดยปูนขาวเทียบกับกำมะถันทั้งหมด = 63.2-25.5

= 37.7



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียน

นางสาว พัชรี ชุตติศิลป์ เกิดวันที่ 6 มกราคม 2509 ที่กรุงเทพมหานคร  
ได้รับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีทางเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค จาก  
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2529



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย