

รายการอ้างอิง

- กัญจนนา บุญยเกียรติ. การคำนวณขั้นต้นในวิชาวิศวกรรมเคมี. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2531.
- จิระศักดิ์ แสงพุ่ม. การผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากถ่านไม้ในฟลูอิดไดซ์เบด. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2530
- ชัยรัตน์ อรรถนุชทรศร และชูศักดิ์ วิทยาขจรศาสตร์. การผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากถ่านหินในฟลูอิดไดซ์เบดแบบ 2 คอลัมน์. โครงการวิจัยปริญญาตรี ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538
- นาวิน หมื่นเข็ม และมะลิ หุ่นสม. การผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากถ่านหินในฟลูอิดไดซ์เบดแบบ 2 คอลัมน์. โครงการวิจัยปริญญาตรี ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย, 2540.
- บัณฑิต บัดทวีคงคา. กระบวนการก๊าซซิไฟถ่านหินลิกไนต์ในเตาปฏิกรณ์เคมีแบบฟลูอิดไดซ์ วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2529
- พรทิพย์ แก้ววราภรณ์ชัย. แบบจำลองของการก๊าซซิไฟเคชันจากถ่านไม้ในฟลูอิดไดซ์เบด. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย, 2534
- พล สาเกตทอง, เลอสรวง เมฆสุด และวรเดช เพรศพรายวงศ์. รายงานการวิจัยเรื่องระบบการใช้ ถ่านลิกไนต์โดยการเผาไหม้ในเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด. กรุงเทพมหานคร : ฝ่ายวิชาการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2530
- วิวัฒน์ ตันพะพานิชกุล. อุปกรณ์การผลิตในอุตสาหกรรมเคมี. กรุงเทพมหานคร: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย - ญี่ปุ่น), 2536
- วรเดช เพรศพรายวงศ์. การเผาถ่านลิกไนต์ในฟลูอิดไดซ์เบด. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2528
- สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ. ฟลูอิดไดซ์ชัน. กรุงเทพมหานคร: คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย, 2528
- อรรถพล ณรงค์ฤทธิ์ชัย. การผลิตเชื้อเพลิงจากถ่านหินเวียงแหงในฟลูอิดไดซ์เบดแบบต่อเนื่อง. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542

- Agarwal, J.C., Divis Jr, W.L. and King, D.T. Fluidized – bed coal dryer. Chem. Eng. Progr. 58(1962) : 85.
- Baron R.B., Porter, J.H. and Hammare. Jr, O.H. Chemical Equilibrium in Carbon Hydrogen-Oxygen Systems. MIT.Press, 1976.
- C.Y. Wen & E.Stanley Lee. Coal Combustion and Technology. Addison – Publishing Canada, 1979
- Diazo Junii and Octave Levenspiel. Gross Behavior of Fluidized Bed. Fluidization Engineering. New York.: Wiley, 1969.
- Ergun, S. Fluid flow through randomly randomly packed columns and fluidized bed. Chem. Eng. Pogr. 49 (1952) : 89
- G.V.Reklaitis & Daniel R.Schneider. Introduction to material and energy balances. John Wiley&Sons, 1983.
- Haslam, R.T., Hitchcock, F.L.dan Rudow, E.W. The water-Gas Reactions. Ind. Eng Chem. 15(1923): 115-121
- May. W.G., Mueller, R.H. and Sweetser S.B. Hydrocarbon synthesis with 2 stage coke gasification. Ind. Eng. Chem. 42 (1950) : 1289-1296
- Merrick,. D. Coal Combustion and Conversion Technology. London : MacMillan Publishers,1984
- Nicolas P.Chopey. Handbook of Chemical Engineering Calculations. 2nd edition , Singapore , McGraw – Hill, Inc.1994
- Richardson, D.r. How to design fluid-flow distributor. Chem. Eng. 68 (1961) : 83.
- Stull, D.R. and Prophet, H.Eds. JANAF Thermochemical Table. 2nd ed. Washington C.C.:Government Printiog Office, 1971
- Von Fredersdorff, C.G. and Martin, A Elliott in Coal Gasification, Chemistry of coal Utilization. New York : John Wiley and Sons Inc, 1963.
- Wen, C.Y. and Yu, Y.H. NH₃ absorbtion in beds of saddles. AIChE.J.12(1947) : 537.
- Yosry A.Attia, Processing and Utilization of High Sulfur Coals, Elsevier Science Publishers B.V.,1985.

ภาคผนวก ก.

วิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติถ่านหินแบบประมาณ

ตามวิธีมาตรฐาน ASTM ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดได้ในตาราง ก.1

ตาราง ก.1 รายการทดลองและมาตรฐานในการวิเคราะห์คุณสมบัติถ่านหิน

รายการทดลอง	มาตรฐานวิธีวิเคราะห์
การเตรียมตัวอย่างถ่านหินสำหรับการวิเคราะห์	ASTM D. 2031
การวิเคราะห์แบบประมาณ	ASTM D. 3172
ปริมาณความชื้น	ASTM D. 3173
ปริมาณเถ้า	ASTM D. 3174
ปริมาณสารระเหย	ASTM D. 3175

สุ่มตัวอย่างถ่านหินมาบางส่วน แล้วนำมาบดให้ได้ขนาด 0.25 mm. แล้วอบไล่ความชื้น เพื่อทำ Elemental Analysis

1. การทำการวิเคราะห์แบบประมาณ

ถ่านหินที่จะนำมาวิเคราะห์ต้องทำการบดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 0.25 mm

1.1. การวิเคราะห์ปริมาณความชื้นในตัวอย่างถ่านหิน (Standard test method for moisture in the analysis sample of coal and coke) : ASTM D. 3173

หลักการ: เพื่อหาความชื้นโดยการนำตัวอย่างถ่านหินขนาด 0.25 mm. มาให้ความร้อนคงที่ในตู้อบ (Dry Oven) ที่อุณหภูมิประมาณ 105 – 110 °C เป็นเวลาประมาณ 1 hr หรือจนกระทั่งน้ำหนักถ่านหินคงที่ เพื่อให้ไอน้ำระเหยออกไปจากถ่านหิน จากนั้นก็คำนวณหาความชื้นจากน้ำหนักถ่านหินที่หายไป

เครื่องมือ: ตู้อบ (Dry Oven) , ภาดอะลูมิเนียม (Aluminium Disc) พร้อมฝา, และเดสิเคเตอ์ (Desicator)

วิธีการทดลอง

- 1.อบภาดอะลูมิเนียมพร้อมฝาในตู้อบ ที่อุณหภูมิ 100 °C ประมาณ 30 min จากนั้นปล่อยให้เย็นในเดสิเคเตอ์ ประมาณ 30 min ชั่งน้ำหนักและบันทึกผล
- 2.ชั่งตัวอย่างถ่านหินประมาณ 1 g รีบปิดฝาแล้วนำ แล้วนำไปชั่งบันทึกผลน้ำหนัก
- 3.นำไปเข้าตู้อบ อบที่อุณหภูมิ 105 -100 °C เป็นเวลาประมาณ 1 hr หรือจนกระทั่งน้ำหนักของถ่านหินคงที่
- 4.นำภาดอะลูมิเนียมออกจากตู้อบ ปล่อยให้เย็นในเดสิเคเตอ์ ประมาณ 30 min ชั่งน้ำหนักภาดอะลูมิเนียมพร้อมฝาที่มีตัวอย่างถ่านหินอยู่ใน บันทึกผล
- 5.คำนวณร้อยละปริมาณความชื้นโดยใช้สมการ

$$M = \frac{100 \times (w_1 - w_2)}{w}$$

เมื่อ M = ร้อยละความชื้น
 w_1 = น้ำหนักของภาดอะลูมิเนียมพร้อมฝารวมกับน้ำหนักตัวอย่างถ่านหิน (g)
 w_2 = น้ำหนักของภาดอะลูมิเนียมพร้อมฝารวมกับน้ำหนักตัวอย่างถ่านหินที่อบแล้ว (g)
 w = น้ำหนักของถ่านหินตัวอย่าง (g)

1.2. การวิเคราะห์ปริมาณเถ้าในตัวอย่างถ่านหิน (Standard test method for ash in the analysis sample of coal and coke) : ASTM D. 3174

หลักการ: นำตัวอย่างถ่านหินมาให้ความร้อนในเตาเผา (Muffle Furnace) ที่อุณหภูมิประมาณ 750 °C เป็นเวลาประมาณ 1 hr หรือจนกระทั่งน้ำหนักถ่านหินคงที่ จากนั้นคำนวณหาร้อยละปริมาณเถ้าจากน้ำหนักที่เหลืออยู่ภายหลังจากการให้ความร้อน

เครื่องมือ: เตาเผา (Muffle Furnace) ครูซิเบิล (Crucible) แบบ Porcelain พร้อมฝา และ เดสิเคเตอร์ (Desiccator)

วิธีการทดลอง

1. เตาครูซิเบิลเปล่าพร้อมฝาในเตาเผาที่อุณหภูมิประมาณ 750 °C เป็นเวลาประมาณ 1 hr
2. เอาครูซิเบิลพร้อมฝาออกจากเตาเผา ทำให้เย็นในเดสิเคเตอร์ ซึ่งน้ำหนักครูซิเบิลพร้อมฝาบ้นที่กผล
3. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างถ่านหินประมาณ 1 g ใส่ในครูซิเบิลปิดฝารวดเร็ว จากนั้นนำไปชั่งอย่างละเอียดอีกครั้ง
4. นำไปเผาบนตะเกียงเบนเซน จนควันระเหยหมด เพื่อไล่กัมมะถัน
5. ใส่ครูซิเบิลพร้อมฝาในเตาเผา ที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลาประมาณ 1 hr แล้วค่อยปรับอุณหภูมิไปที่ 750 °C เป็นเวลาประมาณ 2 hr หรือจนกระทั่งน้ำหนักของถ่านหินคงที่
6. นำครูซิเบิลออกจากเตาทำให้เย็นในเดสิเคเตอร์ ซึ่งน้ำหนักครูซิเบิลพร้อมฝาบ้นที่กผล
7. คำนวณหาร้อยละของเถ้าโดยใช้สมการ

$$A = \frac{100x(w_3 - w_4)}{w}$$

เมื่อ A = ร้อยละที่ไถ่

w_3 = น้ำหนักของครุชชีเบลพร้อมฝาพร้อมกับน้ำหนักตัวอย่างถ่านหิน (g)

w_4 = น้ำหนักของครุชชีเบลพร้อมฝาพร้อมกับน้ำหนักตัวอย่างถ่านหินที่เผาแล้ว (g)

w = น้ำหนักของถ่านหินตัวอย่าง (g)

1.3. การวิเคราะห์หาปริมาณสารระเหยในตัวอย่างถ่านหิน (Standard test method for volatile matter in the analysis sample of coal and coke) : ASTM D.3175

หลักการ : นำตัวอย่างถ่านหินมาให้ความร้อนในเตาเผาแบบท่อ ที่อุณหภูมิประมาณ 950 °C หรือจนกระทั่งน้ำหนักถ่านหินคงที่ ปริมาณสารระเหยของถ่านหินตัวอย่างหาได้จาก การคำนวณน้ำหนักตัวอย่างถ่านหินที่หายไป

เครื่องมือ : เตาเผา (Tubular furnace) , Nickle Crucible พร้อมฝา และเดสิเคเตอร์ (Desicator)

วิธีการทดลอง

- 1.เผา Nickle Crucible พร้อมฝา ในเตาเผาที่อุณหภูมิประมาณ 950 °C ประมาณ 30 min
- 2.นำ Nickle Crucible ออกจากเตาเผาปล่อยให้เย็นในเดสิเคเตอร์จนถึงอุณหภูมิห้อง ชั่งน้ำหนัก Nickle Crucible พร้อมฝา บันทึกผล
- 3.ใส่ตัวอย่างถ่านหินประมาณ 1 g ใน Nickle Crucible ปิดฝาแล้วชั่งน้ำหนักโดยละเอียด
- 4.นำ Nickle Crucible พร้อมตัวอย่างถ่านหินไปให้ความร้อนโดยอยู่เหนือปากเตา ที่อุณหภูมิประมาณ 500 °C เป็นเวลา 3 min
- 5.หย่อน Nickle Crucible ให้อยู่บริเวณปากเตา ที่อุณหภูมิประมาณ 600 °C เป็นเวลา 3 min

6. หย่อน Nickle Crucible ให้อยู่บริเวณกึ่งกลางเตาเผา ที่อุณหภูมิประมาณ 950 °C เป็นเวลา 6 min
7. นำ Nickle Crucible ออกจากเตาเผาปล่อยให้เย็นในเดสิเคเตอร์ ซึ่งน้ำหนักของ Nickle Crucible พร้อมฝาและตัวอย่างถ่านหินที่เหลือและทำการบันทึกผล
8. คำนวณร้อยละสารระเหยได้โดยใช้สมการ

$$V = \left[\frac{100x(w_5 - w_6)}{w} \right] - M$$

- เมื่อ V = ร้อยละของสารระเหย
 M = ร้อยละของความชื้น
 w_5 = น้ำหนักของ Nickle Crucible พร้อมฝารวมกับน้ำหนักตัวอย่างถ่านหิน (g)
 w_6 = น้ำหนักของ Nickle Crucible พร้อมฝารวมกับน้ำหนักตัวอย่างถ่านหิน หลังจากการเผา (g)
 w = น้ำหนักของน้ำหนักตัวอย่างถ่านหิน (g)

1.4 การวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอนคงตัว(Fixed Carbon)ในตัวอย่างถ่านหิน คำนวณหาได้โดยใช้สมการ

ร้อยละของคาร์บอนคงตัว(Fixed carbon) = 100 - ร้อยละของความชื้น - ร้อยละของเถ้า - ร้อยละของสารระเหย

2.การวิเคราะห์หาปริมาณซัลเฟอร์ในตัวอย่างถ่านหิน (Standard test method for total sulphur in the analysis sample of coal and coke) : ASTM D.3177

หลักการ เผาตัวอย่างถ่านหินที่ผสมกับ Eschka mixture กำมะถันที่ประกอบอยู่ในถ่านหินจะละลายในรูปแบบของซัลเฟตไอออน ดังนั้นสามารถหาปริมาณกำมะถันในตัวอย่างถ่านหินได้ในรูปแบบเบเรียมซัลเฟต ($BaSO_4$)

เครื่องมือ เตาเผา (muffle Furnace) , porcelain crucible

สารเคมี

- Eschka mixture ประกอบด้วย แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) กับโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ในอัตราส่วน 2:1 โดยน้ำหนัก
- สารละลายเบเรียมคลอไรด์ 100 g/l ละลายเบเรียมคลอไรด์ ($BaCl_2 \cdot 2H_2O$) 100 g ในน้ำและเจือจางให้ได้ปริมาตร 1 l
- สารละลายกรดเกลือ (HCl) ผสมกรดเกลือเข้มข้น 1 ส่วน และน้ำกลั่น 9 ส่วนโดยปริมาตร
- สารละลายกรดเกลือ ผสมกรดเกลือเข้มข้นและน้ำกลั่นในอัตราส่วนเท่ากันโดยปริมาตร
- Methyl orange indicator โดยละลาย methyl orange 0.02 g ในน้ำร้อน 100 ml และกรอง
- สารละลายโซเดียมคาร์บอเนตโดยใช้ผลึกของ $(Na_2CO_3) \cdot 10H_2O$ 60g หรือ anhydrous Na_2CO_3 22 g ละลายในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรเป็น 100 ml

วิธีการทดลอง

1. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างถ่านหินประมาณ 1 g รวมกับ Eschka mixture 3 g ในครุชีเบล ผสมให้เข้ากันอย่างทั่วถึง แล้วปิดทับด้วย Eschka mixture 1 g
2. นำเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิห้องแล้วเพิ่มอุณหภูมิเป็น $825^\circ C$ ประมาณ 3 hr เผาจนกระทั่งสีดำของถ่านหินหมดไป
3. นำครุชีเบลออกจากเตาเผา ย่อยสารในครุชีเบลด้วยน้ำร้อน 100 ml และคนให้ทั่ว เป็นเวลา 30 min
4. ค่อยๆกรองสารละลายด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 ล้างด้วยน้ำร้อน หลายนครังจนสารละลายที่กรองได้ปริมาณ 250 l
5. ทำสารละลายที่กรองไว้ให้เป็นกลางด้วยกรดเกลือ โดยใช้ methyl orange เป็นอินดิเคเตอร์ ทำสารละลายให้เป็นกรดเล็กน้อยด้วยกรดเกลือ

6. ต้มสารละลายที่กรองให้เดือดและคนช้าๆ ค่อยๆเติมสารละลายแบเรียมคลอไรด์ลงไปอย่างช้าๆ 10 ml ด้วยปิเปต ต้มต่อไปเป็นเวลา 15 min ตั้งทิ้งไว้ค้างคืน
7. กรองตะกอนแบเรียมซัลเฟต ด้วยกระดาษกรอง Ashless เบอร์ 42 ล้างตะกอนด้วยน้ำร้อนหลายๆครั้งจนน้ำตะกอนปราศจากคลอไรด์ไอออน ซึ่งสามารถทดสอบโดยการเติมสารละลายซิลเวอร์ไนเตรท (AgNO_3)
8. นำตะกอนที่กรองได้พร้อมกระดาษกรองใส่ในครุชีเบลล์ที่ทราบน้ำหนักแน่นอนนำเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิ 850°C เป็นเวลาประมาณ 3 hr หรือจนกระทั่งน้ำหนักของครุชีเบลล์พร้อมตะกอนแบเรียมซัลเฟตคงที่ นำออกจากเตาเผาทำให้เย็นใน Desicator ชั่งน้ำหนัก บันทึกผล
9. Blank Correction ทำการทดลองเหมือนข้างต้นทุกประการ แต่ไม่ใช้ตัวอย่าง ถ่านหินเดิม เพื่อตรวจสอบสารเคมีที่ใช้มีปริมาณกำมะถันอยู่มากน้อยเพียงใด

คำนวณร้อยละของกำมะถันโดยใช้สมการ

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

เมื่อ

- A = น้ำหนักตะกอน BaSO_4 ที่ได้จากตัวอย่าง (g)
- B = น้ำหนักตะกอน BaSO_4 ที่ได้จาก blank correction (g)
- C = น้ำหนักตัวอย่างถ่านหินที่ใช้ (g)

3.การหาค่าความร้อนของถ่านหิน ASTM D 2015

หลักการ การทำงานภายในเครื่องบอมบ์คาลอริมิเตอร์ คือ ปรับอุณหภูมิของน้ำในถังให้เท่ากับเครื่องบอมบ์ เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนและวัดอุณหภูมิของน้ำที่เพิ่มขึ้นเมื่อเมื่อได้รับความร้อนจากตัวอย่างที่ถูกเผาไหม้ แล้วนำมาคำนวณหาค่าความร้อนของการเผาไหม้ตัวอย่างถ่านหิน และคำนวณน้ำหนักสมมูลของเครื่องบอมบ์คาลอริมิเตอร์คำนวณได้จากการคำนวณค่าความร้อนของการเผาไหม้กรดเบนโซอิก

เครื่องมือ Oxygen Bomb Calorimeter

สารเคมี ถ่านหิน 1 g, 0.072 นอร์มัล ของ Na_2CO_3 , Methyl orange ,กรดเบนโซอิก (Benzoic acid), ก๊าซออกซิเจน, น้ำกลั่น

วิธีการทดลอง

1. ชั่งถ่านหิน 1 g ลงในครุชชีเบล
2. ตัดลวด (fuse wire) ยาว 10 cm มาผูกปลายทั้งสองของหัวบอมบ์
3. นำครุชชีเบลไปวางในตำแหน่งบนหัวบอมบ์ จัดให้ลวดที่ผูกไว้แตะที่ผิวหน้าของถ่านหิน
4. ประกอบหัวบอมบ์กับออกซิเจนบอมบ์เข้าด้วยกัน ชันเกลียวให้แน่นแล้วนำไปอัดแก๊สออกซิเจน จนมีความดัน 20 – 25 บรรยากาศ
5. เติมน้ำกลั่นลงในถังบอมบ์ 1 l โดยให้น้ำหนักมีอุณหภูมิ 24 -25 °C นำออกซิเจนบอมบ์ที่อัดแก๊สเรียบร้อยแล้ววางลงในถังบอมบ์เติมน้ำลงไปในถังอีก 1 l เสียบสายจลาระเบิด 2 เส้น ต่อเข้ากับบอมบ์ ปิดฝาเครื่อง
6. เปิดสวิตซ์ให้เครื่องกวน ทำงานทุกๆ min บันทึกค่าอุณหภูมิของน้ำ เมื่อเดินเครื่องประมาณ 5 min กดปุ่มระเบิดบันทึกค่าอุณหภูมิที่จุดระเบิดนี้ และอุณหภูมิของน้ำที่สูงขึ้นทุกครึ่งmin จนกระทั่งถึงอุณหภูมิสูงสุดแล้วลดลงคงที่ในที่สุด
7. ปิดสวิตซ์ของเครื่อง นำออกซิเจนบอมบ์ออกมาจากเครื่องปล่อยให้แก๊สออกซิเจนออกจากบอมบ์อย่างช้าๆ ให้หมด
8. ล้างหัวบอมบ์และออกซิเจนบอมบ์รวมทั้งครุชชีเบลด้วยน้ำกลั่นที่เติม Methyl orange จนหมดกรด
9. น้ำที่ล้างได้นำไปไตเตรดกับ 0.072 นอร์มัล ของ Na_2CO_3 บันทึกจำนวน ml ของ Na_2CO_3 ที่ใช้ไป

10. วัดความยาวของลวดที่เหลือจากการเผาไหม้

สมการที่ใช้คำนวณหาค่าความร้อน

$$H = \frac{(TE - e_1 - e_2 - e_3)}{g}$$

H = ค่าความร้อนของการเผาไหม้ถ่านหิน (cal/g)

T = อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ซึ่งได้แก่ค่าจากเทอร์โมมิเตอร์ ($^{\circ}\text{C}$)

$$= T_c - T_a$$

T_c = อุณหภูมิที่สูงที่สุดของการเผาไหม้ ($^{\circ}\text{C}$)

T_a = อุณหภูมิเริ่มจุดระเบิด ($^{\circ}\text{C}$)

E = ค่า calorimeter energy equivalent (cal/ $^{\circ}\text{C}$)

e_1 = การแก้ค่าความร้อนของกรดไนตริก

= จำนวน ml ของ 0.072 นอร์มัล ของ Na_2CO_3 ที่ใช้ในการไตเตรด

e_2 = การแก้ค่าความร้อนของกรดซัลฟิวริก

$$= 14 \times (\% \text{ กำมะถัน})$$

e_3 = การแก้ค่าความร้อนของการเผาไหม้ลวด (g)

$$= 2.3 \times \text{ความยาวลวดที่ใช้ไป}$$

g = ตัวอย่างถ่านหิน (g)

ภาคผนวก ข
การคำนวณหาความเร็วต่ำสุดที่เกิดฟลูอิดไดซ์

ใช้สภาวะอ้างอิง ที่อุณหภูมิ 900 °C ความดัน 1 บรรยากาศ

คุณสมบัติของอากาศที่สภาวะดังกล่าว

- ความหนาแน่นของอากาศ (ρ_{air}) = 0.0003 $\frac{g}{cm^3}$
- ความหนืดของอากาศ (μ_{air}) = 0.00004627 $\frac{g}{cm.s}$

คุณสมบัติของถ่านหินคุณภาพต่ำ

- ความหนาแน่นของถ่านหิน (ρ_{coal}) = 1.136 $\frac{g}{cm^3}$
- เส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านหิน (D_{coal}) = 0.35 cm
- ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (g) = 981 $\frac{cm}{s^2}$

ใช้สมการของ Wen และ Yu (1947)

$$\frac{D_{coal} U_{mf} \rho_{air}}{\mu_{air}} = \left[33.7^2 + 0.0408 \frac{D_{coal}^3 \rho_{air} (\rho_{coal} - \rho_{air}) g}{\mu_{air}^2} \right]^{1/2} - 33.7$$

$$\frac{0.35 \times U_{mf} \times 0.0003}{0.00004627} = \left[33.7^2 + 0.0408 \frac{0.35^3 \times 0.0003 (1.136 - 0.0003) \times 981}{0.00004627^2} \right]^{1/2} - 33.7$$

$$U_{mf} = 215.91$$

หรือ $U_{mf} = 2.15 \frac{m}{s}$

คำนวณความเร็วตกอิสระของอนุภาคหรือความเร็วสุดท้าย

$$U_{t,spherical} = \left[\frac{3.1d_p g (\rho_s - \rho_g)^2}{\rho_g} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{สำหรับ} \quad 0.4 < Re_p < 500$$

$$= \left[\frac{3.1 \times 0.35 \times 981 (1.136 - 0.0003)^2}{0.0003} \right]^{1/2}$$

$$= 2,139 \frac{cm}{s} \quad \text{หรือ} \quad 21.39 \frac{m}{s}$$

ตรวจสอบ ค่า

$$Re = \frac{d_p \rho_g U_t}{\mu}$$

$$= \frac{0.35 \times 0.0003 \times 2139}{0.00004627}$$

$$= 4854$$

ภาคผนวก ค
การคำนวณสมดุลมวลสารและพลังงาน

การคำนวณหาประสิทธิภาพการเผาไหม้ และปริมาณความร้อนที่สูญหายโดยอาศัยหลักการ
ทำสมดุลมวลสารและพลังงาน (Material and energy balance) แสดงตัวอย่างการคำนวณโดย
ใช้ข้อมูลการทดลองที่

อัตราส่วนผสมของถ่านหินและปูนขาว	5:1	โดยน้ำหนัก
อุณหภูมิเบด	900	°C
ความเร็วอากาศ	2.05	m/min
อุณหภูมิกระเปาะเปียก	26	°C
อุณหภูมิกระเปาะแห้ง	33	°C

ข้อสมมติในการคำนวณ

1. การปฏิบัติการเผาไหม้อยู่ที่สภาวะคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงกับเวลา (Steady state)
2. ความดัน 1 บรรยากาศ

ฐานการคำนวณ การเผาไหม้นาน 1 min

สมดุลมวลสาร

ทางเข้า

- | | | |
|--|---|-------------------|
| 1. น้ำหนักของถ่านหินที่ใช้ในการเผาไหม้ | = | 183.33 kg |
| 2. น้ำหนักของปูนขาวที่ใช้ในการเผาไหม้ | = | 36.66 kg |
| 3. ความชื้นในถ่านหินที่ใช้ในการเผาไหม้ | = | 183.33x21.801/100 |
| | = | 40 kg |
| | = | 2.22 kmol |

$$\begin{aligned}
 \text{ความชื้นในปูนขาว} &= 0.0012 \times 36.66 \\
 &= 0.044 \text{ kg} \\
 &= 0.0024 \text{ kmol}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ปริมาณความชื้นทั้งหมดในเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้า} &= 40.044 \text{ kg} \\
 &= 2.2224 \text{ kmol}
 \end{aligned}$$

$$4. \text{ อัตราการไหลของอากาศที่เข้าสู่คอลัมน์} = 997.2 \text{ l}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ปริมาณของอากาศที่สภาวะมาตรฐาน} \quad V_2 &= \frac{P_1 V_1 T_2}{P_2 T_1} \\
 &= 997.2 \times 273 / 306 \\
 &= 889.7 \text{ l}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{จำนวน kgmol ของอากาศที่เข้าทั้งหมด} &= 889.7 / 22.4 \\
 &= 39.72 \text{ kmol}
 \end{aligned}$$

ความชื้นของอากาศที่เข้าสู่คอลัมน์ (จาก psychometric chart)

$$\begin{aligned}
 &= 0.0178 \text{ kg ของน้ำ / kg ของอากาศแห้ง} \\
 &= 0.0287 \text{ mol ของน้ำ / mol ของอากาศแห้ง}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{น้ำในอากาศที่ป้อนเข้า} &= (0.0287)(39.72) / (1.0287) \\
 &= 1.11 \text{ kmol} \\
 &= 19.98 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{จำนวน kmol ของอากาศแห้ง} &= 39.72 - 1.11 \text{ kmol} \\
 &= 38.61 \text{ kmol} \\
 &= 38.61 \times 28.84 \\
 &= 1113.5 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ปริมาณออกซิเจนในอากาศที่ป้อนเข้า} &= (0.21)(38.61) \text{ kmol} \\
 &= 8.11 \text{ kmol} \\
 &= 146 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ปริมาณไนโตรเจนในอากาศที่ป้อนเข้า} &= (0.79)(38.61) \text{ kmol} \\
 &= 30.5 \text{ kmol} \\
 &= 854 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

ทางออก

1. น้ำหนักของถ้ำจากท่อสั้น = 29.10 kg
2. น้ำหนักถ้ำจากไซโคลน = 6.20 kg
3. น้ำหนักถ้ำในเบด = 22.20 kg

4. น้ำหนักของฟลูก๊าสที่ออกจากคอลัมน์

$$\begin{aligned}
 &\text{เนื่องจากในถ่านหินคุณภาพต่ำมีไนโตรเจนอยู่} \quad 1.3 \quad \% \\
 &= \frac{(1.3 \times 183.33)}{(100 \times 28)} \text{ kmol} \\
 &= 0.085 \text{ kmol}
 \end{aligned}$$

สมดุลไนโตรเจน

$$\begin{aligned}
 \text{ไนโตรเจนเข้า} &= \text{ไนโตรเจนออก} \\
 \text{ไนโตรเจนที่ออกจากฟลูก๊าส} &= \text{ไนโตรเจนจากอากาศ} + \text{ไนโตรเจนจาก} \\
 &\quad \text{ถ่านหิน} \\
 &= 30.5 + 0.085 \text{ kmol} \\
 &= 30.585 \text{ kmol} \\
 &= 30.585 \times 28 = 856.38 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

ในฟลูว์ก๊าซประกอบด้วย

ไนโตรเจน	77.282 %
ออกซิเจน	0.5 %
คาร์บอนไดออกไซด์	12 %
คาร์บอนมอนอกไซด์	9.892 %
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์	0.326 %

$$\begin{aligned}
 &\text{มีไนโตรเจน} \quad 77.282 \text{ kmol} \quad \text{ในฟลูว์ก๊าซ} \quad 100 \quad \text{kmol} \\
 &\text{ถ้าไนโตรเจน} \quad 30.585 \text{ kmol} \quad \text{ในฟลูว์ก๊าซ} \\
 &\text{จำนวน kmol ของฟลูว์ก๊าซที่แห้ง} \quad = \quad \frac{30.585}{0.77282} \quad \text{kmol} \\
 &\quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad = \quad 39.6 \quad \text{kmol} \\
 &\text{จำนวน kg - mol ของออกซิเจน} \quad = \quad \frac{0.5 \times 39.6}{100} \quad \text{kmol} \\
 &\quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad = \quad 0.2 \quad \text{kmol} \\
 &\quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad = \quad 0.2 \times 32 = 6.4 \text{ kg} \\
 &\text{จำนวน kg - mol ของคาร์บอนไดออกไซด์} \quad = \quad \frac{12 \times 39.6}{100} \quad \text{kmol} \\
 &\quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad = \quad 4.75 \quad \text{kmol} \\
 &\quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad = \quad 4.75 \times 44 = 209 \text{ kg} \\
 &\text{จำนวน kg - mol ของคาร์บอนมอนอกไซด์} \quad = \quad \frac{(9.892 \times 39.6)}{100} \quad \text{kmol} \\
 &\quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad = \quad 4 \quad \text{kmol} \\
 &\quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad = \quad 4 \times 28 = 112 \text{ kg} \\
 &\text{จำนวน kg - mol ของซัลเฟอร์ไดออกไซด์} \quad = \quad \frac{0.326 \times 39.6}{100} \quad \text{kmol} \\
 &\quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad = \quad 0.13 \quad \text{kmol} \\
 &\quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad = \quad 0.13 \times 64 = 8.32 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

ก๊าซ	ร้อยละโดยปริมาตร	จำนวน(kmol)	น้ำหนัก(kg)
ไนโตรเจน	77.282	30.585	856.38
ออกซิเจน	0.5	0.2	6.4
คาร์บอนไดออกไซด์	12	4.75	209
คาร์บอนมอนอกไซด์	9.892	4	112
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์	0.326	0.13	8.32
รวม	100	39.665	1192.1

5. ปริมาณน้ำในฟลูก๊าซ

จาก psychometrics chart (1954)

$$= 0.0178 \text{ kgของน้ำ/kg ของอากาศแห้ง}$$

$$= 0.0287 \text{ molของน้ำ/molของอากาศแห้ง}$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณน้ำในฟลูก๊าซ} &= (0.0287)(39.665) = 1.14 \text{ kmol} \\ &= 20.52 \text{ kg} \end{aligned}$$

สมดุลคาร์บอน

Carbon in

$$\text{C จากถ่านหินที่ป้อน} = \frac{(0.4048 \times 183.33)}{12} = 6.18 \text{ kmol}$$

เพราะว่าปูนขาวไม่สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงได้หมด 100 %
 ดังนั้น carbon ที่ป้อนเข้ามาจากถ่านหินเพียงอย่างเดียว = 6.18 kmol

Carbon out = คาร์บอนในเถ้าจากท่อลั่นและไซโคลน+CO₂+CO

คาร์บอนในเถ้าที่ออกจากท่อลั่น = (6.41)(29.10)/(100)(12)

= 0.15 kmol

คาร์บอนในเถ้าจากไซโคลน = (8.05)(6.20)/(100)(12)

= 0.05 kmol

carbon out = C ในฟลูก๊าส+C ในเถ้าจากท่อลั่น + C ในเถ้าจากไซโคลน

= 4.75+4+0.15+0.05

= 8.95 kmol

ความแตกต่างเนื่องจากการทดลอง = 8.95 - 6.18 kmol

= 2.77 kmol

สมดุลมวลสาร

ทางเข้า			ทางออก		
	นน.(kg)	%		นน.(kg)	%
น้ำหนักถ่านหิน	183.33	13.55	น้ำหนักเถ้าจากท่อสิ้น	29.10	2.15
น้ำหนักปูนขาว	36.66	2.7	น้ำหนักเถ้าจากไซโคลน	6.20	0.46
น้ำหนักอากาศแห้ง	1113.5	82.27	น้ำหนักเถ้าในเบด	12.20	0.9
ความชื้นในอากาศ	19.98	1.48	น้ำหนักก๊าซแห้ง	1192.1	88.1
			ความชื้นในฟลูก๊าส	20.52	1.5
			น้ำหนักสูญเสีย	93.35	6.89
รวม	1353.47	100	รวม	1353.47	100

สมดุลพลังงาน

อุณหภูมิอ้างอิง 25 °C (77 °F)

ทางเข้า

1. ค่าความร้อนของถ่านหินที่เข้าคอลัมน์ $= (3627)(183.33) \times 10^{-3} \text{ Kcal}$
 $= 665 \text{ Kcal}$
2. เอนทาลปีของถ่านหิน & ปูนขาว $= 0 \text{ Kcal}$
3. เอนทาลปีของอากาศที่ 33 °C $= (39.6)(6.9720)(306-298)$
 $= 2.21 \text{ Kcal}$
4. เอนทาลปีของน้ำในอากาศที่ 33 °C $= (10491.44)(1.11) \times 10^{-3}$
 $= 11.65 \text{ Kcal}$

ทางออก

1. ค่าความร้อนของเถ้าจากท่อถ่าน $= (412.60 \times 10^{-3})(29.10)$
 $= 12.01 \text{ Kcal}$
2. ค่าความร้อนของเถ้าจากไซโคลน $= (389.70 \times 10^{-3})(6.20)$
 $= 2.41 \text{ Kcal}$
3. ค่าความร้อนของการเผาไหม้ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์
 $= (67.636 \text{ kcal/kg mol})(4.0 \text{ kmol})$
 $= 270.544 \text{ Kcal}$

4. เอนทาลปีของฟลูก๊าสที่ 900°C

ก๊าส	kmol	C_p (kcal/kmol.K)	nC_{pm}
CO ₂	4.75	13.46	63.94
CO	4	8.16	32.64
N ₂	30.585	8.06	246.52
O ₂	0.2	8.52	1.7
รวม	39.535		344.8

$$\begin{aligned} \text{เอนทาลปีของฟลูก๊าส} &= (344.8 \times 10^{-3})(1173 - 300) \\ &= 301.01 \text{ Kcal} \end{aligned}$$

5. เอนทาลปีของไอน้ำในฟลูก๊าสอุณหภูมิ 900° C

$$\text{ปริมาณความร้อนของการระเหยที่ } 25^\circ\text{C} = 10500 \text{ cal/kmole}$$

$$\text{ความจุความร้อนเฉลี่ยของน้ำในช่วงอุณหภูมิ } 25^\circ\text{C}-900^\circ\text{C} = 8.9780 \text{ cal/kmole}$$

$$\begin{aligned} \text{เอนทาลปีของไอน้ำ} &= 1.14 \times (10500 + 8.9780(900 - 25)) \times 10^{-3} \text{ Kcal} \\ &= 21 \text{ Kcal} \end{aligned}$$

6. ค่าความร้อนจากปฏิกิริยาซัลเฟชันของปูนขาว

$$H = 210 \text{ KJ/kmol}$$

$$\text{ค่าความร้อนของปฏิกิริยา} = 50.19 \text{ Kcal/kmol}$$

ข้อสมมติ

1. กำมะถันที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาอยู่ในสถานะก๊าซ

2. ปริมาณ SO_3 มีน้อยมากเมื่อเทียบกับ SO_2

ปริมาณกำมะถันที่เข้าทำปฏิกิริยา = ปริมาณกำมะถันในถ่านหิน-ปริมาณกำมะถัน
ในฟลูก๊าส - ปริมาณกำมะถันในเถ้าจากท่อถล่ม

และ

ไซโคลน

$$= (0.0248)(183.33)/32 - 0.13 - (0.0028)(29.10)/32$$

$$= 9.5345 \times 10^{-3} \text{ kmol}$$

ค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาซัลเฟชัน

$$= 50.19 \times 9.5345 \times 10^{-3}$$

$$= 0.47 \text{ kcal}$$

ทางเข้า			ทางออก		
	Kcal	%		Kcal	%
ค่าความร้อนของถ่านหิน	665	97.95	ค่าความร้อนของเถ้าจากท่อถล่ม	12.01	1.77
เอนทาลปีของถ่านหิน&ปูนขาว	0	0.00	ค่าความร้อนของเถ้าจากไซโคลน	2.41	0.36
เอนทาลปีของอากาศ	2.21	0.32	ค่าความร้อนของ CO	270.544	39.85
เอนทาลปีของน้ำในอากาศ	11.65	1.73	เอนทาลปีของฟลูก๊าส	301.01	44.34
			เอนทาลปีของน้ำในฟลูก๊าส	21	3.1
			ค่าความร้อนจากปฏิกิริยา	0.47	0.07
			ความร้อนสูญเสีย	71.416	10.52
รวม	678.86	100.00	รวม	678.86	100.00

การคำนวณประสิทธิภาพของเตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิง

ประสิทธิภาพของเตาผลิตเชื้อเพลิงก๊าซ คำนวณจากค่าความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิงทั้งหมดที่ผลิตได้ต่อพลังงานความร้อนที่เข้าสู่ระบบ

$$\text{ประสิทธิภาพของเตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิง} = \frac{\text{ค่าความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้} \times 100}{\text{ค่าความร้อนทั้งหมดที่ป้อนเข้าสู่ระบบ}}$$

$$= \frac{270.544 \times 100}{678.86}$$

$$= 39.85 \%$$

การคำนวณต้นทุนทางความร้อน

ราคาของปูนขาว 1 kg ราคา 7 ฿

ราคาของถ่านหินคุณภาพต่ำ 1 kg ราคา 1 ฿

ดังนั้น ราคาของถ่านหินคุณภาพต่ำและปูนขาวที่ใช้ในการผลิตเชื้อเพลิง

$$= \frac{183.33 \text{ g} \times 1 \times 1 \text{ kg}}{1 \text{ min} \times 1 \text{ kg} \times 1000 \text{ g}} + \frac{36.66 \text{ g} \times 7 \times 1 \text{ kg}}{1 \text{ min} \times 1 \text{ kg} \times 1000 \text{ g}}$$

$$= 0.18333 + 0.25662$$

$$= 0.62328 \text{ ฿ หรือ } 0.75 \text{ ฿}$$

$$= 75 \text{ สตางค์ ต่อ ความร้อนที่ผลิตได้ } 1.25 \text{ MJ/m}^3$$

ภาคผนวก ง
การคำนวณหาค่าความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิง

องค์ประกอบก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลอง ณ อุณหภูมิ 900 °C
เมื่อใช้ถ่านหินขนาด 2.36 – 3.5 mm และค่า Heating value ของก๊าซแต่ละชนิด

Composition	% Volume (dry gas)	Heats of Combustion
		kcal/kmol
SO _x	0.33	-
CO	9.9	67,636
CO ₂	12	-
N ₂ , orther	7.67	-
Total	100.00	

Basis : 1 kmole dry gas

$$\begin{aligned} \text{Heating value of CO} &= \frac{9.9}{100} \times 67636 \\ &= 6696.3 \quad \frac{\text{kcal}}{\text{kmol of mixture}} \end{aligned}$$

$$\text{Heating value of CO}_2 \text{ and N}_2 = 0$$

Heating value of producer gas :

$$= 6696.3 \quad \frac{\text{kcal}}{\text{kmol of mixture}}$$

ที่สภาวะ 25 °C ก๊าซ 1 kgmol มีปริมาตร 22.4 m³

$$= \frac{6696.3}{22.4} \quad \frac{\frac{\text{kcal}}{\text{kmol of mixture}}}{\text{m}^3}$$

$$= 299 \quad \frac{\text{kcal}}{\text{m}^3}$$

1 kcal มีค่าเท่ากับ 4.18 kJ

$$= (299 \times 4.187) \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}$$

$$= 1251 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}$$

$$= 1.25 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$$

เพราะฉะนั้น Heating value ของก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ เท่ากับ $1.25 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$ ที่ 25°C

ความดัน 1 บรรยากาศ

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

- นายชัยวิทย์ เสมอภาค เกิดวันที่ 1 ธันวาคม พ.ศ. 2518 ที่ จังหวัดอุบลราชธานี สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จากมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ปีการศึกษา 2541
- ได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2544
- ระหว่างการศึกษาได้รับการสนับสนุนเงินทุนการวิจัยจาก สถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และกรุงเทพมหานคร
- ปัจจุบันรับราชการ ตำแหน่งวิศวกรเครื่องกล ฝ่ายวิศวกรรม กองโรงงานช่างกล สำนักการคลัง กรุงเทพมหานคร