

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- เกริกชัย สุภาภรณ์จันท์. ไอน้ำและพลังงานจากถ่านหิน. กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2529.
- ดวงพร ชีรภาพไพสิฐ. การจัดกัมมะถันในถ่านหินอัดก้อนโดยใช้ปูนขาว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2530.
- นิภา เศรษฐไพศาล. การนำเศษถ่านหินมาอัดก้อนเพื่อใช้ในครัวเรือน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2528.
- นิยม จักร์เทพา และ ชีระ มนัสธรรม. คู่มือการผลิตและใช้เตาหุงต้มประสิทธิภาพสูง. กรุงเทพมหานคร : กองเศรษฐกิจพลังงาน สำนักงานพลังงานแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการพลังงาน, 2527
- พระราชกำหนดมาตรฐานคุณภาพอากาศ พ. ศ. 2524. ราชกิจจานุเบกษา 98 : (1 ธันวาคม 2524) : 4323.
- พัชรี ชุตติศิลป์. ปฏิกิริยาของปูนขาวกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ปลดปล่อยออกมาระหว่างการเผาไหม้ถ่านหิน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2533.
- พัฒนาและส่งเสริมพลังงาน, กรม. รายงานพลังงานของประเทศไทย 2534. กรุงเทพมหานคร : กองเศรษฐกิจและการพลังงาน กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, 2535
- วิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, กระทรวง. ข้อกำหนดการปลดปล่อยก๊าซมลพิษจากโรงงานอุตสาหกรรม (โครงร่าง). กรุงเทพมหานคร : สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม. (อัดสำเนา)
- สุชาติ อารีรุ่งเรืองกุล. เตาหุงต้มเพื่อใช้กับถ่านหินอัดก้อน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2530.
- อรพินท์ พัฒนเกรียงไกร. แหล่งกำเนิดของอากาศเป็นพิษและผลต่อสุขภาพ. ลำปางเวชสาร ฉบับที่ 1 (มกราคม-เมษายน 2527) : 17-23.

อรุณรัตน์ วุฒิมงคลชัย. ตัวแปรที่มีผลต่อคุณภาพถ่านหินอัดก้อน. วิทยานิพนธ์ปริญญา  
มหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2528

### ภาษาอังกฤษ

ASTM Standards, D 388. Standard Classification of Coals by Rank. American  
Society for Testing and Materials, U.S.A., 1992.

\_\_\_\_, D 1757. Standard Test Methods for Sulfur in Ash from Coal and Coke.  
American Society for Testing and Materials, U.S.A., 1992.

\_\_\_\_, D 2013. Standard Method of Preparing Coal Sample for Analysis.  
American Society for Testing and Materials, U.S.A., 1992.

\_\_\_\_, D 2015. Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke  
by The Adiabatic Bomb Calorimeter. American Society for Testing and  
Materials, U.S.A., 1992.

\_\_\_\_, D 2492. Standard Test Methods for Forms of Sulfur in Coal. American  
Society for Testing and Materials, U.S.A., 1992.

\_\_\_\_, D 3172. Practice for Proximate Analysis of Coal and Coke. American  
Society for Testing and Materials, U.S.A., 1992.

\_\_\_\_, D 3173. Test Method for Moisture in Analysis Sample of Coal and Coke.  
American Society for Testing and Materials, U.S.A., 1992.

\_\_\_\_, D 3174. Test Method for Ash in Analysis Sample of Coal and Coke.  
American Society for Testing and Materials, U.S.A., 1992.

\_\_\_\_, D 3175. Test Method for Volatile Matter in Analysis Sample of Coal and  
Coke. American Society for Testing and Materials, U.S.A., 1992.

\_\_\_\_, D 3177. Test Method for Total Sulfur in Analysis Sample of Coal and Coke.  
American Society for Testing and Materials, U.S.A., 1992.

Borgwardt, R.H., and Bruce, K.R. Effect of specific surface area on the reactivity  
of CaO with SO<sub>2</sub>. *AIChE Journal* 32 (February 1986) : 239-246.

- Duxbury, and Welford, G.B. The effect of particle size on  $\text{NO}_x$  emissions during the firing of pulverised coal in a shell boiler. J. of Inst. of Energy (September 1989) : 147-151.
- Elliott, M.A. Chemistry of Coal Utilization. 2nd Supplementary Volume, John Wiley & Sons, Inc., 1981.
- Elliott, R.C. Coal Desulfurization Prior to Combustion. New Jersey : Noyes Data Corporation, 1978.
- Flagan, R.C., and Seinfeld, J.H. Fundamentals of Air Pollution Engineering. New Jersey : Prentice-Hall, Inc., 1988.
- Gioia, F., and Mura, G. Influence of catalysts on  $\text{SO}_2$  control in coal combustion with limestone. International Chemical Engineering 20 (October 1980) : 458-465.
- Huang, Z., Wang, P., Lei, X. Process for reducing sulfur dioxide emission from burning coal containing sulfur. United States Patent no. 5,049,163, 1991.
- Jackson, M.H., Morris, G.P., Smith, P.G., and Crawford, J.F. Environmental Health Reference Book. 1st edition (reprinted), Northants, England : Butterworth-Heinemann, 1990.
- Lalai, A., Mura, G. and Viola, A. Removal of sulfur during the combustion with limestone. International Chemical Engineering 29 (July 1989) : 445-453.
- Levenspiel, O. Chemical Reaction Engineering. 2nd edition, John Wiley & Sons, 1972.
- Lewis, R.J., Sr., Hazardous Chemicals Desk Reference. 2nd edition, New York : Van Nostrand, 1991.
- Lowry, H.H. Chemistry of Coal Utilization. Supplementary Volume, John Wiley & Sons, Inc., 1963.
- Meyer, R.A., Coal Handbook. New York, Marcel Dekker, Ltd., 1981.

- Ninomiya, Y., Yokoi, K., Arai, N., Hasatani, M. Characteristic of emission of char NO during the combustion of a single particle of coal char. International Chemical Engineering. 29 (July, 1989) : 512-516.
- Smart, J.P., Kamp, W.L., and Morgan, M.E. The effect of burner scale on NO<sub>x</sub> emissions from a swirl stabilized pulverized coal burner. Fuel 69 (November 1990) : 1350-1355.
- Thiessen, G. Chemistry of Coal Utilization. Supplementary Volume, John Wiley & Sons, 1963.
- United States of America. Office of the Federal Register. Code of Federal Regulations. Part 400-429, National Archives and Records Administration, U.S.A., 1991.



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก.

### วิธีการวิเคราะห์

#### ก. 1 การเตรียมตัวอย่างถ่านหิน : ASTM D 2013

เครื่องมือ เครื่องบดแบบ hammer mill เครื่องบดแบบ cross beater mill  
เครื่องบดแบบ ball mill ตะแกรงร่อนเบอร์ 4, 8, 20 และ 60 riffle

##### วิธีการเตรียมตัวอย่าง

1. นำตัวอย่างถ่านหินดิบ (gross sample) จำนวน 5 กิโลกรัม มาบดด้วยเครื่องบด hammer mill แล้วนำไปผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร) ซึ่งน้ำหนักถ่านหินบดที่ผ่านตะแกรงให้ได้อย่างน้อยร้อยละ 95 ของน้ำหนักถ่านหินทั้งหมด นำไปแบ่งด้วย riffle ให้ได้น้ำหนักอย่างน้อย 2000 กรัม
2. นำตัวอย่างถ่านหินบดมาบดให้ละเอียดด้วยเครื่องบดแบบ cross beater mill แล้วนำไปผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 8 (2.36 มิลลิเมตร) ซึ่งน้ำหนักถ่านหินที่ผ่านตะแกรงร่อนให้ได้ อย่างน้อยร้อยละ 95 ของน้ำหนักถ่านหินทั้งหมด นำไปแบ่งด้วย riffle ให้ได้น้ำหนักอย่างน้อย 500 กรัม
3. บดตัวอย่างถ่านหินบดด้วยเครื่องบดแบบ cross beater mill และนำไปร่อนผ่าน ตะแกรงเบอร์ 20 (850 ไมโครเมตร) ให้ถ่านหินบดผ่านตะแกรงร่อนอย่างน้อยร้อยละ 95 แล้วแบ่งด้วย riffle ให้ได้น้ำหนักอย่างน้อย 250 กรัม
4. บดตัวอย่างถ่านหินบดด้วยเครื่องบดแบบ cross beater mill และแบบ ball mill แล้วนำไปร่อนผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 60 (250 ไมโครเมตร) โดยให้ถ่านหินบดละเอียดผ่าน ตะแกรงร่อนจนหมด นำไปแบ่งด้วย riffle อีกครั้งให้ได้น้ำหนักอย่างน้อย 50 กรัม

การเตรียมตัวอย่างถ่านหิน สามารถแสดงเป็นตารางได้ดังนี้

บดให้มีน้ำหนัก 95 % เมื่อผ่านตะแกรงร่อนเบอร์	แบ่งให้มีน้ำหนักอย่างน้อย (กรัม)
4 (4.75 มิลลิเมตร)	2000
8 (2.36 มิลลิเมตร)	500
20 (850 ไมโครเมตร)	250
60* (250 ไมโครเมตร)	50

\* ต้องผ่าน 100 %

## ก. 2 การวิเคราะห์ถ่านหินแบบประมาณ (proximate analysis) : ASTM D 3172

### 1) การหาปริมาณความชื้นในถ่านหิน (moisture) : ASTM D 3173

เครื่องมือ ตู้อบ (dry oven) จานอลูมิเนียมพร้อมฝาปิด desiccator

วิธีการทดลอง

1. อบจานอลูมิเนียมพร้อมฝาปิดในตู้อบที่อุณหภูมิ 104-110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำเข้า desiccator ทิ้งไว้ให้เย็น ชั่งน้ำหนัก
2. ชั่งตัวอย่างถ่านหินประมาณ 1 กรัม ใส่จานอลูมิเนียมที่ทราบน้ำหนักแล้วปิดฝา
3. นำเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 104-110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยเปิดฝา ระหว่างอบ
4. นำถาดอลูมิเนียมออกจากตู้อบ นำเข้า desiccator ทิ้งไว้ให้เย็น ชั่งน้ำหนัก

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

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

- เมื่อ  $M$  = ร้อยละความชื้น  
 $W_1$  = น้ำหนักถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาและถ่านหินก่อนอบ (กรัม)  
 $W_2$  = น้ำหนักถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาและถ่านหินหลังอบ (กรัม)  
 $W$  = น้ำหนักถ่านหิน (กรัม)

2) การหาปริมาณสารระเหยได้ (volatile matter) : ASTM D 3175

เครื่องมือ เตาเผา (tubular furnace) nickel crucible พร้อมฝาปิด desiccator

วิธีการทดลอง

1. เตา nickel crucible พร้อมฝา ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ในเตาเผา ประมาณ 30 นาที นำออกจากเตาเผา ทิ้งไว้ให้เย็นใน desiccator ชั่งน้ำหนัก
2. ชั่งตัวอย่างถ่านหินประมาณ 1 กรัม ใส่ใน nickel crucible ปิดฝา
3. นำเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียส นาน 3 นาที และที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส นาน 3 นาที จากนั้นจึงใส่ลงกลางเตาที่มีอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส นาน 6 นาที
4. นำออกจากเตาเผา ทิ้งไว้ให้เย็นใน desiccator ชั่งน้ำหนัก

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$= \left[ \frac{W_2 - W_1}{W} \times 100 \right] - M$$

- เมื่อ  $V$  = ร้อยละของสารระเหยได้  
 $W_1$  = น้ำหนักของ nickel crucible พร้อมฝาและถ่านหินก่อนเผา (กรัม)  
 $W_2$  = น้ำหนักของ nickel crucible พร้อมฝาและถ่านหินหลังเผา (กรัม)  
 $W$  = น้ำหนักถ่านหิน (กรัม)  
 $M$  = ร้อยละความชื้น



## 3) การหาปริมาณเถ้า (ash) : ASTM D 3174

เครื่องมือ เตาเผา (muffle furnace) porcelain crucible พร้อมฝาปิด  
desiccator ตะเกียงบุนเซน

## วิธีการทดลอง

1. เตา porcelain crucible พร้อมฝาปิด ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที นำออกมาและทิ้งไว้ให้เย็นใน desiccator ชั่งน้ำหนัก
2. ชั่งตัวอย่างถ่านหินประมาณ 1 กรัม ใส่ใน porcelain crucible ที่ทราบน้ำหนัก
3. นำไปเผาด้วยตะเกียงบุนเซนจนหมดควัน
4. ปิดฝาและนำเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียสเป็นเวลาประมาณ 2 ชั่วโมง หรือจนน้ำหนักคงที่
5. นำออกจากเตาเผา ทิ้งไว้ให้เย็นใน desiccator ชั่งน้ำหนัก

## สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

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

เมื่อ A = ร้อยละของเถ้า

$W_2$  = น้ำหนักของ porcelain crucible พร้อมฝาและเถ้าของถ่านหิน  
หลังเผา(กรัม)

$W_1$  = น้ำหนักของ porcelain crucible พร้อมฝา (กรัม)

W = น้ำหนักถ่านหิน (กรัม)

## 4) การหาปริมาณคาร์บอนคงตัว (fixed carbon)

## สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละของคาร์บอนคงตัว} &= 100 - (\text{ร้อยละความชื้น}) - \\ &(\text{ร้อยละของสารระเหยได้}) - \\ &(\text{ร้อยละของเถ้า}) \end{aligned}$$

### ก. 3 การหาค่าความร้อนของถ่านหิน (gross heating value) : ASTM D 2015

เครื่องมือ บอมบ์แคลอรีมิเตอร์แบบ adiabatic พร้อมชุดทดลองบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ บีกเกอร์ ปิเปต บิวเรต ขวดรูปชมพู่ กรวยกรองพร้อมกระดาษกรอง เตาเผา (muffle furnace) ตู้อบ (dry oven) porcelain crucible desiccator

#### สารเคมี

- สารละลายแบเรียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 10
- สารละลายกรดเกลือ (HCl) 1 : 9
- สารละลายโซเดียมคาร์บอเนต ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) 0.0709 N
- methyl orange indicator
- กรดเบนโซอิกอัดเม็ด

#### วิธีการทดลอง

การหาค่ามาตรฐานของเครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ (water equivalent)

1. ชั่งน้ำหนักถ้วยเผาไหม้ (combustion capsule) แล้วใส่กรดเบนโซอิกอัดเม็ดน้ำหนักประมาณ 1 กรัม ลงในถ้วยเผาไหม้ ชั่งน้ำหนักให้ละเอียดถึง 1 มิลลิกรัม
2. ตัดลวดยาวประมาณ 10 เซนติเมตรและวัดความยาว ผูกที่ปลายทั้งสองของแท่งอิเล็กโทรดของฝาบอมบ์
3. วางถ้วยเผาไหม้ที่ใส่กรดเบนโซอิกอัดเม็ดบนแท่งอิเล็กโทรดที่ติดอยู่ด้านในของฝาบอมบ์ จัดลวดให้อยู่ที่บริเวณผิวหน้าของกรดเบนโซอิกอัดเม็ด
4. ชั่งน้ำหนักน้ำอุณหภูมิประมาณ 25 องศาเซลเซียส ให้ได้น้ำหนัก 2000 กรัม ให้ละเอียดถึง  $\pm 0.01$  กรัม ใส่ลงในถังบรรจุบอมบ์ (bucket)
5. ประกอบฝาบอมบ์เข้ากับตัวบอมบ์ นำไปอัดก๊าซออกซิเจนให้ได้ความดัน 22 บรรยากาศ นำไปวางในถังบรรจุบอมบ์ และเสียบสายอิเล็กโทรดเข้ากับขั้วทั้งสองของตัวบอมบ์ และปิดฝาเครื่อง
6. เปิดสวิตช์ อ่านค่าอุณหภูมิของน้ำในถังบรรจุบอมบ์ และน้ำที่อยู่ในตัวถังของเครื่อง (jacket) เมื่ออุณหภูมิทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน (ต่างกันไม่เกิน 0.02 องศาเซลเซียส) กดปุ่ม

run และรอจนกระทั่งไฟสัญญาณสีส้มที่ตัวเครื่องสว่างขึ้น อ่านอุณหภูมิของน้ำในถังบรรจุบอมบ์ และน้ำในตัวของเครื่องจนกระทั่งคงที่และเท่ากัน กดปุ่มจุดระเบิด บันทึกค่าอุณหภูมิเริ่มต้น และรอจนกระทั่งอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของถังบรรจุบอมบ์และน้ำในตัวของเครื่องมีค่าคงที่อย่างน้อย 4-5 ค่า บันทึกค่าอุณหภูมิเป็นอุณหภูมิสุดท้าย ปิดเครื่อง

7. เปิดฝาเครื่องและนำตัวบอมบ์ออกจากเครื่อง ปลดยก้าช้อออกจากตัวบอมบ์ช้า ๆ จนกระทั่งหมด

8. ล้างฝาและตัวบอมบ์ และถ้วยเผาไหม้ด้วยสารละลาย methyl orange จนกระทั่งได้สารละลายสีเหลืองจืดๆ ล้าง นำน้ำล้างที่ได้มาไตเตรตกับสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต 0.0709 N สังเกตจุดยุติจากการที่สารละลายเปลี่ยนสีจากสีแดงเป็นสีเหลือง บันทึกปริมาณสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่ใช้ไป

9. วัดความยาวหลอดที่เหลือ บันทึกค่า

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$= \frac{[(H)g + e_1 + e_3]}{t}$$

เมื่อ  $W$  = ค่ามาตรฐานของเครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์  
(แคลอรีต่อองศาเซลเซียส)

$H$  = ค่าความร้อนของการเผาไหม้ของกรดเบนโซอิก (แคลอรีต่อกรัม)

$g$  = น้ำหนักของกรดเบนโซอิก (กรัม)

$e_1$  = การแก้ค่าความร้อนของการเกิดกรดไนตริก (แคลอรี)

(จำนวนมิลลิลิตรของสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต 0.0709 N)

$e_3$  = การแก้ค่าความร้อนหลอด (แคลอรี)

(2.3 x ความยาวของหลอดที่ใช้เป็นเซนติเมตร)

$t$  = อุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นซึ่งได้แก้ค่าจากเทอร์โมมิเตอร์แล้ว

(องศาเซลเซียส)

### การหาค่าความร้อนของถ่านหิน

1. ปูเส้นใยแอสเบสตอส (asbestos) ในถ้วยเผาไหม้ ซึ่งน้ำหนักรวม เติมถ่านหิน ตัวอย่างประมาณ 1 กรัม ใส่ลงในถ้วยเผาไหม้ ซึ่งน้ำหนักโดยละเอียดถึง 1 มิลลิกรัม
2. ทำการทดลองเช่นเดียวกับการหาค่ามาตรฐานของเครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ ตามข้อ 2-9

### การหาปริมาณกำมะถันในถ่านหินด้วยวิธี bomb washing method : ASTM D 3177

1. นำน้ำล้างบอมบ์ที่ได้หลังจากการไตเตรตกับสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตแล้ว มากรอง ขณะร้อนด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 ล้างด้วยน้ำร้อนหลาย ๆ ครั้ง แล้วทำให้เป็นกรดด้วย สารละลายกรดเกลือ (1 : 9) สังเกตจากสีของสารละลายจะกลายเป็นสีแดง
2. ต้มสารละลายให้เดือด และเติมสารละลายแบเรียมคลอไรด์ 10 มิลลิลิตร ขณะเดือด ตั้งทิ้งไว้ค้างคืนหรือน้อย 2 ชั่วโมง
3. กรองตะกอนด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 ล้างตะกอนด้วยน้ำร้อนหลาย ๆ ครั้ง จนแน่ใจว่าหมดคลอไรด์ ซึ่งทดสอบได้ด้วยสารละลาย  $\text{AgNO}_3$
4. นำตะกอนที่กรองได้พร้อมกับกระดาษกรอง ใส่ porcelain crucible ที่ทราบน้ำหนักแล้ว นำเข้าตู้อบที่อุณหภูมิประมาณ 104-110 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 30 นาที จากนั้นนำเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงหรือจนน้ำหนักคงที่ ทิ้งไว้ให้เย็นใน desiccator ซึ่งน้ำหนัก

### สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$Q = \frac{t(W) - e_1 - e_2 - e_3 - e_4}{g}$$

- เมื่อ Q = ค่าความร้อนของถ่านหิน (แคลอรีต่อกรัม)
- t = อุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นซึ่งได้แก่ค่าเนื่องจากเทอร์โมมิเตอร์แล้ว (องศาเซลเซียส)
- W = ค่ามาตรฐานของเครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ (แคลอรีต่อองศาเซลเซียส)

- $e_1$  = การแก้ค่าความร้อนของการเกิดกรดไนตริก (แคลอรี)  
 (จำนวนมิลลิลิตรของสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต 0.0709 N)  
 $e_2$  = การแก้ค่าความร้อนของการเกิดกรดซัลฟูริก (แคลอรี)  
 (13.7 x ร้อยละกำมะถันรวม)  
 $e_3$  = การแก้ค่าความร้อนของลาวด (แคลอรี)  
 (2.3 x ความยาวลาวดที่ใช้ไปเป็นเซนติเมตร)  
 $e_4$  = การแก้ค่าความร้อนของด้าย = 0  
 $g$  = น้ำหนักของถ่านหิน (กรัม)

$$\text{โดยที่ ร้อยละกำมะถันรวม} = \frac{13.738(A - B)}{g}$$

เมื่อ  $A$  = น้ำหนักตะกอนของ  $\text{BaSO}_4$  ในตัวอย่าง (กรัม)  
 $B$  = น้ำหนักตะกอนของ  $\text{BaSO}_4$  ใน blank (กรัม)  
 $g$  = น้ำหนักของถ่านหิน (กรัม)

#### ก. 4 การหารูปแบบของกำมะถันในถ่านหิน (forms of sulfur) : ASTM D 2492

##### 1) การหาปริมาณกำมะถันซัลเฟต (sulfate sulfur)

เครื่องมือ เตาเผา (muffle furnace) porcelain crucible hot plate บีกเกอร์  
 กรวยกรองพร้อมกระดาษกรอง ขวดรูปชมพู่

##### สารเคมี

- น้ำกลั่น
- สารละลายกรดเกลือ (HCl) 2 : 3
- สารละลายกรดเกลือ (ความถ่วงจำเพาะ 1.19) 12 M
- สารละลายเอทิลแอลกอฮอล์ ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ) ร้อยละ 95 โดยปริมาตร
- สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ) เข้มข้น

- สารละลายแบเรียมคลอไรด์ ( $\text{BaCl}_2$ ) 100 กรัมต่อลิตร
- methyl orange indicator

### วิธีการทดลอง

1. ชั่งตัวอย่างถ่านหินประมาณ 2 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมสารละลายกรดเกลือ (2 : 3) 50 มิลลิลิตร ใส่เอทานอล 2 มิลลิลิตร คนให้ทั่วถึงกันแล้วปิดด้วยกระดาษฟิว
2. ต้มบน hot plate ใช้ไฟแรงปานกลาง ให้สารละลายค่อย ๆ เดือด เป็นเวลา 30 นาที
3. กรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 ใส่ลงในเบเกอร์ขนาด 400 มิลลิลิตร ล้างตะกอนด้วยน้ำร้อนหลาย ๆ ครั้ง จนแน่ใจว่าล้างกรดเกลือได้หมด ตะกอนที่ได้จากการกรองเก็บไว้ทำการวิเคราะห์หากจำเป็นไฟไรต์ต่อไป
4. นำสารละลายที่ได้จากการกรองมาต้มให้เดือดเป็นเวลาประมาณ 5 นาที
5. เติมสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นอย่างช้า ๆ จนกระทั่งเป็นด่างเล็กน้อยแล้วเติมให้เกินพออีก 5 มิลลิลิตร พร้อมทั้งคนตลอดเวลา จนได้ตะกอนสีน้ำตาลแดงของ  $\text{Fe}(\text{OH})_3$
6. กรองตะกอนด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 ล้างตะกอนด้วยสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (1 : 10) ที่ร้อน 2-3 ครั้ง ในขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตร
7. นำสารละลายที่ได้จากการกรองมาเติม methyl orange 2-3 หยด ทำให้เป็นกลางด้วยสารละลายกรดเกลือเข้มข้น สังเกตได้จากสีของสารละลายจะเป็นสีชมพู จากนั้นเติมให้เกินพออีก 1 มิลลิลิตร
8. ต้มสารละลายที่ได้บน hot plate ให้เดือด แล้วเติมสารละลายแบเรียมคลอไรด์อย่างช้า ๆ 10 มิลลิลิตรขณะเดือด ต้มสารละลายต่อไปประมาณ 15 นาที ตั้งทิ้งไว้ค้างคืนหรืออย่างน้อย 2 ชั่วโมง
9. กรองตะกอนด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 ล้างตะกอนด้วยน้ำร้อนหลาย ๆ ครั้ง จนแน่ใจว่าหมดคลอไรด์ ซึ่งทดสอบได้โดยสารละลาย  $\text{AgNO}_3$

10. นำตะกอนที่ได้จากการกรองพร้อมกระดาษกรองใส่ porcelain crucible ที่ทราบน้ำหนักแล้ว นำไปเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 104-110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หรือจนน้ำหนักคงที่

11. นำ porcelain crucible ออกจากเตาเผา ทิ้งไว้ให้เย็นใน desiccator ชั่งน้ำหนัก

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$\text{ร้อยละกำมะถันซัลเฟต} = \frac{13.735(A - B)}{g}$$

เมื่อ A = น้ำหนักของตะกอน BaSO<sub>4</sub> ในตัวอย่าง (กรัม)

B = น้ำหนักของตะกอน BaSO<sub>4</sub> ใน blank (กรัม)

g = น้ำหนักของถ่านหิน (กรัม)

2) การหาปริมาณกำมะถันไพไรต์ (pyritic sulfur)

เครื่องมือ ขวดรูปชมพู่ บีกเกอร์ ปิเปต บิวเรต กระดาษกรองเบอร์ 1 hot plate

สารเคมี

- น้ำกลั่น

- สารละลายกรดไนตริก (HNO<sub>3</sub>) 1 : 7

- สารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น (conc. H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)

- สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น (conc. NH<sub>4</sub>OH)

- สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH<sub>4</sub>OH) 1 : 10

- สารละลายกรดเกลือ (HCl) 2 : 3

- สารละลาย SnCl<sub>2</sub>

- สารละลาย HgCl<sub>2</sub>

- สารละลาย H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> : H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> (1 : 1)

- dimethylamine sulfonate indicator

- สารละลายโปแตสเซียมไดโครเมต (K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>)

### วิธีการทดลอง

1. นำตะกอนที่ได้จากการวิเคราะห์หากำมะถันซัลเฟต มาใส่ขวดรูปชมพู่แล้วย่อยด้วยสารละลายกรดไนตริก (1 : 7) 50 มิลลิลิตร ต้มประมาณ 30 นาที ตั้งทิ้งไว้ค้างคืน
2. กรองสารละลายด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 400 มิลลิลิตร ล้างตะกอนด้วยน้ำเย็นครั้งละน้อย ๆ ประมาณ 6-7 ครั้ง
3. ต้มสารละลายที่ได้จากการกรองจนแห้ง เติมสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 10 มิลลิลิตร จนเกิดควันของ  $\text{SO}_3$  (โดยต้องทำในตู้ควัน) จากนั้นทำให้เย็น ละลายตะกอนด้วยสารละลายกรดไนตริก (1 : 7) 50 มิลลิลิตร เติมน้ำจนมีปริมาตรเท่าเดิม
4. นำสารละลายมาตกตะกอน  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  โดยเติมสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นอย่างช้า ๆ จนเป็นด่างเล็กน้อย จากนั้นเติมให้เกินพออีกเล็กน้อย
5. กรองตะกอนด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 ล้างตะกอนด้วยสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (1 : 10) ที่ร้อนหลาย ๆ ครั้ง แล้วล้างด้วยน้ำกลั่น
6. ละลายตะกอนบนกระดาษกรองด้วยสารละลายกรดเกลือ (2+3) ที่ร้อนประมาณ 25 มิลลิลิตร โดยล้างที่ละน้อยจนกระทั่งละลายตะกอนได้หมด ล้างกระดาษกรองด้วยน้ำร้อนหลาย ๆ ครั้ง
7. นำสารละลายที่ได้จากการละลายตะกอนมาต้มให้เดือด เติมสารละลาย  $\text{SnCl}_2$  ที่ละลายจนกระทั่งสีเหลืองของเหล็ก  $\text{Fe}^{3+}$  หายไป เติมให้มากเกินพออีก 1-2 หยด จากนั้นนำไปแช่ในอ่างน้ำเย็นซึ่งมีน้ำแข็งอยู่ด้วย
8. เติมสารละลาย  $\text{HgCl}_2$  10 มิลลิลิตร ลงไปอย่างรวดเร็ว และคนให้ทั่วตลอดเวลา ตั้งทิ้งไว้ 3 นาที
9. เติมสารละลาย  $\text{H}_2\text{SO}_4$  :  $\text{H}_3\text{PO}_4$  (1 : 1) 20 มิลลิลิตร เจือจางด้วยน้ำกลั่นจนมีปริมาตรประมาณ 200 มิลลิลิตร จากนั้นหยด dimethylamine sulfonate indicator ลงไปประมาณ 2-3 หยด
10. นำไปไตเตรตกับสารละลายโปแตสเซียมไดโครเมต ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ) สังเกตจุดยุติจะได้สารละลายสีม่วง บันทึกปริมาณของสารละลายโปแตสเซียมไดโครเมตที่ใช้ไป



สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$\text{ร้อยละกำมะถันไฟไรต์} = .148 \times \frac{5.585(A-B)N}{g}$$

- เมื่อ A = ปริมาณของสารละลายโปแตสเซียมไดโครเมตที่ใช้ในการไตเตรต  
กับสารละลายตัวอย่าง (มิลลิลิตร)
- B = ปริมาณของสารละลายโปแตสเซียมไดโครเมตที่ใช้ในการไตเตรต  
กับ blank (มิลลิลิตร)
- N = ความเข้มข้นเป็น normality ของสารละลายโปแตสเซียม  
ไดโครเมตที่ใช้ในการไตเตรต
- g = น้ำหนักของถ่านหิน (กรัม)

3) การหาปริมาณกำมะถันอินทรีย์ (organic sulfur)

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละกำมะถันอินทรีย์} &= (\text{ร้อยละกำมะถันรวม}) - \\ &(\text{ร้อยละกำมะถันซัลเฟต}) - \\ &(\text{ร้อยละกำมะถันไฟไรต์}) \end{aligned}$$

ก. 5 การหาร้อยละกำมะถันรวมในถ่านหิน : ASTM D 1757

เครื่องมือ เตาเผา (muffle furnace) porcelain crucible ขวดรูปชมพู่ บีกเกอร์

กรวยกรองพร้อมกระดาษกรอง

สารเคมี

- น้ำกลั่น
- สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์-สารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์

( $\text{NH}_4\text{OH}-\text{NH}_4\text{Cl}$ )

- สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ) ที่มีความถ่วงจำเพาะ 0.90

- สารละลายแบเรียมคลอไรด์ ( $\text{BaCl}_2$ )
- น้ำโบรมีนอิ่มตัว ( $\text{Br}_2$  water)
- สารละลายกรดเกลือเข้มข้น (conc.  $\text{HCl}$ )
- สารละลายกรดเกลือ ( $\text{HCl}$ ) 1 : 9
- methyl orange indicator

### วิธีการทดลอง

1. ชั่งตัวอย่างแก้ถ่านหิน 0.5 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมสารละลายกรดเกลือ (1 : 9) 100 มิลลิลิตร และเติมน้ำโบรมีนอิ่มตัวลงไปอีก 5 มิลลิลิตร ต้มด้วยไฟแรงปานกลางจนกระทั่งแก้ถ่านหินสลายตัวหมด
2. เติม methyl orange indicator ลงในสารละลายที่กำลังร้อนประมาณ 2-3 หยด
3. ทำการตกตะกอน  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  ด้วยการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นจนกระทั่งกลายเป็นต่างเล็กน้อย และเติมให้เกินพออีก 5 มิลลิลิตร ให้ความร้อนต่อไป 15 นาที โดยคนให้ทั่วตลอดเวลา
4. กรองสารละลายขณะร้อนด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 ลงในบีกเกอร์ขนาด 400 มิลลิลิตร ล้างตะกอนด้วยสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์-แอมโมเนียมคลอไรด์ และล้างกระดาษกรองด้วยน้ำกลั่นอีกครั้ง
5. เติม methyl orange indicator ลงในสารละลายที่กรองได้ เติมสารละลายกรดเกลือ (1 : 9) จนกระทั่งกลายเป็นกรดเล็กน้อย และเติมให้เกินพออีก 10 มิลลิลิตร ต้มสารละลายให้เดือด และเติมสารละลายแบเรียมคลอไรด์ลงในสารละลายขณะเดือด และต้มต่อไปอีก 15 นาที ตั้งทิ้งไว้ค้างคืนหรืออย่างน้อย 2 ชั่วโมง
6. กรองตะกอนด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 ล้างตะกอนหลาย ๆ ครั้ง จนกระทั่งแน่ใจว่าหมดคลอไรด์ ซึ่งทดสอบได้ด้วยสารละลาย  $\text{AgNO}_3$
7. นำตะกอนพร้อมกระดาษกรองใส่ใน porcelain crucible ที่ทราบน้ำหนักแล้วเข้าตู้อบที่มีอุณหภูมิ 104-110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที และนำไปใส่ในเตาเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หรือจนน้ำหนักคงที่
8. นำ porcelain crucible ออกจากเตาเผา ทิ้งไว้ให้เย็นใน desiccator ชั่งน้ำหนัก

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$\text{ร้อยละของ SO}_3 \text{ ในแก้ว} = \frac{34.3(A-B)}{g}$$

- เมื่อ A = น้ำหนักของตะกอน BaSO<sub>4</sub> ในตัวอย่างแก้วถ่านหิน (กรัม)  
B = น้ำหนักของตะกอน BaSO<sub>4</sub> ใน blank (กรัม)  
g = น้ำหนักของแก้วถ่านหิน (กรัม)



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ข.

### ตัวอย่างข้อมูลดิบ

ข้อมูลดิบที่อยู่ในภาคผนวก ข. นี้ เป็นตัวอย่างของข้อมูลดิบสำหรับการทดสอบการเผาไหม้ของถ่านหินอัดก้อนที่มีปริมาณกำมะถันเท่ากับ 1 และมีอัตราส่วนโดยโมลของ  $\text{CaO/S} = 1$  (ถ่านหินอัดก้อนชุด S11) ซึ่งใช้ข้อมูลสำหรับตัวอย่างการคำนวณในภาคผนวก ค. (ข้อมูลดิบสำหรับการทดสอบการเผาไหม้ของถ่านหินอัดก้อนชุดอื่น ๆ เก็บไว้ที่นายโปรดปราน สิริธีรศาสน์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์)

ตารางที่ ข. 1 การทดสอบการเผาไหม้ของถ่านหินอัดก้อนชุด S11 (ผสมแหล่งบ้านปู 1 และ แหล่งบ้านปู 2 ในอัตราส่วนโดยมวลเท่ากับ 2.6 : 2.4)

ใช้ถ่านหินอัดก้อนน้ำหนัก 751 กรัม (ค่าความร้อนรวมเทียบเท่าถ่านไม้ 400 กรัม)

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\text{SO}_2$ (ppm)	$\text{NO}$ (ppm)	$\%\text{O}_2$	$\%\text{CO}_2$	น้ำหนักของถ่านหินอัดก้อนที่หายไป (กรัม)
0	97	27	27	20.0	0.5	0
2	184	73	45			15
4	343	72	53	18.5	1.5	40
6	277	104	34			55
8	310	150	24	17.5	2.5	80
10	472	168	38			120
12	481	176	48	16.0	4.0	165
14	337	159	35			200
16	323	144	36	16.5	3.0	230
18	309	136	38			260
20	286	120	41	16.5	3.0	285

ตารางที่ ข.(ต่อ) การทดสอบการเผาไหม้ของถ่านหินอัดก้อนชุด S11

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)	SO <sub>2</sub> (ppm)	NO (ppm)	%O <sub>2</sub>	%CO <sub>2</sub>	น้ำหนักของถ่านหิน อัดก้อนที่หายไป (กรัม)
22	279	96	34			310
24	270	90	33	17.5	2.5	335
26	258	89	28			350
28	248	86	22	17.0	2.5	380
30	251	74	20			400
32	261	65	16	17.5	2.5	420
34	244	69	17			440
36	234	54	16	18.0	2.0	450
38	232	47	14			465
40	241	36	10	18.5	2.0	480
42	223	33	15			485
44	207	26	13	18.5	1.5	490
46	197	16	11			500
48	184	17	14	19.0	1.0	510
50	177	16	10			515
52	178	13	10	19.5	0.5	520
54	171	10	9			525
56	168	10	10	20.0	0.5	530
58	135	7	6			530
60	122	5	3	20.0	0.5	530
62	107	5	1			530
64	99	4	1	20.0	0.5	530

ภาคผนวก ค.

ตัวอย่างการคำนวณ

ค. 1 การคำนวณหาปริมาณปูนขาวที่ต้องเติมลงในถ่านหินอัดก้อน

ตัวอย่าง ต้องการคำนวณหาปริมาณของปูนขาวที่ต้องเติมเพื่อทำให้ถ่านหินผสมที่มีปริมาณกำมะถันประมาณร้อยละ 1 มีอัตราส่วนโดยโมลของ CaO/S เท่ากับ 1

จากการวิเคราะห์ร้อยละของ CaO ในปูนขาวที่ใช้ในงานวิจัยพบว่าปริมาณเฉลี่ยของ CaO ร้อยละ 64.71

ปริมาณร้อยละโดยมวลของปูนขาวที่ต้องเติมลงในถ่านหินเพื่อให้ได้อัตราส่วนโดยโมลของ CaO/S ตามที่ต้องการ สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$\frac{(\%S \text{ in coal}) \times (\text{mole ratio of CaO / S}) \times 56}{\left(\frac{\% \text{ of CaO in Lime}}{100}\right) \times 32}$$

แทนค่าต่าง ๆ ลงในสูตร โดยที่

$$\%S \text{ in coal} = 1$$

$$\text{mole ratio of CaO/S} = 1$$

$$\% \text{ of CaO in Lime} = 64.71$$

$$\frac{(1) \times (1) \times 56}{\left(\frac{64.71}{100}\right) \times 32} = 2.70$$

ดังนั้น ปริมาณของปูนขาวที่ต้องเติมลงในถ่านหินที่มีปริมาณกำมะถันร้อยละ 1 เพื่อให้มีอัตราส่วนโดยโมลของ CaO/S เท่ากับ 1 คือ ร้อยละ 2.70 เทียบกับน้ำหนักถ่านหินอัดก้อน

ค. 2 การคำนวณหาปริมาณถ่านหินอัดก้อนที่ต้องใช้เพื่อให้มีค่าความร้อนรวมเทียบเท่าถ่านไม้

ตัวอย่าง ต้องการหาปริมาณถ่านหินอัดก้อน S11 เพื่อให้มีค่าความร้อนรวมเทียบเท่าถ่านไม้ 400 กรัม

จากการวิเคราะห์หาค่าความร้อนพบว่า

ถ่านไม้มีค่าความร้อนแบบรวมความชื้นเท่ากับ	6934	กิโลแคลอรีต่อกรัม
ถ่านหินอัดก้อน S11 มีค่าความร้อนแบบรวมความชื้นเท่ากับ	3503	กิโลแคลอรีต่อกรัม

ดังนั้นจะต้องใช้ถ่านหินอัดก้อน S11 ในปริมาณเท่ากับ

$$\frac{(400) \times (6934)}{(3503)} = 751$$

ต้องใช้ถ่านหินอัดก้อน S11 ในปริมาณ 751 กรัม เพื่อให้มีค่าความร้อนรวมเทียบเท่าถ่านไม้ 400 กรัม

ค. 3 การคำนวณการเผาไหม้

- ข้อสมมติ
1. ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น  $C + O_2 \rightarrow CO_2$
  2. การเผาไหม้ของคาร์บอนเป็นไปในอัตราเดียวกันกับการเผาไหม้ของถ่านหินอัดก้อน
  3. การเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ (complete combustion)
  4. ส่วนที่เป็นเถ้าไม่ถูกเผาไหม้ไป และไม่มีคาร์บอนเหลืออยู่ในเถ้า

### ค.3.1 วิธีการคำนวณร้อยละอากาศเกินพอ

ตัวอย่าง ใช้ข้อมูลจากการทดสอบการเผาไหม้ของถ่านหินอัดก้อน S11 ในนาที่ที่ 12

Basis อากาศเข้า 100 gmol

จากการข้อมูลการเผาไหม้ของถ่านหินอัดก้อน S11 ในนาที่ที่ 12 พบว่า flue gas มีปริมาณร้อยละของ  $\text{CO}_2$  และ  $\text{O}_2$  ดังนี้

$$\% \text{CO}_2 = 4.0$$

$$\% \text{O}_2 = 16.0$$

$$\text{ดังนั้นใน flue gas มี } \% \text{N}_2 \text{ เท่ากับ } 100 - 4.0 - 16.0 = 80.0$$

ในอากาศเข้ามีปริมาณร้อยละของ  $\text{N}_2$  และ  $\text{O}_2$  ดังนี้

$$\% \text{N}_2 = 79$$

$$\% \text{O}_2 = 21$$

อากาศเข้ามีปริมาณเท่ากับ 100 gmol

ดังนั้น ในอากาศเข้าจะมี

$$\text{N}_2 = 79 \text{ gmol}$$

$$\text{O}_2 = 21 \text{ gmol}$$

ดังนั้น flue gas จะมีปริมาณเท่ากับ

$$\frac{(100) \times 80}{79} = 101.3 \text{ gmol}$$

ดังนั้น flue gas จะมีปริมาณของ

$$\text{CO}_2 = \frac{(101.3) \times (4.0)}{100} = 4.05 \text{ gmol}$$

$$\text{O}_2 = \frac{(101.3) \times (16.0)}{100} = 16.21 \text{ gmol}$$



ดังนั้นปริมาณ  $O_2$  ที่ใช้ไป เท่ากับ  $21 - 16.21 = 4.79 \text{ gmol}$   
 และปริมาณ  $O_2$  ที่เหลือ เท่ากับ  $16.21 \text{ gmol}$

คิดเป็นร้อยละอากาศเกินพอได้เท่ากับ

$$\frac{16.21}{4.79} \times 100 = 338\%$$

ปริมาณร้อยละอากาศเกินพอเท่ากับ 338

### ค.3.2 การคำนวณหาปริมาณคาร์บอนในถ่านหินอัดก้อน

ตัวอย่าง ถ่านหินอัดก้อน S11 (ใช้ถ่านหินบ้านปู 1 2.6 กิโลกรัม และถ่านหินบ้านปู 2 2.4 กิโลกรัม)

จากการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis) แบบรวมความชื้น พบว่า

BP1 มีปริมาณคาร์บอนร้อยละ 50.63

BP2 มีปริมาณคาร์บอนร้อยละ 40.98

ดังนั้นถ่านหินผสมระหว่างถ่านหินบ้านปู 1 และถ่านหินบ้านปู 2 จะมีปริมาณคาร์บอนโดยคิดจากสัดส่วนมวล เท่ากับ

$$\frac{(2.6)(50.63) + (2.4)(40.98)}{(2.6 + 2.4)} = 46.00$$

เนื่องจากถ่านหินผสมมีการผสมกับปูนขาวเพื่อให้มีอัตราส่วนโดยโมลของ CaO/S ประมาณ 1 ซึ่งคิดเป็นร้อยละโดยมวลเท่ากับ 2.70 เทียบกับน้ำหนักถ่านหินอัดก้อน

ดังนั้นถ่านหินที่ผสมปูนขาวในอัตราร้อยละโดยมวลเท่ากับ 2.70 แล้ว จะมีร้อยละของคาร์บอนคิดเป็น

$$\frac{(46.00) \times (100)}{(100 + 2.70)} = 44.79$$

ปริมาณของถ่านหินอัดก้อน S11 ที่ใช้เท่ากับ 751 กรัม ดังนั้นคิดเป็นคาร์บอนเท่ากับ

$$751 \times \frac{44.79}{100} = 336.37$$

มีปริมาณของคาร์บอนเท่ากับ 336.37 กรัม

### ค.3.3 การคำนวณร้อยละของกำมะถันที่ปล่อยออกมาระหว่างการเผาไหม้ (%S emission)

Basis ถ่านหินอัดก้อน 751 กรัม

ถ่านหินอัดก้อนมีปริมาณกำมะถันคิดเป็นร้อยละ 26.19 ดังนั้น จะมีปริมาณกำมะถันเท่ากับ

$$751 \times \frac{26.19}{100} = 197$$

ถ่านหินอัดก้อน S11 มีส่วนที่เป็นกำมะถัน 197 กรัม

ดังนั้นคิดเป็นส่วนที่เผาไหม้ได้เท่ากับ  $751 - 197 = 554$  กรัม

ซึ่งส่วนนี้คิดเป็นคาร์บอนเท่ากับ 336.37 กรัม

ระหว่างนาทีที่ 10 และนาทีที่ 14 (รวม 4 นาที) ถ่านหินอัดก้อนถูกเผาไหม้ไปเท่ากับ  $200 - 120 = 80$  กรัม

คิดเป็นส่วนที่เป็นคาร์บอนถูกเผาไหม้ไปเท่ากับ

$$\frac{(80) \times 336.37}{554} = 48.6 \text{ กรัม}$$

คิดเป็นอัตราการเผาไหม้ของคาร์บอนเท่ากับ

$$\frac{48.6}{4} = 12.15 \text{ กรัม/นาที}$$

หรือเท่ากับ  $\frac{12.15}{12} = 1.01 \text{ gmol/min}$

จากปฏิกิริยาการเผาไหม้ของคาร์บอน  $C + O_2 \rightarrow CO_2$

จะได้ว่า ปริมาณของ  $CO_2$  ใน flue gas มีค่าเท่ากับ 1.01 gmol/min

ในหน้าที่ที่ 12 วัดปริมาณ  $CO_2$  ใน flue gas ได้ร้อยละ 4.0 ดังนั้นปริมาณ flue gas มีค่าเท่ากับ

$$1.01 \times \frac{100}{4} = 25.25$$

ปริมาณของ flue gas ในหน้าที่ที่ 12 มีค่าเท่ากับ 25.25 gmol/min

ในหน้าที่ที่ 12 วัดปริมาณ  $SO_2$  ได้เท่ากับ 176 ppm

และวัดอุณหภูมิได้เท่ากับ 481 °C

จากสูตรการแปลงหน่วยจากหน่วย ppm เป็นหน่วย  $\mu g/m^3$

$$\mu g / m^3 = \frac{(ppm) \times P \times M}{8.314(T)}$$

โดยที่ P เป็นความดันในหน่วย Pa

T เป็นอุณหภูมิในหน่วย K

M เป็นมวลโมเลกุล (มวลโมเลกุลของ  $SO_2$  เท่ากับ 64)

แทนค่าต่าง ๆ ลงในสูตร

$$\mu g / m^3 = \frac{(176) \times (1.013 \times 10^5) \times 64}{8.314[(481+273)]} = 181482$$

ดังนั้น มีปริมาณของ  $SO_2$  เท่ากับ 181482  $\mu g/m^3$  ของ flue gas

ปริมาณของ flue gas มีค่าเท่ากับ 22.25 gmol/min คิดเป็น

25.25 gmol	0.0224 m <sup>3</sup>	(481+273) K	101.3 kPa
min	1 gmol	(0+273) K	101.3 kPa

$$= 1.56 \text{ m}^3/\text{min}$$

ดังนั้น flue gas มีปริมาณเท่ากับ 1.56 m<sup>3</sup>/min

ดังนั้น  $\text{SO}_2$  ที่ปล่อยออกมาในนาที่ที่ 12 เท่ากับ

$$(181482 \mu\text{g}/\text{m}^3) \times (1.56 \text{ m}^3/\text{min}) = 283112 \mu\text{g}/\text{min}$$

ปริมาณ  $\text{SO}_2$  ที่ปล่อยออกมาในนาที่ที่ 12 เท่ากับ 0.283 g/min

หรือคิดเป็น  $\frac{0.283}{64} = 0.00442 \text{ gmol}/\text{min}$

ดังนั้น S ที่ถูกปล่อยออกมาในนาที่ที่ 12 มีค่าเท่ากับ  $0.00442 \times 32 = 0.141 \text{ g}/\text{min}$

นำข้อมูลของ S ที่ปล่อยออกมาที่เวลาต่าง ๆ (เช่น ในนาที่ที่ 12 S ถูกปล่อยออกมาเท่ากับ 0.141 g/min มาเขียนกราฟกับเวลา โดยให้

S ที่ปล่อยออกมาที่เวลาต่าง ๆ เป็นแกน Y

และให้เวลาเป็นแกน X

หาพื้นที่ใต้กราฟจากเวลาเริ่มต้น (นาที่ที่ 0) จนถึงเวลาที่ถ่านหินอัดก้อนราไฟ (ซึ่งในชุดนี้คือ นาที่ที่ 64) พื้นที่ใต้กราฟที่ได้จะเป็นปริมาณ S ที่ปล่อยออกมาทั้งหมด ตลอดการเผาไหม้

ในการเผาไหม้ของถ่านหินอัดก้อน S11 พบว่า หาพื้นที่ใต้กราฟได้เท่ากับ 3.04

ดังนั้นแสดงว่าตลอดการเผาไหม้มีปริมาณ S ปล่อยออกมาเท่ากับ 3.04 กรัม

ถ่านหินอัดก้อน S11 มีปริมาณกำมะถันร้อยละ 0.94 ดังนั้นคิดเป็นปริมาณเท่ากับ

$$751 \times \frac{0.94}{100} = 7.06$$

ดังนั้นในถ่านหินอัดก้อน S11 มีปริมาณกำมะถันเท่ากับ 7.06 กรัม

ปริมาณกำมะถันที่ปล่อยออกมาในการเผาไหม้เท่ากับ 3.04 กรัม

ดังนั้นคิดเป็น %S emission เท่ากับ

$$\frac{3.04}{7.06} \times 100 = 43.05$$

ดังนั้นร้อยละของกำมะถันที่ปล่อยออกมาระหว่างการเผาไหม้ (%S emission) ของถ่านหินอัดก้อนชุด S11 เท่ากับ 43.05

#### ค.3.4 การคำนวณหาร้อยละของกำมะถันในถ่านหินอัดก้อน (%S retention)

จากการวิเคราะห์ถ่านหินอัดก้อน S11 พบว่ามีปริมาณของ  $\text{SO}_3$  คิดเป็น ร้อยละ 4.66

ซึ่งคิดเป็น %S ในถ่านหิน เท่ากับ  $4.66 \times \frac{32}{80} = 1.86$

ถ่านหินมีปริมาณเท่ากับ 197 กรัม ดังนั้นปริมาณ %S retention ในถ่านหิน เท่ากับ

$$197 \times \frac{1.86}{100} = 3.66$$

ดังนั้น S retention ในถ่านหิน เท่ากับ 3.66 กรัม

ถ่านหินอัดก้อน S11 มีกำมะถันเท่ากับ 7.06 กรัม

ดังนั้น %S retention ในถ่านหิน เท่ากับ

$$\frac{3.66}{7.06} \times 100 = 51.84$$

ดังนั้นร้อยละของกำมะถันที่อยู่ในถ่านหิน (%S retention) ของถ่านหินอัดก้อนชุด S11 เท่ากับ 51.84

### ค.3.5 การคำนวณหาร้อยละของความผิดพลาด (% error)

$$\% \text{ error} = 100 - (\%S \text{ emission}) - (\%S \text{ retention})$$

แทนค่าต่าง ๆ ลงในสูตรข้างบน จะได้

$$\begin{aligned} \% \text{ error} &= 100 - (43.05) - (51.84) \\ &= 5.11 \end{aligned}$$

ดังนั้นคิดเป็นร้อยละของกำมะถันที่สูญหายไปเท่ากับ 5.11

### ค. 4 การคำนวณหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ A กับร้อยละกำมะถันในถ่านหินอัดก้อน

จากสมการที่ 4.2 ในหัวข้อที่ 4.6.3 พบว่า A ควรมีความสัมพันธ์แบบเส้นตรงกับ ปริมาณกำมะถันในถ่านหินอัดก้อน ดังสมการ

$$A = P + Q[\% S]$$

ซึ่งสามารถหาค่า P และ Q ได้โดยการเขียนกราฟเส้นตรงระหว่างค่า A ซึ่งหมายถึงค่าร้อยละของกำมะถันที่ปล่อยออกมาของถ่านหินอัดก้อนที่มีอัตราส่วนโดยโมลของ CaO/S เท่ากับ 0 และจะได้ว่า

P เป็นระยะตัดแกน Y และ Q เป็นความชันของเส้นตรง

จากกราฟเส้นตรงที่ได้ (รูปที่ 4.13) พบว่า

- ระยะตัดแกน Y มีค่าเท่ากับ 49.5
- ความชันหาได้จาก การหาความชันในช่วงร้อยละกำมะถันเท่ากันเท่ากับ 1-4 ซึ่งความชันของเส้นตรงหาได้จากสมการ

$$\text{ความชัน} = \frac{\text{ผลต่างของระยะบนแกน Y}}{\text{ผลต่างของระยะบนแกน X}}$$

$$= \frac{42.53 - 47.82}{4 - 1}$$

$$= -1.77$$

ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการได้เป็น  $49.5 - 1.77[\% S]$

#### ค. 5 การคำนวณหาค่าคงที่ B จากสมการที่ 4.4

เมื่อพิจารณาจะเห็นว่า สมการที่ 4.4 อยู่ในรูปของเอ็กโปเนนเชียล ดังนั้นเพื่อที่จะหาค่า B ในสมการนี้ จะต้องเขียนสมการในรูปของลอการิทึม ดังนี้

$$\log (\% S \text{ emission}/A) = -(B \log e) [\text{CaO}/S]$$

เพื่อหาค่า B จะต้องเขียนกราฟระหว่าง  $\log (\% S \text{ emission}/A)$  กับค่าของ  $\text{CaO}/S$  ซึ่งจะได้กราฟเส้นตรงตามรูปที่ 4.14 โดยมี  $-(B \log e)$  เป็นความชันของเส้นกราฟ

จากรูปกราฟจากรูปกราฟ สามารถหาความชันได้จาก

$$\text{ความชัน} = \frac{\log 0.73 - \log 0.44}{1 - 3}$$

$$= -0.110$$

จะได้ค่าความชันของเส้นกราฟเท่ากับ -0.110

แต่เนื่องจากค่าความชัน (slope) มีค่าเท่ากับ  $B \log e$  ดังนั้น จึงสามารถหาค่า B ได้ ดังนี้

$$B = -(\text{slope} / \log e)$$

$$= -(-0.110 / \log e)$$

$$= 0.253$$

#### ค. 6 การคำนวณหาค่าประสิทธิภาพการใช้งานของเตาหุงต้ม

ตัวอย่าง ใช้ข้อมูลการหาประสิทธิภาพการใช้งานของเตาหุงต้ม จากการใช้ถ่านหินอัดก้อน S22

ข้อมูล	ปริมาณถ่านหินอัดก้อนที่ใช้	838	กรัม
	ค่าความร้อนของถ่านหินอัดก้อน S22	3309	แคลอรีต่อกรัม
	ปริมาณน้ำตอนเริ่มต้นทำการทดลอง	2500	กรัม
	อุณหภูมิของน้ำตอนเริ่มต้นทำการทดลอง	30	องศาเซลเซียส
	ปริมาณน้ำตอนสุดท้ายหลังทำการทดลอง	982	กรัม

การคำนวณหาประสิทธิภาพการใช้งานของเตาหุงต้ม (ร้อยละ) สามารถคำนวณได้  
จากสูตร

$$\eta = \frac{ms(T_b - T_i) + (m - m_f)\lambda}{wq} \times 100$$

- โดยที่  $\eta$  = ประสิทธิภาพการใช้งาน (ร้อยละ)  
 $m$  = มวลตอนเริ่มต้นของน้ำ (กรัม)  
 $s$  = ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ (แคลอรีต่อกรัม-องศาเซลเซียส)  
 $T_b$  = อุณหภูมิจุดเดือดของน้ำ (องศาเซลเซียส)  
 $T_i$  = อุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำ (องศาเซลเซียส)  
 $m_f$  = มวลตอนสุดท้ายของน้ำ (กรัม)  
 $\lambda$  = ค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอน้ำ (แคลอรีต่อกรัม)  
 $w$  = น้ำหนักของเชื้อเพลิงที่ใช้ (กรัม)  
 $q$  = ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่ใช้ (กรัม)

แทนค่าต่าง ๆ ในสูตรข้างต้น จะได้

$$= \frac{(2500)(1)(100 - 30) + (2500 - 982)(540)}{(838)(3309)} \times 100 = 35.9$$

ดังนั้น ประสิทธิภาพการใช้งานของเตาของถ่านหินอัดก้อน S22 เท่ากับร้อยละ



### ประวัติผู้เขียน

นายโปรดปราน สิริธรรคานันท์ (นามสกุลเดิม ธีระสาสน์) เกิดเมื่อวันที่ 9 ตุลาคม พ.ศ. 2511 ที่จังหวัดชลบุรี สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต (เกียรตินิยมอันดับสอง) สาขาเคมีวิศวกรรม ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2534 และเข้าศึกษาในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2534 ปัจจุบันรับราชการในตำแหน่งอาจารย์ประจำ ที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต จังหวัดปทุมธานี



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย