



### รายการอ้างอิง

- ASTM Standard; D-2013 , "Preparing Coal Sample for Analysis," American Society for Testing and Materials, U.S.A., 1989.
- \_\_\_\_\_. D-3173, "Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke," American Society for Testing and Materials, U.S.A., 1989.
- \_\_\_\_\_. D-3174, "Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from coal," American Society for Testing and Materials, U.S.A., 1989.
- \_\_\_\_\_. D-3175, "Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke," American Society for Testing and Materials, U.S.A., 1989.
- \_\_\_\_\_. D-3286, "Gross Calorific values of Coal and Coke by the isothermal-Jacket Bomb Calorimeter," American Society for Testing and Materials, U.S.A., 1989.
- \_\_\_\_\_. D-3177, "Total Sulfur in the Analysis Sample of Coal and Coke," American Society for Testing and Materials, U.S.A., 1989.
- Calemma, V. and Radovic, L.R., "On the gasification reactivity of Italian Sulcis coal," Fuel 70 (September 1991): 1027-1030.
- Figueiredo, J.L., Orfao, J.J.M. and Ferraz, M.C.A., "Catalytic gasification of chars," Fuel 63 (August 1984): 1059-1060.
- Furimsky, E. and Sears, P., "Iron-catalyzed gasification of char in CO<sub>2</sub>," Journal of Energy & Fuels 2 (1988): 634-639.
- Gorrini, B.C., Radovic, L.R. and Gordon, A.L., "On the potassium-catalysed gasification of a Chilean bituminous coal," Fuel 69 (June 1990): 789-791.
- Huhn, F., Klein, J. and Juntgen, H., "Investigations on the alkali-catalysed steam gasification of coal: kinetics and interactions of alkali catalyst with carbon," Fuel 62 (February 1983): 196-199.
- Kannan, M.P. and Richards, G.N., "Gasification of biomass chars in carbondioxide: dependence of gasification rate on the indigenous metal content," Fuel 69 (June 1990):747-753.
- Kapteijn, F. and Moulijn, J.A., "Kinetics of the potassium carbonate-catalysed CO<sub>2</sub> gasification of activated carbon," Fuel 62 (February 1983) 221-225.

- Kapteijn, F., Abbel, G. and Moulijn, J.A., "CO<sub>2</sub> gasification of carbon catalysed by alkali metals: Reactivity and mechanism," *Fuel* 63 (August 1984) :1036-1042.
- \_\_\_\_\_, Peer, O. and Moulijn, J.A., "Kinetics of the alkali carbonate catalysed gasification of carbon 1. CO<sub>2</sub> gasification," *Fuel* 65 (October 1986): 1371-1376.
- Kopsel, R. and Zabawski, H., "Catalytic effects of ash components in low rank coal gasification 1. Gasification with carbon dioxide," *Fuel* 69 (March 1990): 275-281.
- Matsukata, M., Kikuchi, E. and Morita, Y., "A new classification of alkali and alkaline earth catalysts for gasification of carbon," *Fuel* 71(July 1992): 819-823.
- McKee, D.W., "Gasification of graphite in carbon dioxide and water vapor - the catalytic effects of alkali metal salts, *Carbon* 20 (August 1981): 59-66.
- \_\_\_\_\_, Spiro, C.L., Kosky, P.G. and Lamby, E.J., "Catalysis of coal char gasification by alkali metal salts," *Fuel* 62 (February 1983): 217-220.
- Meijer, R. Muhlen, H.-J., Kapteijn, F. and Moulijn, J.A., "Burn-off behaviour in alkali-catalysed CO<sub>2</sub> gasification of bituminous coal char: A comparison of TGA and fixed bed reactor," *Fuel Processing Technology* 28 (1991): 5-17.
- Oader, S.A. *Coal science and technology 8 : Natural gas substitutes from coal and oil* . The Netherlands: Elsevier, 1985.
- Pande, A.R., "Catalytic gasification of active charcoal by carbon dioxide : influence of type of catalyst and carbon particle size," *Fuel* 71 (November 1992) : 1299-1302.
- Sams, D.A. and Shadman, F., "Catalytic effect of potassium on the rate char-CO<sub>2</sub> gasification," *Fuel* 62 (August 1983):880-882.
- Schumacher, W., Muhlen, H.-J., van Heek, K.H. and Juntgen, "Kinetics of K-catalysed steam and CO<sub>2</sub> gasification in the presence of product gases," *Fuel* 65(October 1986): 1360-1359.
- Sha, X., Chen, Y., Cao, J. Yang, Y. and Ren, D., " Effects of operating pressure on coal gasification," *Fuel* 69 (May 1990): 656-659.
- Spiro, C.L., McKee, D.W., Kosky, P.G. and Lamby, E.J., "Comparison of effects of adding Boudouard catalysts before and after coal charring," *Fuel* 63 (January 1984):133-134.

- \_\_\_\_\_. "Observation of alkali catalyst particles during gasification of carbonaceous materials in CO<sub>2</sub> and steam," Fuel 63 (May 1984):
- \_\_\_\_\_. "Significant parameters in the catalysed CO<sub>2</sub> gasification of coal chars," Fuel 62 (March 1983):323-330.
- \_\_\_\_\_. 'Catalytic CO<sub>2</sub>-gasification of graphite' versus coal char,' Fuel 62 (February 1983): 180-184.
- Tomita, A., Takarada, T. and Tamai, Y., "Gasification of coal impregnated with catalyst during pulverization: effect of catalyst type and reactant gas on the gasification of Shin-Yubari coal, Fuel 62(January 1983): 62-68.
- Toomajian, M.E., Lussier, M.G. and Miller, D.J., "Effect of oxidation and other treatments on hydrogasification rate of coal char," Fuel 71(September 1992):1055-1061.
- Weeda, M. Tromp, P.J.J., Linden, B.V.D. and Moulijn, J.A., " Fuel 69 (July 1990): 846-850.
- Wigmans, T., Haringa, H. and Moulijn, J.A., "Nature, activity and stability of active sites during alkali metal carbonate-catalysed gasification reactions of coal char," Fuel 62 (February 1983): 185-189.

ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก.

## วิธีวิเคราะห์

## ก.1 การวิเคราะห์ถ่านหินแบบประมาณ ตามวิธี ASTM D 3173-3175

ก.1.1 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้นในถ่านหิน (Moisture in the analysis sample of coal and coke, ASTM D-3173)

## เครื่องมือ

1. ตู้อบ (Drying Oven)
2. จานอลูมิเนียมพร้อมฝาปิด (Aluminium Dish)

## วิธีทดลอง

1. อบจานอลูมิเนียมพร้อมฝาในเตาอบที่ 105-110 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นในเดสิเคเตอร์ นำไปชั่ง บันทึกน้ำหนัก
2. ใส่ถ่านหินที่เตรียมไว้ประมาณ 1 กรัม บันทึกน้ำหนัก
3. นำไปอบที่อุณหภูมิ 105-110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
4. นำจานอลูมิเนียมออกจากเตา แล้วปล่อยให้เย็นในเดสิเคเตอร์ นำออกมาชั่ง บันทึกน้ำหนัก

## วิธีคำนวณ

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

$$M = \text{ปริมาณความชื้น, \%}$$

$$W_1 = \text{น้ำหนักจาน + ฝา + ตัวอย่างก่อนอบ, กรัม}$$

$$W_2 = \text{น้ำหนักจาน + ฝา + ตัวอย่างหลังอบ, กรัม}$$

$$W = \text{น้ำหนักตัวอย่าง, กรัม}$$



ก.1.2 การหาปริมาณเถ้าในถ่านหิน ( Ash in the analysis sample of coal and coke, ASTM D-3174)

#### เครื่องมือ

- เตาเผาอุณหภูมิ 30-1200° C
- พอร์ซเลนครุชชีเบล (Porcelain Crucible)

#### วิธีทดลอง

- เผาพอร์ซเลนครุชชีเบลในเตาเผา ที่อุณหภูมิ 700-750 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง ปล่อยให้เย็นลงในเดสิเคเตอร์
- ชั่งน้ำหนักครุชชีเบลพร้อมฝา ใส่ถ่านหินที่เตรียมได้ประมาณ 1 กรัม บันทึกน้ำหนัก
- เผาครุชชีเบลที่บรรจุถ่านหินเพื่อไล่ควัน ด้วยตะเกียงเบนเซน โดยใช้ไฟอ่อน ๆ เปิดฝาได้จนหมดควัน แล้วเผาต่อจนถ่านหินร้อนแดงจึงยกออกแล้วปิดฝา
- นำเข้าเตาเผา โดยเปิดฝาออก เผาที่อุณหภูมิ 700-750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- เมื่อครบ 2 ชั่วโมง นำครุชชีเบลออกมาวางทิ้งไว้บนแผ่นกระเบื้อง จนอุณหภูมิลดลง นำเข้าเดสิเคเตอร์ เมื่ออุณหภูมิเย็นลงจนถึงอุณหภูมิต้องจึงนำครุชชีเบลพร้อมฝาไปชั่งน้ำหนัก บันทึกผล
- นำครุชชีเบลพร้อมฝาเข้าเตาเผาอีกครั้งหนึ่ง เป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง แล้วทำซ้ำในข้อ 5

#### วิธีคำนวณ

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

$$A = \text{ปริมาณเถ้า, \%}$$

$$W_3 = \text{น้ำหนักครุชชีเบล + ฝา + เถ้า, กรัม}$$

$$W_4 = \text{น้ำหนักครุชชีเบล + ฝา, กรัม}$$

$$W = \text{น้ำหนักตัวอย่าง, กรัม}$$

ก.1.3 การหาปริมาณสารระเหยได้ในถ่านหิน (Volatile Matter in the analysis sample of coal and coke, ASTM D-3175) ดัดแปลงสำหรับถ่านหินที่เป็นประกายไฟง่าย (Sparking fuels)

#### เครื่องมือ

- เตาเผา tubular furnace
- นิกเกิ้ล Crucible (Nickel Crucible)

#### วิธีทดลอง

- ชั่ง Crucible พร้อมฝา ใส่ถ่านหินที่เตรียมไว้ประมาณ 1 กรัม บันทึกน้ำหนัก
- วาง Crucible ที่มีฝาปิดสนิทบนที่รองรับ จากนั้นนำไปให้ความร้อนโดยอยู่เหนือปากเตา อุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที
- หย่อน Crucible ลงในเตา บริเวณที่มีอุณหภูมิประมาณ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที
- หย่อน Crucible ลงไปอีกให้อยู่บริเวณกึ่งกลางเตา ที่อุณหภูมิประมาณ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 นาที
- นำออกมาทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง นำเข้าเคลิเคเตอร์ จากนั้นนำไปชั่งแล้ว บันทึกผล

#### วิธีคำนวณ

V	=	$(W_5 - W_6) / W * 100 - M$
V	=	ปริมาณสารระเหย , %
$W_5$	=	น้ำหนัก Crucible + ฝา + ตัวอย่างก่อนเผา , กรัม
$W_6$	=	น้ำหนัก Crucible + ฝา + ตัวอย่างหลังเผา , กรัม
W	=	น้ำหนักตัวอย่าง , กรัม
M	=	ปริมาณความชื้น , %

ก.1.4 การหาปริมาณคาร์บอนคงที่ (Fixed Carbon)

$$\text{ปริมาณคาร์บอนคงที่} = 100 - (\% \text{ความชื้น} + \% \text{ปริมาณเถ้า} + \% \text{ปริมาณสารระเหย})$$

ก.2 การหาค่าความร้อนและปริมาณกำมะถันของถ่านหิน ตามวิธี ASTM D-3286 และ D-3177

### เครื่องมือ

1. อะเดียบาติกบอมบ์แคลอริมิเตอร์
2. เส้นลวด (Fuse Wire)
3. เส้นใยแอสเบสตอส
4. พอร์ซเลนครุชีเบล
5. เต้าเผาอุณหภูมิสูง 30-1200 องศาเซลเซียส
6. กระดาษกรอง เบอร์ 1, 42

### สารเคมี

1. Benzoic acid pellets
2. Methyl Orange
3. 0.0725 N.  $\text{Na}_2\text{CO}_3$
4.  $\text{NH}_4\text{OH}$  Solution
5. Bromine water
6. Hcl Solution 1:9
7.  $\text{AgNO}_3$

ก.2.1 การหาค่ามาตรฐานของเครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์

### วิธีทดลอง

1. ชั่งน้ำหนักกรดเบนโซอิกอัดเม็ด 1 เม็ด ในครุชีเบลที่ทราบน้ำหนักแล้ว
2. วางตัวบอมบ์บนที่ตั้ง ถอดฝาปิดบอมบ์ออกแล้ววางบนขาตั้งฝาบอมบ์ จากนั้นตัดลวดยาวประมาณ 10 ซม. นำมาผูกไว้ระหว่างปลายทั้งสองของแท่งเหล็กที่อยู่ด้านล่างของฝาบอมบ์
3. วางครุชีเบลที่บรรจุเม็ดเบนโซอิกลงบนห่วงที่ปลายแท่งเหล็กด้านล่างฝาบอมบ์ จัดให้ลวดที่ผูกไว้โค้งเป็นรูปตัวยูและอยู่ผิวหน้าของเม็ดกรด
4. เติมน้ำกลั่น 1 มล. ลงในตัวบอมบ์ที่วางอยู่บนที่ตั้ง
5. ประกอบฝาบอมบ์เข้ากับตัวบอมบ์ ชันเกลียวจนแน่น จากนั้นนำไปอัดก๊าซ ออกซิเจนให้ได้ความดันในช่วง 20-22 บรรยากาศ



6. ใส่น้ำกลั่นที่ปรับอุณหภูมิไว้ประมาณ 25 องศาเซลเซียสลงในถังบรรจุบอมบ์ เป็นปริมาณ 1 ลิตร จากนั้นวางบอมบ์ลงในถังบรรจุบอมบ์แล้วจึงเติมน้ำกลั่นที่มีอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสลงไปอีก 1 ลิตร สังเกตดูการรั่วของก๊าซ โดยดูจากฟองอากาศที่อาจจะปุดออกจากฝาบอมบ์
7. เสียบสายการจุดระเบิด 2 เส้นเข้ากับบอมบ์ ปิดฝาเครื่อง
8. เปิดสวิตช์บอมบ์แคลอรีมิเตอร์ มอเตอร์จะเริ่มทำงาน บันทึกอุณหภูมิของน้ำ ทั้งที่ติดกับตัวบอมบ์ และน้ำที่อยู่ในตัวหุ้ม (jacket) ทุก ๆ 30 วินาที จนกระทั่งได้ค่าใกล้เคียงกันจึง เริ่มกดปุ่มจุดระเบิด จากนั้นบันทึกอุณหภูมิทั้งสองค่าที่เพิ่มขึ้นทุก ๆ 30 วินาที และหยุดการ ทดลองเมื่ออุณหภูมิของน้ำที่ติดอยู่กับตัวบอมบ์มีค่าคงที่
9. ปิดสวิตช์ นำตัวบอมบ์ออก ปล่อก๊าซในตัวบอมบ์ออกช้า ๆ เมื่อก๊าซออก หมดแล้วจึงเปิดฝาบอมบ์
10. ล้างฝาและตัวบอมบ์ รวมทั้งครุฑิเบิ้ลที่บรรจุเม็ดกรด ด้วยน้ำกลั่นจนหมด กรด โดยเก็บน้ำที่ล้างไว้ นำมาเติมเมธิลออเรนจ์ แล้วจึงนำไปไตเตรตด้วย 0.0708 N  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  บันทึกปริมาณ  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ที่ใช้ไป
11. ถอดลวดที่เหลืออยู่ออกจากบอมบ์ ทำการวัดและบันทึกความยาว
12. ทำซ้ำตั้งแต่ต้นให้ได้ 10 ครั้ง เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย เป็นค่าคงที่ของเครื่อง

#### บอมบ์แคลอรีมิเตอร์

##### วิธีคำนวณ

หา Energy equivalent (W) ของบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ โดยใช้กรดเบนโซอิก

$$W = ((H)g + e_1 + e_2) / t$$

$$W = \text{calorimeter energy equivalent, cal/}^\circ\text{C}$$

$$H = \text{heat of combustion of benzoic acid}$$

$$= 6318 \text{ cal/g}$$

$$g = \text{น้ำหนักของเบนโซอิกอัดเม็ด, กรัม}$$

$$e_1 = \text{การแก้ค่าความร้อนของการเกิดกรดไนตริก}$$

$$= \text{มิลลิลิตรของ 0.0709 N. Na}_2\text{CO}_3$$

$$e_2 = \text{การแก้ค่าความร้อนของลวด (fuse wire)}$$

$$t = \text{อุณหภูมิสุดท้าย - อุณหภูมิเริ่มต้น (แก้ค่าแล้ว)}$$

### ก.2.2 การหาค่าความร้อนของถ่านหินตัวอย่าง

#### วิธีทดลอง

1. ปูเส้นใยแอสเบสตอส (asbestos fiber) ลงในครุชีเบิ้ล ซึ่งน้ำหนัก จากนั้นใส่ ถ่านหินตัวอย่างลงไปประมาณ 1 กรัม บันทึกน้ำหนัก
2. ทำการทดลองเช่นเดียวกับ ก.2.1 ตั้งแต่ข้อ 2-11 แต่เก็บของเหลวที่ได้จากการ ไตเตรตไว้ใช้ในการหาปริมาณซัลเฟอร์ (ก.2.3)
3. ทำการทดลองซ้ำอีกครั้ง

#### วิธีคำนวณ

$H_g$	=	$(t(W) - e_1 - e_2 - e_3 - e_4) / g$
$H_g$	=	Gross Heat of Combustion, cal/g
t	=	อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น, องศาเซลเซียส
W	=	Energy equivalent of calorimeter, cal/°C
$e_1$	=	การแก้ค่าความร้อนของการเกิด $HNO_3$ = มิลลิลิตรของ 0.0709 N. $Na_2CO_3$
$e_2$	=	การแก้ค่าความร้อนของการเกิด $H_2SO_4$ = 13.7 กรัม (% ซัลเฟอร์), แคลอรี
$e_3$	=	การแก้ค่าความร้อนของ fuse wire = 2.3 x ความยาวลวดที่ใช้, เซนติเมตร
$e_4$	=	การแก้ค่าความร้อนของ cotton thread = 0
g	=	น้ำหนักของตัวอย่าง, กรัม

### ก.2.3 การหาปริมาณซัลเฟอร์ในถ่านหินตัวอย่างตามวิธี ASTM D-3177

#### วิธีทดลอง

1. นำของเหลวที่ได้จากการไตเตรตมาปรับ pH ด้วยสารละลาย  $NH_4OH$  ให้มีค่า pH ในช่วง 5.5-7.0 โดยทดสอบด้วยลิตมัส
2. ต้มของเหลวที่ปรับ pH แล้วจนเดือด กรองขณะร้อนด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 ล้างตะกอนด้วยน้ำร้อนหลาย ๆ ครั้ง เก็บสารที่กรองไว้ได้ (ประมาณ 250 มล.) นำมาเติมน้ำโบรมีน 1 มล. (ทำในตู้ควัน) ทำให้มีสภาพเป็นกรดเจือจางด้วย 1:9 HCl 1 มล.

3. นำของเหลวมาต้มให้เดือดอีกครั้ง เติมสารละลาย  $BaCl_2$  ที่ละลาย โดยขณะหยดต้องคนของเหลวตลอดเวลา จนครบ 10 มล. จากนั้นต้มต่อไปอีก 15 นาที นำออกมาตั้งทิ้งไว้อย่างน้อย 2 ชม. หรือทิ้งไว้ค้างคืน

4. นำของเหลวที่ตั้งทิ้งไว้มาทำให้ร้อน กรองขณะร้อนด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 ล้างตะกอนด้วยน้ำร้อนหลาย ๆ ครั้งจนหมดคลอไรด์ (ทดสอบได้ด้วยซิลเวอร์ไนเตรต  $AgNO_3$ )

5. นำตะกอน  $BaSO_4$  ที่ได้นบนกระดาษกรอง ใส่ในครุชชีเบิ้ลที่ทราบน้ำหนักแล้ว นำมาเผาด้วยตะเกียงเบนเซนจนหมดควัน จากนั้นนำเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิ 925 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชม. จนได้น้ำหนักตะกอนที่คงที่

6. ชั่งน้ำหนักตะกอน บันทึกผล

#### วิธีคำนวณ

กำมะถัน, %	=	$13.738 \times (A - B) / g$
A	=	น้ำหนักตะกอน $BaSO_4$ จากถ่านหินตัวอย่าง, กรัม
B	=	น้ำหนักตะกอน $BaSO_4$ จาก Blank test, กรัม
g	=	น้ำหนักถ่านหินตัวอย่าง, กรัม

#### ก.3 การหาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหลือด้วย Atomic absorption spectrophotometer

(Matsukata, 1992)

- นำตัวอย่างที่เหลือจากการแกสฟาย 31 นาที โดยไม่ต้องออกซิไดส์ด้วยออกซิเจน มา 50 มิลลิกรัม
- รีฟลักซ์ในกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 นอร์มัล 50 มิลลิลิตร นาน 3 ชั่วโมง
- กรอง และล้างตะกอนด้วยน้ำร้อนหลาย ๆ รอบ
- ทำให้สารละลายให้เจือจางด้วยน้ำกลั่นได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ในขวดปริมาตร
- นำไปวัดหาปริมาณของโปตัสเซียม และโซเดียมด้วยเครื่อง atomic absorption spectrophotometer ที่มีความยาวคลื่น 766.5 และ 589.6 นาโนเมตร ตามลำดับ
- การหา standard curve ของโปตัสเซียม เตรียมสารละลายมาตรฐานของโปตัสเซียมที่มีความเข้มข้น 0.00, 0.20, 0.50 และ 0.80 ppm มาวัดค่า absorbance โดยเครื่อง atomic absorption spectrophotometer แล้วสร้าง standard curve ระหว่างค่า absorbance กับความเข้มข้นของโปตัสเซียม

7. การหา standard curve ของโซเดียม เตรียมสารละลายมาตรฐานของโซเดียมที่มีความเข้มข้น 0.00, 0.30, 0.60, 0.80 และ 1.00 ppm มาวัดค่า absorbance โดยเครื่อง atomic absorption spectrophotometer แล้วสร้าง standard curve ระหว่างค่า absorbance กับความเข้มข้นของโซเดียม
8. หาค่า absorbance ของสารละลายที่วิเคราะห์ได้ สามารถหาปริมาณโซเดียมได้
9. จากปริมาณตัวเร่งที่วัดได้หลังการแกสไฟมาเทียบกับตัวเร่งก่อนการแกสไฟ จะหาอัตราการระเหยของตัวเร่งปฏิกิริยาในบรรยากาศของคาร์บอนไดออกไซด์ได้

## ภาคผนวก ข.

ผลการวิเคราะห์ธาตุในถ้ำถ่านหิน ด้วยเทคนิคทาง X-Ray Fluorescence Spectrometry  
โดยศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ตารางที่ ข.1 ผลการวิเคราะห์ธาตุในถ้ำถ่านหินตัวอย่าง ด้วยเทคนิคทาง X-Ray Fluorescence Spectrometry

เปอร์เซ็นต์ธาตุ	BP110	MM	BP163
Na	1.003		
Mg	0.507	2.037	0.325
Al	6.128	2.638	12.411
Si	9.606	8.256	25.473
S	9.887	12.587	1.073
K	2.105	0.593	3.13
Ca	14.368	17.989	3.613
Fe	12.071	9.450	5.943

ตารางที่ ข.2 ผลการวิเคราะห์ธาตุในถ้ำถ่านหินที่ล้างสารอินทรีย์แล้ว ด้วยเทคนิคทาง X-Ray Fluorescence Spectrometry

เปอร์เซ็นต์ธาตุ	DABP110	DAMM	DABP163
Na	2.227		
Mg	0.414	0.125	< 1.0
Al	7.708	6.373	6.168
Si	20.856	29.559	39.852
S	5.542	0.657	0.008
K	6.754	1.649	1.022
Ca	6.827	1.245	0.084
Fe	3.356	13.812	0.771



**ภาคผนวก ค.**  
**ตัวอย่างการคำนวณ**

**ค.1 การวิเคราะห์ถ่านหินแบบประมาณ**

ตัวอย่าง : ถ่านหินแม่เมาะ

**การคำนวณหาปริมาณความชื้น**

น้ำหนักจานอลูมิเนียม + ฝา	=	16.5418	กรัม
น้ำหนักจานอลูมิเนียม + ฝา + ตัวอย่างก่อนอบ	=	17.5424	กรัม
น้ำหนักจานอลูมิเนียม + ฝา + ตัวอย่างหลังอบ	=	17.6099	กรัม
น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ	=	1.0006	กรัม
% ความชื้น	=	$(17.6099 - 17.5424) * 100 / 1.0006$	
	=	6.75	

**การคำนวณหาปริมาณเถ้า**

น้ำหนักครุชชีเบลล์ + ฝา	=	26.5294	กรัม
น้ำหนักครุชชีเบลล์ + ฝา + ตัวอย่างก่อนเผา	=	27.5302	กรัม
น้ำหนักครุชชีเบลล์ + ฝา + ตัวอย่างหลังเผา	=	26.7152	กรัม
น้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา	=	1.0008	กรัม
% เถ้า	=	$(26.7152 - 26.5294) * 100 / 1.0008$	
	=	18.57	

**การคำนวณหาปริมาณสารระเหย**

น้ำหนักครุชชีเบลล์ + ฝา	=	24.1226	กรัม
น้ำหนักครุชชีเบลล์ + ฝา + ตัวอย่างก่อนเผา	=	25.1228	กรัม
น้ำหนักครุชชีเบลล์ + ฝา + ตัวอย่างหลังเผา	=	25.6856	กรัม
น้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา	=	1.0002	กรัม
% ความชื้น	=	6.75	กรัม
% สารระเหยได้	=	$(25.6856 - 25.1228) * 100 / 1.0002 - 6.75$	
	=	49.52	

**การคำนวณหาปริมาณคาร์บอนคงตัว**

% คาร์บอนคงตัว	=	$100 - \% \text{ ความชื้น} - \% \text{ เถ้า} - \% \text{ สารระเหยได้}$	
	=	$100 - 6.75 - 18.57 - 49.52$	
	=	25.16	

ค.2 การคำนวณค่าความร้อนของถ่านหิน : ตัวอย่างถ่านหินแม่เมาะ

การคำนวณค่าพลังงานเทียบเท่า (Energy Equivalent) ของเครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์  
จากการทดลองครั้งที่ 1

น้ำหนักกรดเบนโซอิก	=	1.0016	กรัม
อุณหภูมิเริ่มต้น	=	24.81	องศาเซลเซียส
อุณหภูมิสุดท้าย	=	27.46	องศาเซลเซียส
ปริมาตร $\text{Na}_2\text{CO}_3$	=	1.3	มิลลิลิตร
ความยาวหลอดที่ใช้ไป	=	7.2	เซนติเมตร

$$W = [ H(g) + e_1 + e_2 + e_3 ] / t$$

$$H_g = \text{ความร้อนจากการเผาไหม้ของกรดเบนโซอิก}$$

$$= 6318 \text{ แคลอรีต่อกรัม}$$

$$t = \text{อุณหภูมิสุดท้าย} - \text{อุณหภูมิเริ่มต้น}$$

$$= 2.65 \text{ องศาเซลเซียส}$$

$$g = \text{น้ำหนักกรดเบนโซอิก} = 1.0016 \text{ กรัม}$$

$$e_1 = \text{ปริมาตร } \text{Na}_2\text{CO}_3 = 1.3 \text{ มิลลิลิตร}$$

$$e_2 = 2.3 \times \text{ความยาวหลอดที่ใช้ไป} = 16.56$$

$$\text{ดังนั้น } W = [ 6318 \times 1.0016 + 1.3 + 16.56 ] / 2.65$$

$$= 2395 \text{ แคลอรีต่อองศาเซลเซียส}$$

ทำการทดลอง 10 ครั้ง เพื่อหาค่า W เฉลี่ย

$$\text{ได้ } W \text{ เฉลี่ย} = 2405 \text{ แคลอรีต่อองศาเซลเซียส}$$

การคำนวณค่าความร้อนของถ่านหิน

ข้อมูลจากตัวอย่างถ่านหินแม่เมาะ ทดลองครั้งที่ 1

น้ำหนักถ่านหินเริ่มต้น	=	1.0005	กรัม
อุณหภูมิเริ่มต้น	=	24.72	องศาเซลเซียส
อุณหภูมิสุดท้าย	=	26.08	องศาเซลเซียส
ปริมาตร $\text{Na}_2\text{CO}_3$	=	8.2	มิลลิลิตร
ความยาวหลอดที่ใช้ไป	=	8.8	เซนติเมตร
น้ำหนักตะกอน $\text{BaSO}_4$	=	0.2964	มิลลิกรัม

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

$$t = 1.37 \text{ องศาเซลเซียส}$$

$$\begin{aligned}
 W &= 2405 \\
 e_1 &= \text{ปริมาตร Na}_2\text{CO}_3 = 8.2 \text{ มิลลิลิตร} \\
 e_3 &= 13.7 \times \%S \times g \\
 \%S &= 13.738 \times (A-B) / g \\
 &= 13.738 \times 0.2964 / 1.0005 \\
 &= 4.07 \\
 e_2 &= 2.3 \times \text{ความยาวหลอดที่ใช้ไป} = 20.24 \\
 \text{ดังนั้น } Q(\text{gross}) &= [(1.36)(2405) - 8.2 - (13.7)(4.07)(1.0005) - 20.24] / 1.0005 \\
 &= 3185 \text{ แคลอรีต่อกรัม}
 \end{aligned}$$

### ค.3 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุในถ่านหินและถ่านชาร์

จากผลการวิเคราะห์ธาตุในถ่านหินด้วยเทคนิคทาง X-Ray Fluorescence Spectrometry ที่แสดงในภาคผนวก ข. มีหน่วยเป็นน้ำหนักของธาตุต่อถ่านหิน 100 กรัม ดังนั้นจึงแปลงเป็นน้ำหนักของธาตุต่อถ่านหิน 100 กรัม เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบปริมาณธาตุในถ่านหินและถ่านชาร์แต่ละชนิดได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.6

ตัวอย่าง จากภาคผนวก ข. ถ่านหินแม่เมาะ (MM) มี Mg	=	2.037	%
	=	2.037	กรัมในถ่าน 100 กรัม
MM มีถ่าน	=	19.91	%
ดังนั้น MM 100 กรัม จะมี Mg	=	(2.037)(19.91) / 100	
	=	0.406	กรัม

CMM เป็นตัวอย่างแม่เมาะเช่นเดียวกัน จึงมีองค์ประกอบถ่านเช่นเดียวกับ MM แต่มีปริมาณถ่านไม่เท่ากัน

CMM มีถ่าน	=	58.4	%
ดังนั้น CMM 100 กรัม มี Mg	=	(2.037)(58.4)/100	= 1.190 กรัม

ตัวอย่าง ถ่านหินแม่เมาะที่ล้างสารอนินทรีย์แล้ว (DAMM) มี Mg = 0.125 %

DAMM มีถ่าน	=	5.46	%
ดังนั้น DAMM 100 กรัม มี Mg	=	(0.125)(5.46)/100	
	=	0.007	กรัม

DACMM มีถ่าน	=	15.69	%
ดังนั้น DACMM 100 กรัม มี Mg	=	(0.125)(15.69)/100	= 0.021 กรัม

ค.4 การเตรียมกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 นอร์มัล

น้ำหนักโมเลกุลของไฮโดรคลอริก = 36.46097

1 นอร์มัลหมายถึง ในสารละลาย 1 ลิตร มี HCl 1 กรัมสมมูล

คิดเป็น HCl =  $1 \times 36.46097$

= 36.46097

ในขณะที่กรดไฮโดรคลอริกเริ่มต้นคือ 37.6 % โดยน้ำหนัก และความหนาแน่น 1.19 กิโลกรัมต่อลิตร

สารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1190 กรัม มีไฮโดรคลอริก =  $37.6 \times 1190 / 100$

= 447.4 กรัม

ดังนั้นความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกคือ 447.4 กรัมต่อลิตร ในขณะที่ต้องการใช้คือ 36.46097 กรัมต่อลิตร

$$M_1V_1 = M_2V_2$$

$$(447.4)(V_1) = (36.46097)(1000)$$

$$V_1 = 81.5$$

ปริมาตรที่ใช้คือ กรดไฮโดรคลอริก 37.6 % มา 81.5 มิลลิลิตร มาทำให้เป็น 1 ลิตร

ค.5 การเช็คอัตราเร็วของ mass flow meter

mass flow meter อาศัยหลักการถ่ายเทความร้อน ซึ่งขึ้นอยู่กับความร้อนของก๊าซ จำนวนโมเลกุลที่ผ่าน และความจุความร้อนของก๊าซนั้น

$$\text{corrected flow} = \frac{\text{factor for actual gas}}{\text{factor for calibrated gas}} \times \text{output reading}$$

factor เป็นค่าได้มาจากการทดสอบจากแหล่งผลิตและรับรองมาแล้ว ดังแสดงในตารางที่

ค.5.1

ในการทดลองใช้ mass flow meter ขนาด 300 sccm สำหรับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ใช้ ก๊าซไนโตรเจนเป็นตัวปรับเทียบ ดังนั้นสามารถคำนวณค่าที่ใช้เช็คที่ controller ได้

จากตาราง : factor for actual gas CO<sub>2</sub> = 0.769

factor for calibrated gas = 1.000

อัตราเร็วที่ต้องการ (corrected flow) = 50 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

output reading =  $1.000 \times 50 / 0.769$

= 65.020



## ตารางที่ ค.5.1 Gas conversion data

GAS	Symbol	Cp @ 21°C cal/gr (°C)	Density gr/l @ 21°C	Cp @ 21°C cal/lit. °C	Theor. Factor Cp Air/Cp. gas	GAS	Symbol	Cp @ 21°C cal/gr (°C)	Density gr/l @ 21°C	Cp @ 21°C cal/lit. °C	Theor. Factor Cp Air/Cp. gas
Acetylene	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	0.4022	1.0900	0.4385	0.658	Hydrogen Chloride	HCl	0.1935	1.5210	0.2943	0.98
Air		0.2402	1.2006	0.2883	1.000	Hydrogen Fluoride	HF	0.34	0.83	0.2822	1.02
Allene	C <sub>3</sub> H <sub>4</sub>	0.3600	1.6990	0.6117	0.471	Hydrogen Iodide	HI	0.0570	5.3520	0.3054	0.94
Ammonia	NH <sub>3</sub>	0.5150	0.7160	0.3690	0.782	Hydrogen Selenide	H <sub>2</sub> Se	0.1063	3.3570	0.3568	0.80
Argon	Ar	0.1246	1.6580	0.2066	1.396	Hydrogen Sulfide	H <sub>2</sub> S	0.2469	1.4260	0.3521	0.81
Arsine	AsH <sub>3</sub>	0.1175	3.2320	0.3798	0.759	Isobutane	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.3945	2.4780	0.9778	0.29
Boron Trichloride	BCl <sub>3</sub>	0.1266	4.9460	0.6262	0.460	Isobutylene	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	0.3389	2.3380	0.9093	0.31
Boron Trifluoride	BF <sub>3</sub>	0.1766	2.8570	0.5045	0.571	Krypton	Kr	0.0600	3.4740	0.2084	1.38
1-3 Butadiene	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub>	0.3412	2.322	0.7924	0.384	Methane	CH <sub>4</sub>	0.5325	0.6660	0.3547	0.81
Butane	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.4070	2.5100	1.0216	0.282	Methyl Acetylene	C <sub>3</sub> H <sub>4</sub>	0.354	1.66	0.5876	0.49
1-Butene	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	0.3693	2.3980	0.8856	0.326	Methylamine	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> N	0.3983	1.2970	0.5166	0.55
Carbon Dioxide	CO <sub>2</sub>	0.2042	1.8360	0.3749	0.769	Methyl Bromide	CH <sub>3</sub> Br	0.1127	4.0280	0.4541	0.63
Carbon Monoxide	CO	0.2491	1.1610	0.2892	0.997	Methyl Chloride	CH <sub>3</sub> Cl	0.1995	2.1420	0.4272	0.67
Carbonyl Fluoride	COF <sub>2</sub>	0.1699	2.7540	0.4679	0.616	Methyl Fluoride	CH <sub>3</sub> F	0.2671	1.4350	0.3833	0.75
Carbonyl Sulfide	COS	0.1691	2.5180	0.4258	0.677	Methyl Mercaptan	CH <sub>3</sub> S	0.2506	1.9930	0.4994	0.57
Chlorine	Cl <sub>2</sub>	0.1178	2.9700	0.3499	0.824	Neon	Ne	0.2461	0.8360	0.2058	1.40
Chlorine Trifluoride	ClF <sub>3</sub>	0.1639	3.8500	0.6310	0.457	Nitric Oxide	NO	0.2378	1.2450	0.3008	0.95
Cyanogen	C <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	0.2668	2.1810	0.5819	0.495	Nitrogen	N <sub>2</sub>	0.2485	1.1610	0.2885	1.00
Cyclopropane	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	0.3124	1.7450	0.5451	0.529	Nitrogen Dioxide*	NO <sub>2</sub>	0.1915	3.3940	0.6500	0.44
Deuterium	D <sub>2</sub>	1.7311	0.1671	0.2893	0.997		N <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	0.1995	3.3940	0.6770	0.42
Diborane	B <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.4884	1.1660	0.5695	0.507	Nitrogen Trioxide**	N <sub>2</sub> O <sub>3</sub>				
Dichlorosilane	H <sub>2</sub> SiCl <sub>2</sub>	0.1456	4.2250	0.6152	0.469	Nitrogen Trifluoride	NF <sub>3</sub>	0.1783	2.9500	0.5260	0.54
Dimethylamine	(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> NH	0.3623	1.9030	0.6895	0.418	Nitrous Oxide	N <sub>2</sub> O	0.2087	1.8370	0.3834	0.75
Dimethyl Ether	(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> O	0.3364	1.9450	0.6543	0.441	Oxygen	O <sub>2</sub>	0.2182	1.3270	0.2896	0.99
Ethane	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.4186	1.2589	0.5270	0.547	Pentaborane	B <sub>5</sub> H <sub>9</sub>	0.5648	2.8690	1.6206	0.17
Ethyl Chloride	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> Cl	0.2400	2.9330	0.7039	0.410	n-Pentane	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0.4000	3.2800	1.3120	0.22
Ethylene	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0.3673	1.1710	0.4301	0.670	Phosgene	COCl <sub>2</sub>	0.1396	4.1750	0.5828	0.49
Ethylene Oxide	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O	0.2578	1.7890	0.4613	0.625	Phosphine	PH <sub>3</sub>	0.2603	1.4210	0.3699	0.77
Fluorine	F <sub>2</sub>	0.1978	1.5750	0.3115	0.926	Propane	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0.3948	1.8620	0.7351	0.39
Fluoroform	CHF <sub>3</sub>	0.1734	2.9030	0.5034	0.573	Propylene	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	0.3584	1.7795	0.6378	0.45
Freon 11	CCl <sub>3</sub> F	0.1410	5.9060	0.8328	0.346	Silane	SiH <sub>4</sub>	0.3190	1.3370	0.4266	0.67
Freon 12	CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	0.1464	5.0390	0.7377	0.391	Silicon Tetrafluoride	SiF <sub>4</sub>	0.1681	4.3550	0.7321	0.39
Freon 13	CClF <sub>3</sub>	0.1539	4.3340	0.6670	0.432	Sulfur Dioxide	SO <sub>2</sub>	0.1484	2.7180	0.4035	0.71
Freon 13B1	CBBrF <sub>3</sub>	0.1127	6.3770	0.7184	0.401	Sulfur Hexafluoride	SF <sub>6</sub>	0.1589	6.1410	0.9758	0.29
Freon 14	CF <sub>4</sub>	0.1649	3.6650	0.6044	0.477	Trimethylamine	(CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> N	0.3674	2.5980	0.9544	0.30
Freon 22	CHClF <sub>2</sub>	0.1584	3.7330	0.5913	0.488	Tungsten Hexafluoride	WF <sub>6</sub>	0.0948	12.3470	1.1705	0.24
Freon 114	C <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> F <sub>4</sub>	0.1568	7.1220	1.1167	0.175	Uranium Hexafluoride	UF <sub>6</sub>	0.0790	14.6850	1.1601	0.24
Genetron 21	CHCl <sub>2</sub> F	0.1473	4.2890	0.6317	0.456	Vinyl Bromide	C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Br	0.1236	4.5450	0.5618	0.51
Genetron 115	C <sub>2</sub> ClF <sub>5</sub>	0.1631	6.6580	1.0859	0.265	Vinyl Chloride	C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl	0.2029	2.6560	0.5389	0.53
Germane	GeH <sub>4</sub>	0.1396	3.1770	0.4435	0.650	Vinyl Fluoride	C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> F	0.2408	1.9180	0.4619	0.62
Helium	He	1.2412	0.1658	0.2058	1.401	Water Vapor	H <sub>2</sub> O	0.4453	0.8206	0.3654	0.78
Hydrogen	H <sub>2</sub>	3.4110	0.0835	0.2847	1.013	Xenon	Xe	0.0383	5.4761	0.2097	1.37
Hydrogen Bromide	HBr	0.0879	3.3765	0.2968	0.971						

นั่นคือต้องเซตให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไหลผ่าน mass flow meter ด้วยอัตราเร็ว 65.020 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาทีที่ 25 องศาเซลเซียส และ 760 มิลลิเมตรปรอท โดยอุณหภูมิและความดันห้องไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลง

ใช้ mass flow meter ขนาดเต็มสเกล 300 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที

อัตราเร็วที่ผ่าน mass flow meter 300 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที หน้าปัด controller จะเป็น 100

อัตราเร็ว 66.285 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที หน้าปัด controller เป็น  $100 \times 66.285 / 300 = 22.1$

ดังนั้นการเซตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต้องให้หน้าปัด controller เป็น 22.1



ค.6 การคำนวณหาอัตราเร็วและพลังงานกระตุ้นของการแกสไฟฟาย

การคิด สภาวะในการทดลอง : ตั้ง amplifier 1 มิลลิโวลต์/มิลลิกรัม และ recorder ที่ 5 มิลลิโวลต์ x 10 เต็มสเกล

สัญญาณ Amplifier 1 mV คิดเป็น 1 มิลลิกรัม  
 ดังนั้น สัญญาณ Recorder เต็มสเกล 50 mV คิดเป็น 50 มิลลิกรัม  
 นั่นคือ ทั้งช่วงกระดาษ 250 มิลลิเมตร คิดเป็นน้ำหนัก 50 มิลลิกรัม  
 หรือเท่ากับ  $50/250 = 0.2$  มิลลิกรัมต่อมิลลิเมตร

ในการทดลองจะตั้ง amplifier และ recorder ตามความเหมาะสม ซึ่งสามารถแปลงค่าได้

ดังตาราง ค.6.1

ตารางที่ ค.6.1 ค่าแปลงของสัญญาณจากเครื่อง Thermogravimetric analyzer

recorder	Amplifier(mV)					
	0.2		0.5		1	
	เต็มสเกล	ต่อมิลลิเมตร	เต็มสเกล	ต่อมิลลิเมตร	เต็มสเกล	ต่อมิลลิเมตร
20 V	100000	400	40000	160	20000	80
10 V	50000	200	20000	80	10000	40
5 V	25000	100	10000	40	5000	20
2 V	10000	40	4000	16	2000	8
1 V	5000	20	2000	8	1000	4
200 mV	1000	4	400	1.6	200	0.8
100 mV	500	2	200	0.8	100	0.4
50 mV	250	1	100	0.4	50	0.2
20 mV	100	0.4	40	0.16	20	0.08
10 mV	50	0.2	20	0.08	10	0.04

จากตัวอย่าง CBP110+Na 10.1742% แกสไฟที่ 800 องศาเซลเซียส ได้เทอร์โมแกรมดังรูปที่ ค.6.1

น้ำหนักตัวอย่าง	=	40.50	มิลลิกรัม
ซึ่งจะมีปริมาณ CBP110 อยู่	=	(100-10.1742)(40.50)/100	
	=	36.38	มิลลิกรัม
และมี Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	=	40.50-36.38	= 4.12 มิลลิกรัม
จากการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ CBP110 มีคาร์บอน	=	70.54	%
นั่นคือ ตัวอย่างที่วิเคราะห์มีคาร์บอน	=	(0.7054)(36.38)	
	=	25.66	มิลลิกรัม
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> มีน้ำหนักโมเลกุล	=	105.9893	
Na มีน้ำหนักโมเลกุล	=	22.9898	
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 4.12 มิลลิกรัม มี Na	=	(2x22.9898)(4.12) / 105.9893	
	=	1.7873	มิลลิกรัม
atomic Na/C ratio	=	$\frac{1.7873}{(22.9898)(2)}$	
	=	25.66 / 12.001	
	=	0.01820	

ตั้งภาวะที่ Amplifier 1 mV/mg x Recorder 50 mV นั่นคือ 0.2 มิลลิกรัมต่อมิลลิเมตร ความเร็วกระดาษ 120 มิลลิเมตรต่อนาที

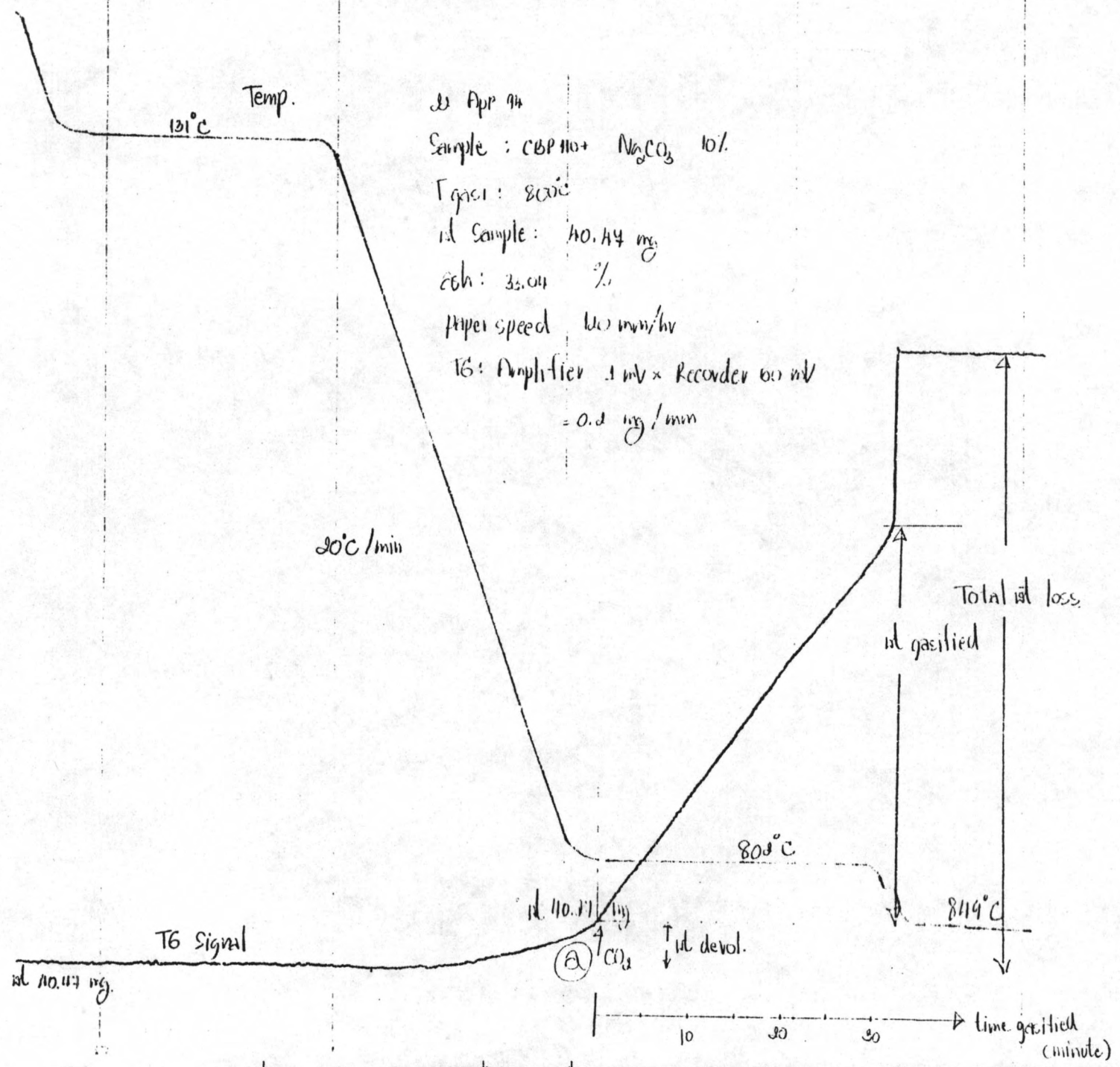
ในการทดลอง จะมีช่วงที่ให้ความร้อนซึ่งจะมีการระเหยของสารระเหยและตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดการสูญเสียน้ำหนัก ดังนั้นน้ำหนักเริ่มต้นของการแกสไฟคือจุดที่เริ่มผ่านก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (จุด a ในรูปที่ ค.6.1) พร้อมทั้งเริ่มคือน้ำหนักสูญเสียจากการแกสไฟที่จุดนี้เช่นเดียวกัน

จากการสูญเสียในช่วงให้ความร้อน	=	1	มิลลิเมตร
	=	0.2	มิลลิกรัม
ดังนั้น น้ำหนักเริ่มต้นในการแกสไฟ	=	40.27	มิลลิกรัม

ปริมาณคาร์บอนยังคงเดิมแม้มีการสูญเสียสารระเหย

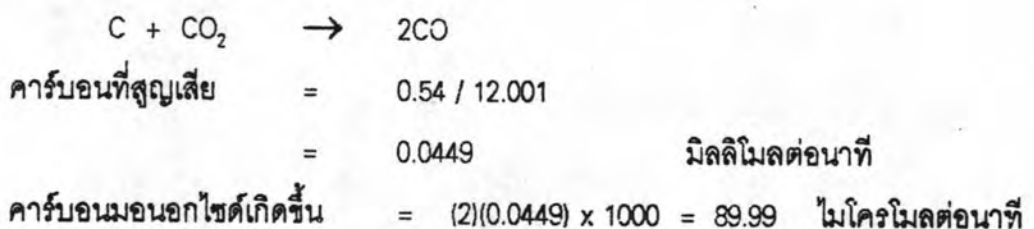
ดังนั้นมีคาร์บอน	=	25.66	มิลลิกรัม
------------------	---	-------	-----------

และที่จุดนี้คิดเป็นเวลา 0 นาที น้ำหนักสูญเสียจากการแกสไฟเท่ากับ 0 มิลลิกรัม			
ที่ 5 นาที วัดได้ 13.5 มิลลิเมตร หรือน้ำหนักสูญเสีย	=	13.5 x 0.2	
	=	2.7	มิลลิกรัม



$$\begin{aligned}
 \text{อัตราการสูญเสียน้ำหนักต่อเวลา} &= 2.7 / 5 \\
 &= 0.54 \text{ มิลลิกรัมต่อนาที} \\
 \text{อัตราเร็ว (rate)} &= \text{น้ำหนักสูญเสียต่อเวลา} / \text{น้ำหนักคาร์บอนเริ่มต้น} \\
 &= 0.54 / 25.66 \\
 &= 2.10 \times 10^{-2} \text{ mg.mg C}_1^{-1} \cdot \text{min}^{-1} \\
 \% \text{ conversion} &= \text{น้ำหนักที่สูญเสียไป} \times 100 / \text{น้ำหนักเริ่มต้นแกสไฟ} \\
 &= 2.4 / 40.27 \\
 &= 6.70 \% \\
 \% \text{ Ash} &= (\text{น้ำหนักเริ่มต้น} - \text{น้ำหนักสูญเสียทั้งหมด}) \times 100 / \text{น้ำหนักเริ่มต้น} \\
 &\text{น้ำหนักสูญเสียทั้งหมดหลังจากออกซิไดส์ด้วยออกซิเจนวัดได้ 135.6 มม.} \\
 \text{น้ำหนักสูญเสีย} &= (135.6)(0.2) \\
 &= 27.12 \text{ มิลลิกรัม} \\
 \text{เถ้า} &= (40.50 - 27.12) * 100 / 40.50 \\
 &= 33.04 \%
 \end{aligned}$$

คิดปริมาณ CO ที่ควรจะเกิดตามปฏิกิริยา



#### ค.7 การคำนวณโมล CO จากการวัดด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี

ในการคำนวณหาความเข้มข้นของก๊าซที่แท้จริงนั้น จำเป็นจะต้องเทียบพื้นที่ของกราฟกับกราฟที่ได้จากการฉีดก๊าซมาตรฐานซึ่งรู้องค์ประกอบที่แน่นอน บันทึกอุณหภูมิและความดันห้องที่ฉีดก๊าซมาตรฐานเป็น 28 องศาเซลเซียส และ 753 มิลลิเมตรปรอท

จากการฉีดก๊าซมาตรฐาน 2 ครั้งได้โครมาโตแกรมดังแสดงในรูปที่ ค.7.1 ซึ่งมี retention time และ พื้นที่เฉลี่ย ดังตารางที่ ค.7.1

$$\begin{aligned}
 \text{จากปริมาตรก๊าซมาตรฐานที่ฉีด 250 ไมโครลิตร} &= \frac{(250 \text{ ไมโครลิตร})(753 \text{ มิลลิเมตรปรอท})(273 \text{ เคลวิน})}{(22.4 \times 10^6 \text{ ไมโครลิตร})(760 \text{ มิลลิเมตรปรอท})(273+28 \text{ เคลวิน})} \\
 &= 1.0029 \times 10^{-5} \text{ โมล} \\
 &= 10.029 \text{ ไมโครโมล}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ใน } 10.029 \text{ ไมโครโมล มีคาร์บอนมอนอกไซด์} &= 10.029 \times 0.00996 \\ &= 0.0963 \text{ ไมโครโมล} \end{aligned}$$

จากการจัดสารมาตรฐาน 2 ครั้ง เกิดพื้นที่ของคาร์บอนมอนอกไซด์เป็น 140257 และ 140314 หรือคิดเฉลี่ยเป็น 140286

$$\begin{aligned} CF &= 0.0963/140286 \\ &= 6.8632 \times 10^{-7} \text{ ไมโครโมลต่อหน่วยพื้นที่} \end{aligned}$$

ตารางที่ ค.7.1 เวลา retention และพื้นที่ขององค์ประกอบจากการจัดก๊าซมาตรฐาน

retention time	component	% mole	area	umole/area
1.965	H <sub>2</sub>	0.996	94262	1.07×10 <sup>-6</sup>
5.127	O <sub>2</sub>	1.01	194074	5.219×10 <sup>-7</sup>
5.842	N <sub>2</sub>	based	8258044	1.153×10 <sup>-6</sup>
7.543	CO	1.01	140286	6.8632×10 <sup>-7</sup>
11.934	CH <sub>4</sub>	1.01	127990	7.91×10 <sup>-7</sup>
15.964	CO <sub>2</sub>	1.01	1121202	9.03×10 <sup>-8</sup>

#### ตัวอย่างการคำนวณความเข้มข้นของก๊าซจากการแก๊สฟลาย

ในการทดลองจากการแก๊สฟลายที่ 800 องศาเซลเซียส ของ CBP110+Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 10% ในการเก็บก๊าซที่เวลา 5 นาที ใช้ระบบอกเก็บก๊าซขนาด 141.5 มิลลิลิตร เวลาเก็บก๊าซ 1 นาที

ปริมาณที่จัด 500 ไมโครลิตร ได้โครมาโตแกรมดังรูป ค.7.2 ซึ่งมีเวลาออกและพื้นที่ได้กราฟดังแสดงในตารางที่ ค.7.2

ตารางที่ ค.7.2 เวลา retention และพื้นที่ขององค์ประกอบจากการจัดก๊าซจากการแก๊สฟลาย CBP110+Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 10% ที่ 800 องศาเซลเซียส ที่เวลาเก็บก๊าซ 5 นาที

retention time	component	area	umole
5.218	O <sub>2</sub>	208728	30
5.732	N <sub>2</sub>	2595722	846
7.539	CO	395757	76
15.166	CO <sub>2</sub>	10265941	excess



$$\begin{aligned} \text{mole CO ใน 500 ไมโครลิตร} &= (6.8632 \times 10^{-7})(395757) \\ &= 0.2716 \quad \text{ไมโครโมล} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 141.5 \times 10^3 \text{ ไมโครลิตร มี CO} &= (0.2716)(141.5 \times 10^3)/500 \\ &= 76.86 \quad \text{ไมโครโมล} \end{aligned}$$

เนื่องจากแต่ละกระบอกเก็บในช่วงเวลา 1 นาที ดังนั้นปริมาณ CO จึงเป็น 76.86 ไมโครโมลต่อนาที สำหรับก๊าซชนิดอื่น คิดในลักษณะเดียวกัน จะได้ค่า CF ของ O<sub>2</sub> และ N<sub>2</sub> เป็น 5.219x10<sup>-7</sup> และ 1.153x10<sup>-6</sup> ไมโครโมลต่อหน่วยพื้นที่ ซึ่งสามารถคำนวณออกมาเป็น 30.83 และ 847 ไมโครโมลต่อนาทีตามลำดับ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้เฉพาะปริมาณ CO จากการวิเคราะห์มาใช้คำนวณเท่านั้น

จากปริมาณ CO ในก๊าซตัวอย่างจากกระบอกเก็บก๊าซนำมาคำนวณเป็นปริมาณ CO ทั้งหมดที่เกิดขึ้นในเวลาต่อนาที ได้ดังแสดงในตารางที่ ค.7.3 และเปรียบเทียบกับการคำนวณปริมาณ CO จากการสูญเสียน้ำหนักในเครื่อง TG ตามสมการ



ซึ่งจะได้ CO จากการคำนวณเท่ากับ 80 ไมโครโมลต่อนาที

ตารางที่ ค.7.3 ตัวอย่างผลการทดลองแก๊สฟาย CBP110+Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 10% ที่ 800 องศาเซลเซียส

Sample: CBP110 + Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 10 %

Bang-Poo-Dam 110 char at 900 C 1 hr

wt of sample, w1 : 40.50 mg      wt initial at gasified point, w<sub>3</sub> : 40.27 mg

wt of carbon, w2: 25.66 mg

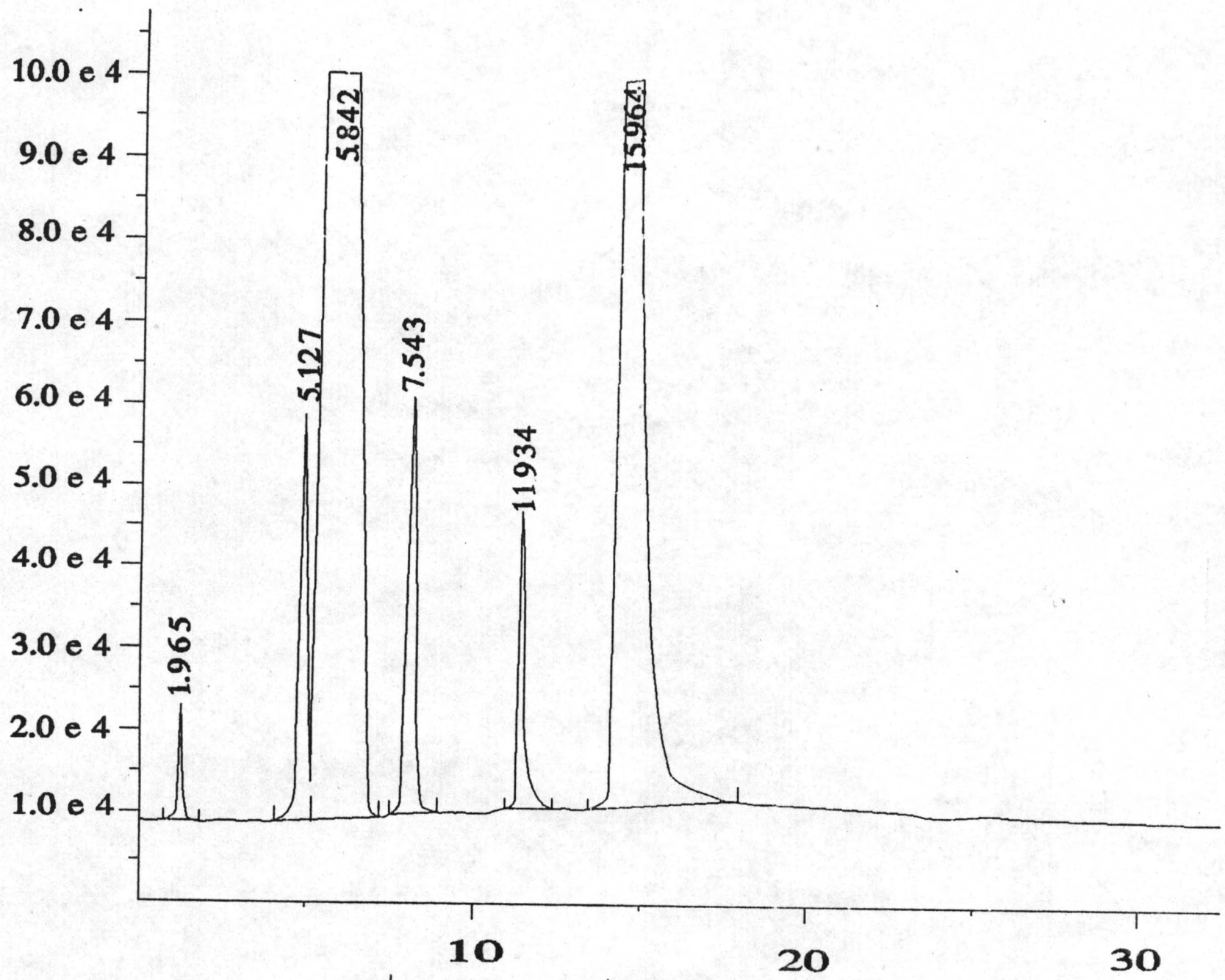
% Ash, y : 33.04

gasification at : 800 C

T room 28 C P room 753 mmHg

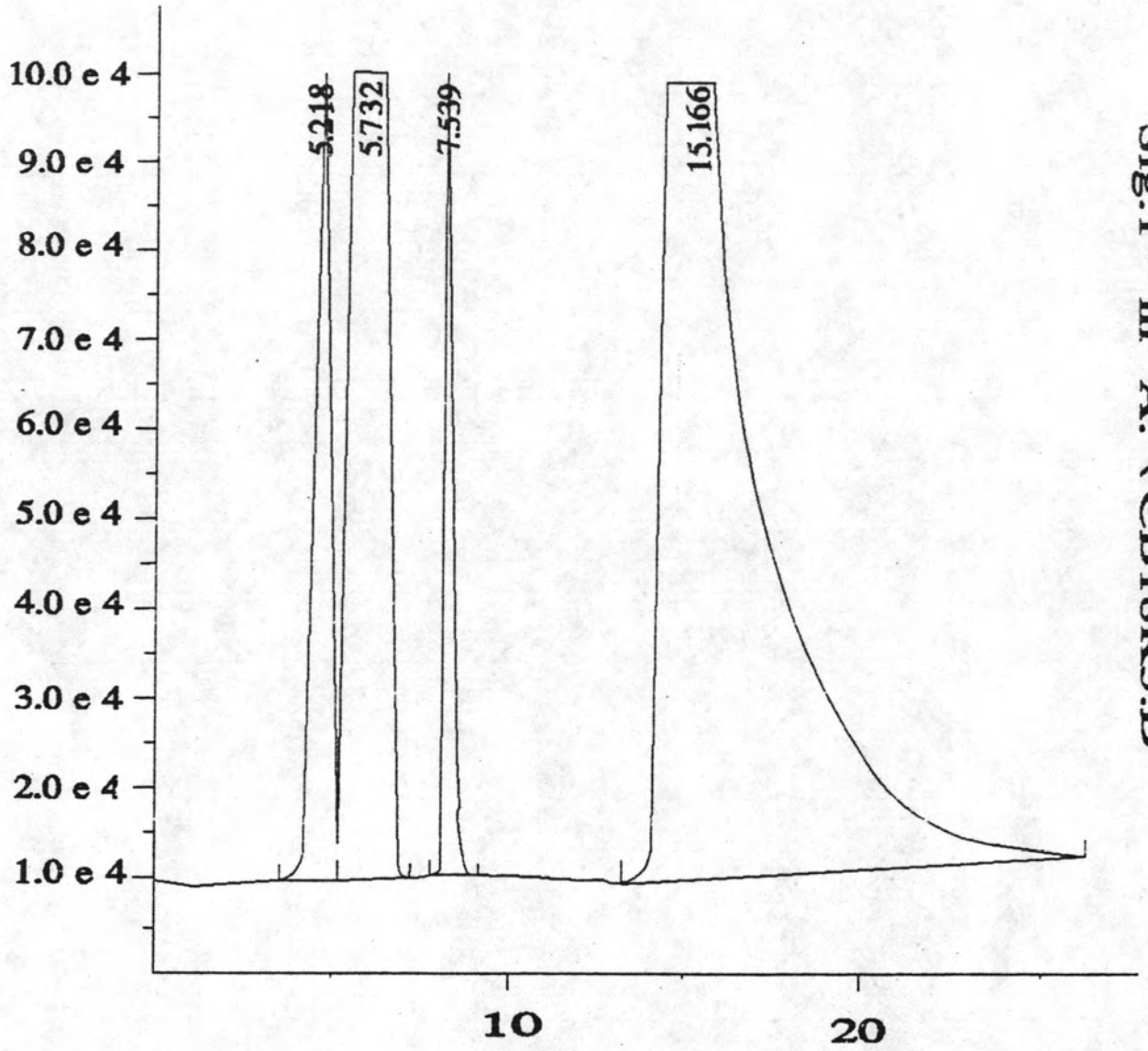
Amplifier 1 mV x Recorder 50 mV = 0.2 mg/mm.

a	b	c	d=d(c)/d(a)	e=d/w2	h=c/w <sub>2</sub> *100	mole CO	injection	volume of	area	mole CO	mole CO
time	wt loss	w: loss	dw/dt	rate	%conversion	calculate	volume	collector		injected	from G.C.
(min)	(mm)	(mg)	(mg/min)	(mg/mg C.min)		(umole/min)	(microlitre)	(ml)		(umole)	(umole/min)
0	0	0.0	0	0.00E+00	0.00	0.00	-	-	-	0.0000	0.00
5	13.5	2.7	0.54	2.10E-02	6.70	89.99	500	141.5	395757	0.2716	76.87
10	27.5	5.5	0.56	2.18E-02	13.66	93.33	500	142	466887	0.3204	91.00
15	41	8.2	0.54	2.10E-02	20.36	89.99	500	141	467827	0.3211	90.54
20	54	10.8	0.52	2.03E-02	26.82	86.66	500	145	428150	0.2938	85.22
25	67	13.4	0.52	2.03E-02	33.28	86.66	500	144	416438	0.2858	82.31
30	80	16.0	0.52	2.03E-02	39.73	86.66	500	141.5	426799	0.2929	82.90



**Sig.1 in A: \ Standard**

รูปที่ ค.7.1 โครมาโตแกรมที่ได้จากการฉีดก๊าซมาตรฐาน 250 ไมโครลิตร



Sig.1 in A:\CB18K5.D

รูปที่ ค.7.2 โครมาโตแกรมที่ได้จากการฉีดก๊าซจากการแกสไฟล่าย 500 ไมโครลิตร

## ค.8 การหาค่าคงที่ปฏิกิริยา

## ปฏิกิริยาอันดับศูนย์

$$-r = k$$

ดังนั้นค่าคงที่ปฏิกิริยาหาได้จากอัตราเร็วเฉลี่ย

## ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

$$-r = kC_0$$

$$dC_0 = -k dt$$

$$-\ln(1-x_0) = kt$$

สามารถหาค่าคงที่ปฏิกิริยาได้จากความชันของกราฟระหว่าง  $-\ln(1-x_0)$  กับ  $t$

## ตัวอย่าง

ถ่านชาร์บงปุดา 163 ที่ไม่ล้างสารอนินทรีย์ + 20%  $K_2CO_3$  แกลสิฟายที่ 800 องศาเซลเซียส

น้ำหนักตัวอย่าง : 40.14 มิลลิกรัม

น้ำหนักของคาร์บอน,  $w_1$ : 11.20 มิลลิกรัม

time (min)	wt loss(mg), $w_2$	$x_0 = w_2/w_1$	$-\ln(1-x_0)$
0	0	0	0
5	0.48	0.034	0.0345
10	0.66	0.059	0.0607
15	0.9	0.080	0.0837
20	1.12	0.100	0.1053
25	1.34	0.120	0.1274
30	1.56	0.139	0.1500

วาดกราฟระหว่างเวลา กับ  $-\ln(1-x_0)$  ได้ความชันเท่ากับ 0.004858

ดังนั้น ค่าคงที่ปฏิกิริยา =  $4.85 \times 10^{-2} \text{ mg} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$



ค.9 การคำนวณพลังงานกระตุ้นของการเกิดพิษ

คำนวณจาก

$$k(T) = f_0 \exp(-E/RT)$$

หรือ  $\log k = \log f_0 - E/2.303RT$

โดย  $k =$  ค่าคงที่ปฏิกิริยา

$E =$  ค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยา, จูลต่อโมล

$f_0 =$  ค่าคงที่ (pre-exponential factor)

$R =$  ค่าคงที่ก๊าซ

$T =$  อุณหภูมิสัมบูรณ์, เคลวิน

นั่นคือ สามารถหาค่าพลังงานกระตุ้นได้จากความชันเมื่อพล็อตกราฟระหว่าง  $\log k$  กับ

$1/T$

ตัวอย่าง CBP110+10% Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>

มีอัตราเร็วเฉลี่ยที่อุณหภูมิต่าง ๆ ตามตาราง ดังนี้

อุณหภูมิ (°C)	$1/T_{abs}$	อัตราเร็วเฉลี่ย (mg.mg c <sub>1</sub> <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup> )	$\log k$
600	1.15 E-03	1.60 E-03	-2.80
700	1.03 E-03	7.05 E-03	-2.15
800	9.32 E-04	2.09 E-02	-1.70
850	8.90 E-04	3.32 E-02	-1.48

นำค่า  $\log k$  กับ  $1/T_{abs}$  ไปสร้างกราฟอาร์เรเนียส ดังแสดงในรูปที่ 4.48 ทำการวิเคราะห์การถดถอยอย่างง่าย (Simple regression) ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Microsoft Excel แล้วนำมาคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้น จากตัวอย่าง CBP110+Na 10% ได้ความชัน = -5367.15

ได้ว่า  $-5367.38 = -E / 2.303R$

$$E = (5367.38)(2.303)(8.314)$$

$$= 1.0277 \times 10^5 \quad \text{จูล/โมล}$$

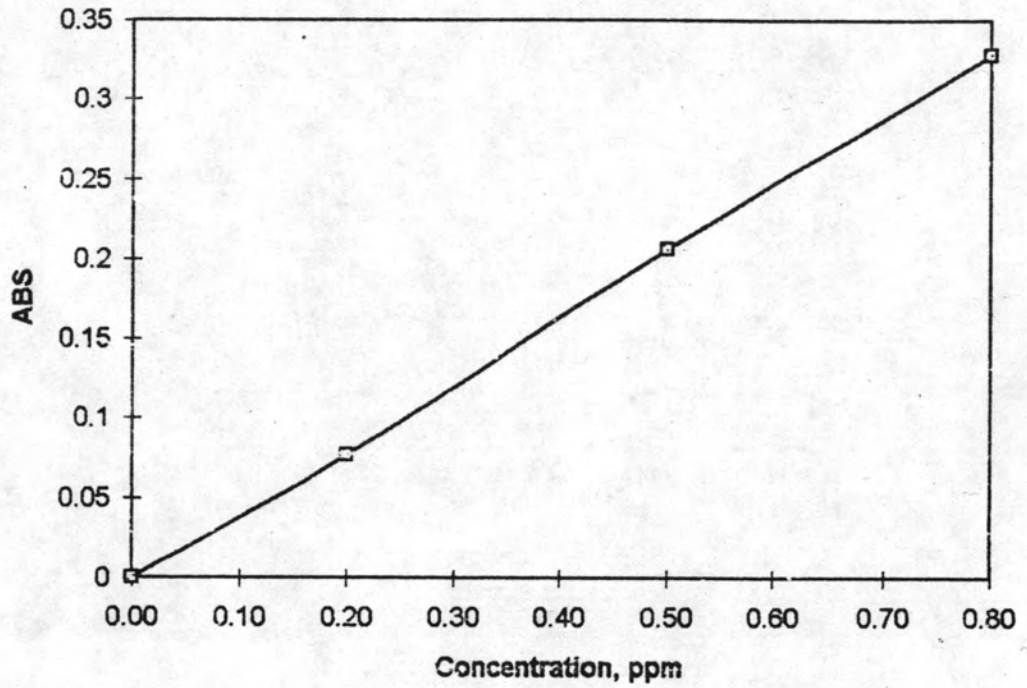
$$= 102.77 \quad \text{กิโลจูล/โมล}$$



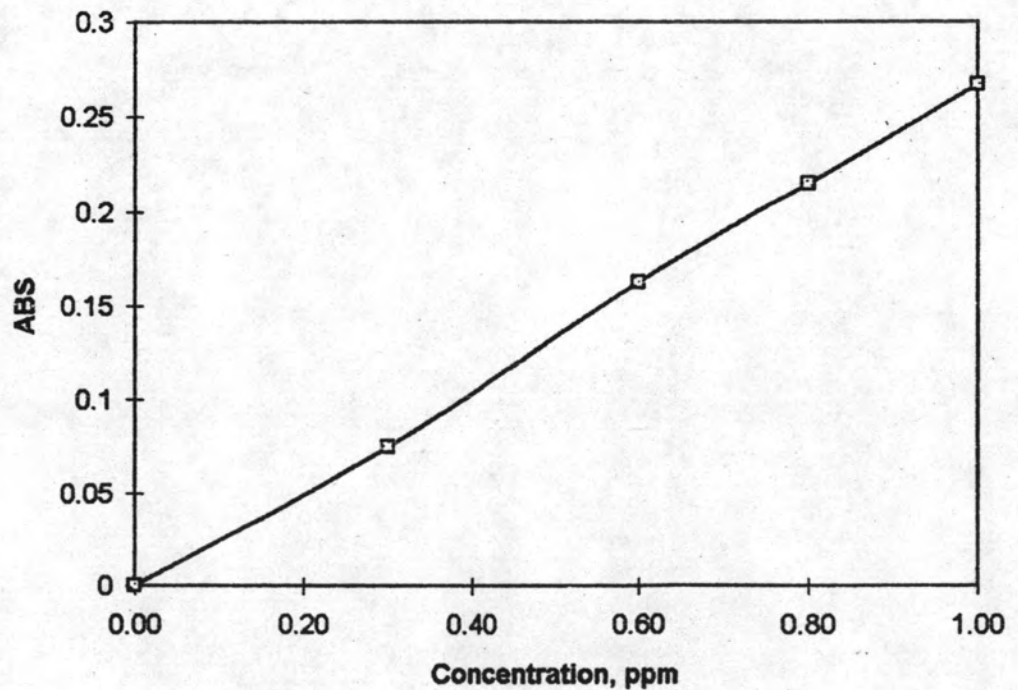
ค.10 คำนวณการกระเหยของตัวเร่งปฏิกิริยา

จากการวัดค่า absorbance ของโปตัสเซียมและโซเดียมจากการวิเคราะห์ Atomic absorption spectrophotometer เพื่อทำ Standard curve ได้ผลดังรูป

Standard curve of K



Standard curve of Na



ตัวอย่าง CBP110-Na 10% แกลสิฟายที่ 800 องศาเซลเซียส

### ก่อนการแกลสิฟาย

สารละลาย 100 มล. ถูกเจือจางอีกครั้งโดยเอามา 1 มล. แล้วทำให้ได้สารละลาย 100 มล.

( dilution factor = 100 )

อ่านค่า absorbance ได้ 0.325 คิดเป็นความเข้มข้น 0.22 ไมโครกรัม / มิลลิลิตร (ppm)

dilution factor 100 ดังนั้น ความเข้มข้นจริง  $0.22 \times 100$

= 22  $\mu\text{g} / \text{ml}$  ในสารละลายตัวอย่าง 100 มล.

น้ำหนักถ่านก่อนถูกแกลสิฟาย 50 มิลลิกรัม มี Na 2200 ไมโครกรัม

น้ำหนักถ่านก่อนถูกแกลสิฟาย 40 มิลลิกรัม มี Na (40) (2200) / 50

= 1760 ไมโครกรัม

### หลังการแกลสิฟาย

สารละลาย 100 มล. ถูกเจือจางอีกครั้งโดยเอามา 1 มล. แล้วทำให้ได้สารละลาย 100 มล.

( dilution factor = 100 )

อ่านค่า absorbance ได้ 0.355 คิดเป็นความเข้มข้น 0.24 ไมโครกรัม / มิลลิลิตร (ppm)

dilution factor 100 ดังนั้น ความเข้มข้นจริง  $0.24 \times 100 = 24$  ไมโครกรัม / มิลลิลิตร

ในสารละลายตัวอย่าง 100 มล. จะมี Na = 2400 ไมโครกรัม

น้ำหนักถ่านที่ถูกแกลสิฟายแล้ว 50 มิลลิกรัม มี Na 2400 ไมโครกรัม

จากตารางที่ ค.8.1 น้ำหนักถ่านที่เหลือจากการถูกแกลสิฟาย = (40-16)

= 24 มิลลิกรัม

จะมี Na (2400) (24) / 50 ไมโครกรัม = 1152 ไมโครกรัม

ดังนั้น เกิดการสูญเสีย Na = 1760-1152

= 608 ไมโครกรัม

เนื่องจากในตัวอย่างนี้มี Na = 1.7873 มิลลิกรัม

คิดเป็นอัตราการระเหย = น้ำหนักที่ระเหย / น้ำหนัก Na เริ่มต้น

= 0.608 / 1.7873

หรือ = 0.3401 mg/mg Na<sub>i</sub>

ภาคผนวก ง.

ค่าคงที่ปฏิกิริยา

ตารางที่ ง.1 ค่าคงที่อัตราเร็วของ DACBP110 ( $\text{mg} \cdot \text{mg} \text{ C}_1^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ )

Temperature ( C )	$\text{K}_2\text{CO}_3$				$\text{Na}_2\text{CO}_3$			
	0%	5%	10%	20%	0%	5%	10%	20%
600	0.062E-03	0.60E-03	1.84E-03	2.59E-03	0.062E-03	0.45E-03	1.09E-03	1.86E-03
700	0.24E-03	2.15E-03	5.22E-03	13.00E-03	0.24E-03	2.49E-03	4.05E-03	11.14E-03
800	0.84E-03	10.60E-03	22.96E-03	29.04E-03	0.84E-03	8.69E-03	15.81E-03	31.36E-03
850	1.51E-03	12.56E-03	25.56E-03	61.18E-03	1.51E-03	9.52E-03	22.97E-03	77.28E-03

ตารางที่ ง.2 ค่าคงที่อัตราเร็วของ CBP110 ( $\text{mg} \cdot \text{mg} \text{ C}_1^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ )

Temperature ( C )	$\text{K}_2\text{CO}_3$				$\text{Na}_2\text{CO}_3$			
	0%	5%	10%	20%	0%	5%	10%	20%
600	0.11E-03	0.86E-03	1.90E-03	2.98E-03	0.11E-03	0.62E-03	1.06E-03	3.23E-03
700	0.31E-03	4.42E-03	6.77E-03	10.14E-03	0.31E-03	1.97E-03	7.05E-03	11.04E-03
800	1.11E-03	10.10E-03	31.40E-03	55.42E-03	1.11E-03	6.54E-03	20.86E-03	34.74E-03
850	2.57E-03	23.17E-03	38.43E-03	88.05E-03	2.57E-03	15.84E-03	33.17E-03	63.34E-03

ตารางที่ ง.3 ค่าคงที่อัตราเร็วของ DACMM ( $\text{mg.mg C}_1^{-1}.\text{min}^{-1}$ )

Temperature ( C )	$\text{K}_2\text{CO}_3$				$\text{Na}_2\text{CO}_3$			
	0%	5%	10%	20%	0%	5%	10%	20%
600	0.46E-03	1.51E-03	4.09E-03	6.58E-03	0.46E-03	1.51E-03	2.63E-03	2.04E-03
700	1.40E-03	10.48E-03	21.81E-03	16.20E-03	1.40E-03	4.75E-03	6.19E-03	10.13E-03
800	5.47E-03	30.64E-03	45.98E-03	63.58E-03	5.47E-03	19.37E-03	22.15E-03	23.71E-03
850	6.98E-03	51.12E-03	77.19E-03	10.80E-03	6.98E-03	25.34E-03	36.23E-03	31.15E-03

ตารางที่ ง.4 ค่าคงที่อัตราเร็วของ CMM ( $\text{mg.mg C}_1^{-1}.\text{min}^{-1}$ )

Temperature ( C )	$\text{K}_2\text{CO}_3$				$\text{Na}_2\text{CO}_3$			
	0%	5%	10%	20%	0%	5%	10%	20%
600	0.62E-03	2.89E-03	3.93E-03	5.86E-03	0.62E-03	1.79E-03	1.77E-03	2.36E-03
700	3.50E-03	9.78E-03	12.36E-03	22.04E-03	3.50E-03	10.81E-03	12.67E-03	52.93E-03
800	8.84E-03	41.95E-03	48.28E-03	41.19E-03	8.84E-03	22.57E-03	21.42E-03	30.06E-03
850	10.27E-03	55.87E-03	82.01E-03	97.96E-03	10.27E-03	44.94E-03	54.44E-03	36.12E-03



ตารางที่ ง.5 ค่าคงที่อัตราเร็วของ DACBP163 ( $\text{mg} \cdot \text{mg} \text{ C}_i^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ )

Temperature ( C )	$\text{K}_2\text{CO}_3$				$\text{Na}_2\text{CO}_3$			
	0%	5%	10%	20%	0%	5%	10%	20%
600	0.43E-03	0.44E-03	1.12E-03	0.49E-03	0.43E-03	0.49E-03	0.96E-03	1.44E-03
700	1.51E-03	2.29E-03	10.85E-03	1.66E-03	1.51E-03	1.80E-03	4.11E-03	7.11E-03
800	4.67E-03	8.34E-03	27.03E-03	21.26E-03	4.67E-03	5.82E-03	13.47E-03	21.26E-03
850	11.79E-03	9.99E-03	29.96E-03	13.96E-03	11.79E-03	8.57E-03	29.38E-03	49.68E-03

ตารางที่ ง.6 ค่าคงที่อัตราเร็วของ CBP163 ( $\text{mg} \cdot \text{mg} \text{ C}_i^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ )

Temperature ( C )	$\text{K}_2\text{CO}_3$				$\text{Na}_2\text{CO}_3$			
	0%	5%	10%	20%	0%	5%	10%	20%
600	0.14E-03	0.38E-03	0.48E-03	0.12E-03	0.14E-03	0.23E-03	0.41E-03	0.38E-03
700	1.19E-03	1.73E-03	3.94E-03	0.33E-03	1.19E-03	1.10E-03	1.70E-03	1.42E-03
800	3.82E-03	4.16E-03	7.51E-03	1.51E-03	3.82E-03	4.95E-03	7.23E-03	4.86E-03
850	4.51E-03	6.82E-03	14.52E-03	1.71E-03	4.51E-03	8.01E-03	11.04E-03	10.49E-03





### ประวัติผู้เขียน

นางสาว สมพร บรรลือศรีเรือง เกิดเมื่อวันที่ 20 มกราคม พ.ศ. 2514 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์ สาขาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2534 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2535