

เอกสารอ้างอิง

1. MACEK, A. "Coal Combustion in Boilers: A mature Technology Facing New Constraints" in the Seventeenth Symposium (International) on Combustion: pp. 65-75, the Combustion Institute, Pennsylvania, 1979.
2. นกตล มัณฑะจิตร "หินน้ำมัน" รายงานการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ ฉบับที่ 1, กระทรวงอุตสาหกรรม, 2523.
3. Bhattacharya, S.C., Alikhani, Z. and Shah, N. "Fluidized Bed Combustion of Paddy Husk". Energy Technology Division, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.
4. Preuit, L.C. and Wilson, K.B. "Atmospheric Fluidized Bed Combustion of Municipal Solid Waste". in the Proceedings of the Sixth International Conference on Fluidized Bed Combustion, Volume III, pp. 872-883, Atlanta, Georgia, 1980.
5. Mei, J.S., et al. "Fluidized Bed Combustion of Israeli Oil Shale" in the Proceedings of the Sixth International Conference on Fluidized Bed Combustion, Volume III, pp. 834-839, Atlanta, Georgia, 1980.
6. Stratton, J.F.O., Power 68, p. 486, September 1928.
7. Patter, W.C. and Griffin, R. in Fluidized-Bed Energy Technology Coming to a Boil. pp. 9-17, INFORM, Inc., 1978.
8. Skinner, D.G. "The Fluidized Combustion of Coal". Mill & Boon Limited, London, 1971.
9. Robinson, E.B., et al. "Development of Coal Fired Fluidized-Bed Boilers". OCR R & D Report No. 36, Vol. I, II, 1972.
10. Coates, N.H., and Rice, R.L. "Proceedings of Second International Conference on Fluidized-Bed Combustion", NAPCA, Houston Woods, Ohio, 1970.

11. Zielke, C.W. "Sulphur Removal During Combustion of Solid Fuels in a Fluidized-Bed of Dolomite" Air Pollution Control Association. 20, 3, 1970.
12. Nack, et al. "Fluidized-Bed Combustion Review" Hemisphere Publishing Corporation, 1975.
13. Gamble, R.L. "Operation of the Georgetown University Fluidized Bed Steam Generator" in the Proceedings of the sixth International Conference on Fluidized Bed Combustion, Volume II, Atlanta, Georgia, 1980.
14. Pitrolo, A.A. and Shang, J.Y. "Fluidized-Bed Combustion of Oil Shale" U.S. Department of Energy, Morgantown Energy Technology Center, Morgantown, October 1980.
15. Yavuzkurt, S., Gutfinger, C. and Dayan, J. "Fluidized Combustion of Oil Shale" Faculty of Mechanical Engineering, Technion-Israeli Institute of Technology, Haifa, Israel, 1980.
16. Lurgi "Mae Sot Oil Shale Project" Interim Report No. 3, 1980.
17. Yen, T.F. in Science and Technology of Oil Shale (Yen, T.F. ed.) pp. 1-17, Ann Arbor Science Publishers, Michigan, 1976.
18. Yen, T.F. and Chilingarian, G.V. in Oil Shale, pp. 1-5, Elsevier Scientific Publishing Company, Netherland, 1976.
19. สุธรรม วาณิชเสณี "โครงการวิจัยนโยบายการใช้พลังงานจากหินน้ำมันเป็นพลังงานทดแทน" คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, สิงหาคม, 2524.
20. Tantisukrit, C., et al. "Oil Shale Resources at Ban Huai Kalok, Mae Sot District Thailand" Report Submitted to Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT), Department of Geological Sciences, Chiang Mai University, Chiang Mai, 1981.
21. ICSITEEMR "Technical Report" Romania, 1980.

22. Polzonov, I.I. "Report on the Laboratory study of Thailand Oil Shale" Oil Shale Research Institute, V/O TSVETMETPROM-EXPORT, Soviet Union, 1980.
23. พูลพร แสงบางปลา "การวิเคราะห์และทดสอบน้ำมันจากหินน้ำมัน" รายงานเสนอต่อสถาบันวิจัย และพัฒนาของคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2523.
24. สุรพล ถนอมทรัพย์ "ปริมาณน้ำมันหินและการลำดับชั้นหินตอนบนของหินชุด SANDY SHALE ทางตอนเหนือของบ้านห้วยกะโหลก ตำบลแม่ปะ อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก "กองเชื้อเพลิงธรรมชาติ กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงอุตสาหกรรม 2521.
25. กัญจนา บุญเกียรติ "การศึกษาคุณสมบัติของหินน้ำมันแม่สอด และผลิตผลจากการกลั่น" รายงานการประชุมทางวิชาการ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2520.
26. Kunii, D. and Levenspiel, O. in Fluidization Engineering. pp.1-80 John Wiley & Son Inc, 1969
27. Archer, D.H., et al. "Evaluation of the Fluidized Bed Process" APTD-1165, Westinghouse Research Laboratories, Pittsburgh, Pennsylvania, 1971
28. Beer, J.M. "The Fluidized Combustion of Coal" in the Sixteenth Symposium (International) on Combustion, pp. 439-460, The Combustion Institute, Pittsburgh, Pennsylvania, 1977
29. Stambuleanu, A. in Flame Combustion Process in Industry. pp. 414-425, Abacus Press, 1976
30. Tatebayashi, J., et al. in Fluidized Bed Combustion of Coal, Alternative Energy Sources II (Veziroglu, T.N. ed.) pp. 2987-2997, Hemisphere Publishing Co., New York, 1981

31. Leon, A.M. and Choksey, P.J. "Combustion characteristic of anthracite culm in a Fluidized Bed" in the Proceedings of the Sixth International Conference on Fluidized Bed Combustion, Volume III, Atlanta, Georgia, 1980
32. Fraas, A.P. and holcomb, R.S. "Atmospheric Fluidized Bed Combustion Technology Test Unit For Industrial Cogeneration Plants" in the Proceedings of the Fifth International Conference on Fluidized Bed Combustion, Volume III, pp. 55-69, Washington, d.C., 1977
33. Rice, R.L., et al. "Fluidized-Bed Combustion of North Dakota Lignite" in the Proceedings of the Sixth International Conference on Fluidized Bed Combustion, Volume III, pp. 863-871, Atlanta, Georgia, 1980
34. Abel, W.T., et al. "Combustion of Western Coal in a Fluidized Bed" in the Proceedings of the Sixth International Conference on Fluidized Bed Combustion, Volume III, pp. 840-849, Atlanta, Georgia, 1980
35. Rudinger, G. "Effect of Velocity Slip on the Burning Rate of Fuel Particles" in Fluid Mechanics of Combustion. (Dussourd, J.L., Lohmann, R.P. and Uram, e.M. ed.), pp. 39-40, THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, New York, 1974
36. Naude, D.P. and Dutkiewicz, R.K. "Fluidized-Bed Combustion of Poor Quality Coal" in Fluidization, Cambridge Press, 1978
37. Wells, J.W., Krishnan, R.P. and Ball, C.E. "A Mathematical Model for Simulation of AFBC System" in The Proceedings of the Sixth International Conference on Fluidized Bed Combustion, Volume III, pp. 773-783, Atlanta, Georgia, 1978

38. บุญศักดิ์ ใจจงกิจ "เครื่องกลขนถ่าย ระบบขนถ่ายต่อเนื่อง" อนุกรมขนถ่ายวัสดุ 2, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
39. สมยศ จันเกษม และ ศิโยศักดิ์ ชิงะ "การออกแบบชิ้นส่วนเครื่องกล" สมาคมส่งเสริมความรู้ด้านเทคนิคระหว่างประเทศ, 2523
40. Archie, W.C., Jr., in Principles of Energy Conversion. pp. 98-115 McGraw-Hill, Inc., 1979.
41. Poersch, W. and Zabeschek, G. "Fluidized Bed Combustion of Flotation Tailings" in Fluidization, Cambridge Press, 1978
42. Daugherty, R.L. and Franzini, J.B. in FLUID MECHANICS With Engineering Applications, 7th ed., pp.294-299, McGraw-Hill, Inc., 1977
43. Ergun, S. Chemical Engineering Progress. 48. 89, 1952
44. Wen, C.Y., and Yu, Y.H. A.I.Che. Journal., 12. 610, 1966

ภาคผนวก ก.

การออกแบบ เครื่องบ่อนแบบสกรู

ก.1 อัตราการบ่อนหินน้ำมันของ เครื่องบ่อนแบบสกรู⁽³⁸⁾ (T_m)

กรณีเกลียวเต็มใบ

$$T_m = 60 \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot \rho_s \cdot n \cdot h \cdot C_s \cdot f \cdot k$$

กำหนด

$$k = 0.3 \text{ (วัสดุที่บ่อนบรรจุอยู่เพียง 50% ของพื้นที่ใบเกลียว)}$$

$$D = 3.8 \text{ ซม.} = 0.038 \text{ ม.}$$

$$\rho_s = 2440 \text{ กก./ม.}^3 \text{ (ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นหินน้ำมัน)}$$

$$h = D = 0.038 \text{ ม.}$$

$$C_s = 1.0 \text{ (สำหรับใบเกลียวเต็มใบ)}$$

$$f = 1.0 \text{ (สำหรับควรรี่ล้นในแนวระดับ)}$$

$$\begin{aligned} T_m &= 0.3 \times \frac{\pi}{4} (0.038)^2 \times 2440 \times 60 \times (0.038) \times n \times 1 \times 1 \\ &= 1.89n \text{ กก./ชม.} \end{aligned}$$

ก.2 ขนาดกำลังขับและแรงบิด

$$P_s = T_m \cdot L_s \cdot g \cdot (\Omega \pm \sin \delta)$$

$$T_s = \frac{60 P_s}{2\pi n}$$

กำหนด $L_s = 1.5 \text{ ม.}$

$$g = 9.8 \text{ ม./วินาที}^2$$

$$\Omega = 4 \text{ (วัสดุมีความแข็งแรง เนื้อเหนียวแกร่ง)}$$

$$\delta = 0^\circ \text{ (สำหรับการบ่อนในแนวระดับ)}$$

$$T_s = \frac{T_m \times 1.5 \times 9.8 \times (4+0) \times 60}{3600 \times 2 \pi n}$$

$$= 0.156 \frac{T_m}{n} \text{ นิวตัน.เมตร}$$

$$P_s = T_s \cdot \frac{2\pi n}{60}$$

$$= 0.105 \times T_s \cdot n \text{ วัตต์}$$

ก.3 การคำนวณหาขนาดเพลลาของ เครื่องป้อนแบบสกรู ⁽³⁹⁾ d_s

จากตารางที่ ก-1 $T_s = 30$ กิโลกรัม.มม.

$$\tau = \frac{16T_s}{\pi d_s^3}$$

กำหนดให้ เพลลาทำด้วย เหล็ก S30C (JIS)

$$\sigma_B = 48 \text{ กก./มม.}^2$$

$$S_{f1} = 6$$

$$S_{f2} = 2$$

$$\tau_a = \frac{48}{6 \times 2} = 4 \text{ กก./มม.}^2$$

เลือก $k_t = 1.5$ (มีการกระแทกเป็นบางครั้ง)

$$d_s^3 = \frac{16 T_s}{\pi \tau_a} \cdot k_t$$

$$d_s = \left[\frac{16 \times 30 \times 1.5}{\pi \times 4} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$= 3.85 \text{ มม.}$$

กำหนดขนาดของ เพลลาของ เครื่องป้อนแบบสกรู = 13 มม.

$$d_s = 1.3 \text{ ซม.}$$

ตารางที่ ก-1 แสดงอัตราการป้อนหินน้ำมัน, ความเร็วรอบของสกรู, แรงบิดและกำลังที่ป้อนให้แก่เพลลาของ เครื่องป้อนแบบสกรู

T_m (Kg/hr)	n (rpm.)	T_s		P_s	
		(N.m)	(Kg _f .m)	(W)	(HP)
10	5.3			0.163	0.0002
20	10.6			0.327	0.0004
30	15.9			0.491	0.0006
40	21.2			0.654	0.0009
50	26.5			0.818	0.0011
60	31.8			0.982	0.0013
70	37.1	0.294	0.03	1.145	0.0015
80	42.4			1.309	0.0018
90	47.7			1.472	0.0020
100	53.0			1.636	0.0022
110	58.3			1.799	0.0024
120	63.6			1.963	0.0026
130	68.9			2.127	0.0029
140	74.2			2.291	0.0031
150	79.5			2.454	0.0033

ภาคผนวก ข.

ตารางที่ ข-1 ข้อมูลการทดลองหาค่า U_{mf} ของหินน้ำมันขนาด 3.94 มม.

W (gm)	500		1,000		1,500				
	U_0 (cm/s)	ΔP (cm H ₂ O)	L (cm)	ΔP (cm H ₂ O)	L (cm)	ΔP (cm H ₂ O)	L (cm)		
55.6	0.55			1.70			2.40		
61.78	0.70			2.10			2.65		
77.23	1.10			2.85			3.90		
92.67	1.60			4.10			4.20		
108.12	2.15		6.5	6.30		13.4	7.35		20.3
123.56	2.85			6.85			9.55		
139.01	3.60			8.20			12.55		
154.46	4.35			8.80			14.15		
169.90	4.00			9.00			16.35		
185.35	4.20			9.50		13.8	15.65		21.0
200.79	4.20 *		7.0	10.20 *		14.5	15.95 *		21.7
216.24	4.45		7.5	8.50		15.0	14.15		22.2
231.68	4.20		7.5	10.20		15.3	15.85		22.5
247.13	4.45		8.0	9.80		15.5	14.55		24.0
262.58	4.25		8.0	9.80		16.0	15.95		24.0
278.02	4.45		8.4	9.80		16.5	14.00		24.0

*ระดับน้ำในมาโนมิเตอร์มีการขึ้น ๆ ลง ๆ ตลอดเวลาแต่มีแนวโน้มคงที่

U_{mf} - ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านเบดขณะเริ่มฟลูอิไดซ์

U_0 - ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านท่อทดลอง

ΔP - ความดันตกภายในเบด ; L - ความสูงของเบด

ตารางที่ ข-2 ข้อมูลการทดลองหาค่า U_{mf} ของหินน้ำมันขนาด 2.29 มม.

W (gm)	500		1,000		1,500		
	U_o (cm/ส)	ΔP (cm H ₂ O)	L (cm)	ΔP (cm H ₂ O)	L (cm)	ΔP (cm H ₂ O)	L (cm)
55.6	1.90			3.45		5.00	
61.78	2.10			3.90	13.6	5.50	21.2
77.23	3.05	6.5		5.35		7.50	
92.67	3.80			7.20		10.00	
108.12	3.45			7.65	14.0	10.80	21.3
123.56	3.70	7.0		8.80	14.3	13.00	21.5
139.01	3.90	7.5		9.30	14.5	14.00	22.0
154.46	4.10	7.6		9.40	15.0	14.30	23.0
169.90	4.10	8.0		9.50	15.5	14.90	23.3
185.35	4.10	8.2		9.50	16.0	14.90	24.0
200.79	4.40	8.5		9.50	16.3	14.90	24.5
216.24	4.40	9.0		9.50	16.8	14.90*	26.0
231.68	4.50	9.5		9.50*	18.0	14.90	
247.13	4.80	10.5		9.50		14.90	
262.58	4.80	11.0		9.50		14.90	
278.02	4.80	11.5		9.50		14.90	

* ระดับน้ำในมาโนมิเตอร์มีการขึ้นๆลงๆตลอดเวลาแต่มีแนวโน้มคงที่

U_{mf} - ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่าน เบดขณะ เริ่มฟลูอิโดซ์

U_o - ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านท่อทดลอง

ΔP - ความดันตกภายใน เบด ; L - ความสูงของ เบด

ตารางที่ ข-3 ข้อมูลการทดลองหาค่า U_{mf} ของหินน้ำมันขนาด 1.15 มม.

W (gm)	500		1,00		1,500		
	U_o (cm/s)	ΔP (cm H ₂ O)	L (cm)	ΔP (cm H ₂ O)	L (cm)	ΔP (cm H ₂ O)	L (cm)
55.6		4.40	7.2	9.00		12.10	
61.78		4.30	7.3	9.15	14.8	13.50	22.0
77.23		4.50	7.5	9.75	15.0	14.90	22.5
92.67		4.50	7.8	9.75	15.4	15.30	23.0
108.12		4.50*	8.0	9.75*	16.0	15.30*	24.0
123.56		4.50	8.5	9.75	17.0	15.30	
139.01		4.50	9.0	9.75	18.0	15.30	
154.46		4.50	10.0	9.75		15.30	
169.90		4.50	11.0	9.75		15.30	
185.35		4.50	12.0	9.75		15.30	
200.79		4.50	12.0	9.75		15.30	

* ระดับน้ำในมาโนมิเตอร์มีการขึ้นๆลงๆตลอดเวลาแต่มีแนวโน้มคงที่

U_{mf} - ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่าน เบดขณะ เริ่มฟลูอิโดซ์

U_o - ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านท่อทดลอง

ΔP - ความดันตกภายใน เบด ; L - ความสูงของเบด



ตารางที่ ข-4 ผลการวิเคราะห์ C, H, N และค่าความร้อนของหินน้ำมันโดยศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขนาดหินน้ำมัน (มม.)	C (%)		H (%)		N (%)		HV (Cal/gm)	
	3.94	23.29	22.95	2.90	2.91	0.50	0.53	2269
2.29	21.41	21.76	2.70	2.78	0.54	0.65	2091	2091
1.15	20.29	20.58	2.51	2.57	0.46	0.45	1896	1907

หมายเหตุ แต่ละตัวอย่างทำการวิเคราะห์ 2 ครั้ง

C - คาร์บอน ; H - ไฮโดรเจน ; N - ไนโตรเจน ; HV- ค่าความร้อนของหินน้ำมัน

ตารางที่ ข-5 ข้อมูล Sieve Analysis ของดินน้ำมันขนาดต่าง ๆ กัน

Mesh Number	น้ำหนักดินน้ำมันที่ค้างบนตะแกรง (กรัม)					
	ขนาดหินน้ำมัน-4+6		ขนาดหินน้ำมัน-6+10		ขนาดหินน้ำมัน-10+20	
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	237.5	237.0	14.4	16.4	0.2	0.0
8	11.1	11.7	123.0	125.9	0.5	0.9
10	0.9	0.9	49.0	45.4	0.5	1.2
14	0.5	0.8	59.2	57.3	68.2	55.5
20	0.0	0.1	4.6	5.1	162.1	167.6
30	0.0	0.0	0.5	0.9	14.8	18.8
50	0.0	0.0	0.5	0.6	1.1	3.7
100	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.9
รวม	250.0	250.5	251.2	251.6	247.8	248.6

ตารางที่ ข-6 ข้อมูลการปรับเทียบ (Calibrate) อัตราการป้อนหินน้ำมัน
ผ่านเครื่องป้อนแบบสกรู

ขนาดหิน 3.94 มม.		ขนาดหิน 2.29 มม.		ขนาดหิน 1.15 มม.	
RPM	Kg/hr	RPM	Kg/hr	RPM	Kg/hr
6.5	11.33	5.7	9.49	5.6	7.69
14.0	24.00	13.0	21.68	13.0	19.96
21.0	38.50	21.0	34.70	21.0	31.69
29.0	51.17	29.0	48.67	29.0	44.71
37.0	68.95	37.0	64.11	37.0	57.75
45.0	83.55	45.0	78.05	45.0	70.65
53.0	95.40	53.0	90.65	53.0	82.54
61.0	108.44	61.0	104.34	61.0	95.77
69.0	122.75	69.0	118.39	69.0	108.61

ตารางที่ ข-7 ข้อมูลการเผาไหม้หินน้ำมันขนาด 2.29 มม. ที่อัตราการม้อนหินน้ำมัน 9.49 กก./ชม.

Q Nm ³ /h	T ₁ °C	T ₂ °C	T ₃ °C	T ₄ °C	T ₅ °C	T ₆ °C	T ₇ °C	T ₈ °C	T ₉ °C	T ₁₀ °C	CO ₂ [*] %	O ₂ [*] %	CO [*] %
65	211	622	724	790	953	929	832	544	628	42	11.5	7.0	-
70	207	598	698	782	929	908	812	511	602	42	10.0	8.8	-
75	218	585	678	828	929	902	796	475	585	42	9.1	9.7	-
80	208	545	635	857	889	870	761	425	557	42	8.6	10.6	-
85	180	495	561	769	842	827	702	358	519	41	8.2	11.1	-

Q - อัตราการไหลของอากาศเชิงปริมาตร

T₁, T₂, T₃ และ T₈ - อุณหภูมิผนังเตาด้านสัมผัสกับ เปลวไฟ ที่ระยะห่างจากแผ่นกระจายอากาศ 5, 15, 25 และ 80 ซม. ตามลำดับ

T₄, T₅, T₆, T₇ และ T₉ - อุณหภูมิภายในเตาเผาที่ระยะห่างจากแผ่นกระจายอากาศ 10, 20, 30, 45, และ 115 ซม ตามลำดับ

T₁₀ - อุณหภูมิของอากาศก่อน เข้าเตาเผา

CO₂, O₂ และ CO - เป็นปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์, ออกซิเจน และ คาร์บอนมอนอกไซด์วิเคราะห์ได้จาก Orsat Appartus

(% โดยปริมาตร)

ตารางที่ ข-8 ข้อมูลการเผาไหม้หินน้ำมันขนาด 1.15 มม. ที่อัตราการป้อนหินน้ำมัน 7.69 กก./ชม.

Q Nm ³ /h	T ₁ °C	T ₂ °C	T ₃ °C	T ₄ °C	T ₅ °C	T ₆ °C	T ₇ °C	T ₈ °C	T ₉ °C	T ₁₀ °C	CO ₂ [*] %	O ₂ [*] %	CO [*] %
30	503	613	666	892	891	860	699	379	513	36	11.7	6.5	0.1
35	542	653	698	910	911	886	750	436	550	38	10.4	8.0	—
40	561	676	697	903	897	882	762	463	581	40	9.6	9.0	—
45	560	676	690	888	890	880	766	465	587	41	8.7	10.0	—
50	552	665	680	868	868	865	765	480	591	42	8.0	10.9	—
55	543	650	664	851	854	850	760	480	594	44	8.1	11.0	—

Q - อัตราการไหลของอากาศเชิงปริมาตร

T₁, T₂, T₃ และ T₈ - อุณหภูมิผนังเตาด้านสัมผัสกับ เปลวไฟ ที่ระยะห่างจากแผ่นกระจายอากาศ 5, 15, 25 และ 80 ซม.ตามลำดับ

T₄, T₅, T₆, T₇ และ T₉ - อุณหภูมิภายในเตาเผาที่ระยะห่างจากแผ่นกระจายอากาศ 10, 20, 30, 45 และ 115 ซม.ตามลำดับ

T₁₀ - อุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าเตาเผา

CO₂, O₂ และ CO - เป็นปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์, ออกซิเจน และคาร์บอนมอนอกไซด์วิเคราะห์ได้จาก Orsat Appartus

(% โดยปริมาตร)

ภาคผนวก ค.

ตัวอย่างการคำนวณขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของ เม็ดหินน้ำมัน

ตารางที่ ค-1 แสดงตัวอย่างการคำนวณหา \bar{d}_p ของ เม็ดหินน้ำมันขนาด -6+10

ช่วงตะแกรง (มม. - มม.)	d_{pi} (มม.)	น้ำหนักบน ตะแกรง (กรัม)	x_i	$(\frac{x}{d})_p^i$ (มม.)	$\bar{d}_p^{(26)} = \frac{1}{\sum (\frac{x}{d})_p^i}$ (มม.)
4.75 - 3.35	4.050	14.4	0.0573	0.0141	
3.35 - 2.36	2.885	123.0	0.4896	0.1697	
2.36 - 2.00	2.180	49.0	0.1950	0.0895	
2.00 - 1.40	1.700	59.2	0.2356	0.1386	
1.40 - 0.85	1.125	4.6	0.0183	0.0162	
0.85 - 0.60	0.725	0.5	0.0019	0.0027	
0.60 - 0.30	0.450	0.5	0.0019	0.0044	
รวม		251.2	0.9996	0.4352	2.29

d_{pi} - เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยระหว่างชั้นของตะแกรง; x_i - เศษส่วนของน้ำหนักหินน้ำมันที่ค้างบนตะแกรงแต่ละชั้น

ตารางที่ ค-2 แสดงตัวอย่างการคำนวณหา \bar{d}_p ของ เม็ดหินน้ำมันขนาด -10+20

ช่วงตะแกรง (มม. - มม.)	d_{pi} (มม.)	น้ำหนักบนตะแกรง (กรัม)	x_i	$\left(\frac{x}{d}\right)_i$	$\bar{d}_p = \frac{1}{\sum \left(\frac{x}{d}\right)_i}$ (มม.)
4.75 - 3.35	4.050	0.2	0.0008	0.0002	
3.35 - 2.36	2.885	0.5	0.0020	0.0007	
2.36 - 2.00	2.180	0.5	0.0020	0.0009	
2.00 - 1.40	1.700	68.2	0.2752	0.1618	
1.40 - 0.85	1.125	162.1	0.6541	0.5815	
0.85 - 0.60	0.725	14.8	0.0597	0.0823	
0.60 - 0.30	0.450	1.1	0.0044	0.0098	
0.30 - 0.15	0.225	0.4	0.0016	0.0072	
รวม		247.8	0.9998	0.8444	1.18

d_{pi} - เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยระหว่างชั้นของตะแกรง ; x_i - เศษส่วนของน้ำหนักหินน้ำมันที่ค้างบนตะแกรงแต่ละชั้น

ภาคผนวก ง.

ตัวอย่างการคำนวณ

ง.1 ความเร็วต่ำสุดของอากาศที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชันที่สภาวะของอากาศภายในหอทดลอง $T = 40^{\circ}\text{C}$. และ $P = 1$ บรรยากาศ

$$\rho_g = 0.001128 \quad \text{กรัม/ ซม.}^3$$

$$\mu = 0.00019 \quad \text{กรัม/ ซม. - วินาที}$$

$$g = 980 \quad \text{ ซม. / (วินาที)}^2$$

และจากตารางที่ 6.2

$$\bar{d}_p = 0.229 \quad \text{ ซม.}$$

$$\rho_s = 2.36 \quad \text{ กรัม/ ซม.}^3$$

แทนค่าลงในสมการ 3.10

$$U_{mf} = \frac{\mu}{\bar{d}_p \rho_g} \left\{ \left[\frac{(33.7)^2 + 0.0408 \bar{d}_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \right]^{1/2} - 33.7 \right\}$$

$$\text{จะได้ } U_{mf} = 115.8 \quad \text{ ซม. / วินาที}$$

ง.2 ความเร็วของอากาศภายในเบดคิดที่อุณหภูมิก่อนเข้าเตาเผา

$$\begin{aligned} U_o &= \frac{Q}{A_b} \\ &= \frac{(100)^3 Q}{3600} \cdot \frac{4}{\pi d_b^2} \\ &= \frac{1111.11 \cdot Q}{\pi d_b^2} \end{aligned}$$

จากตารางที่ 6.4 แทนค่า $Q = 65 \quad \text{ Nm}^3/\text{hr}$ และ $d_b = 15.0 \quad \text{ ซม.}$

$$U_o = \frac{1111.11 \times 65}{\pi (15)^2}$$

$$= 102 \quad \text{ ซม. / วินาที}$$

ง.3 ปริมาณ Excess air ⁽⁴⁾ (%)

$$EA = \frac{2.66 C}{2.66C+7.94H+0.998S-O} \cdot \frac{O_2}{CO_2 + \frac{1}{2}CO} \times 100$$

จากผลการวิเคราะห์อันติมะ (มาตรฐานแห้ง) ของหินน้ำมันขนาด 2.29 มม.

ในตารางที่ 6.2

$$C = 21.585 \%$$

$$H = 2.74 \%$$

$$N = 0.595 \%$$

$$S = 0.483 \%$$

$$O = 11.307 \%$$

$$A = 63.29 \%$$

เปลี่ยนให้ เป็นคุณสมบัติของหินน้ำมันอะเผาไหม้ ⁽⁴⁾ (As-burned) โดยคูณ

$$\text{ด้วย } (1-M) = (1-0.0165) = 0.9835$$

$$C = 21.229 \%$$

$$H = 2.695 \%$$

$$N = 0.585 \%$$

$$S = 0.475 \%$$

$$O = 11.12 \%$$

$$A = 62.245 \%$$

$$M = 1.65 \%$$

แทนค่าลงในสมการจะได้

$$EA = 0.84 \cdot \frac{O_2}{CO_2 + \frac{1}{2}CO} \times 100$$

จากข้อมูลการเผาไหม้ตารางที่ ข-7

$$CO_2 = 11.5 \%$$

$$O_2 = 7.0 \%$$

$$CO = \text{มีค่าต่ำมากไม่สามารถวัดได้โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ก๊าซ Orsat}$$

$$EA = 0.84 \times \frac{7}{11.5+0} \times 100$$

$$= 51.1 \%$$

ง.4 อัตราส่วนอากาศ/เชื้อเพลิงทางทฤษฎี ⁽⁴⁰⁾ $(A/F)_t$

แทนค่าคุณสมบัติของหินน้ำมันขณะเผาไหม้ จากข้อ ง.3 ลงในสมการ

$$(A/F)_t = \frac{2.66C + 7.94H + 0.998S - 0}{0.232}$$

จะได้

$$(A/F)_t = 2.89 \text{ Kg}_a/\text{Kg}_f$$

ง.5 อัตราส่วนอากาศ/เชื้อเพลิงจริง $(A/F)_a$

$$(A/F)_a = (A/F)_t \left[\frac{EA}{100} + 1 \right]$$

จากข้อมูลการคำนวณในข้อ ง.3 และ ง.4 แทนค่าในสมการจะได้

$$(A/F)_a = 2.89 \left[\frac{51.1}{100} + 1 \right]$$

$$= 4.36 \text{ Kg}_a/\text{Kg}_f$$

ง.6 ปริมาณเถ้าที่หลุดลอยจากเตาเผา (A_{loss})

$$A_{\text{loss}} = \left[1 - \frac{F_o}{F_i A} \right] \times 100$$

จากตารางที่ 6.4

$$Q = 65 \text{ Nm}^3/\text{hr}$$

$$F_o = 4.74 \text{ กก./ชม.}$$

$$F_i = 9.49 \text{ กก./ชม.}$$

$$A = 62.245 \%$$

$$A_{\text{loss}} = \left[1 - \frac{4.74}{9.49 \times 0.62245} \right] \times 100$$

$$= 19.7 \%$$

ง.7 ประสิทธิภาพการไหม้

เนื่องจากปริมาณไถ่ที่หลุดลอยแยกออกได้เป็นสองส่วนคือ ส่วนของ ไถ่ขนาดเล็กที่หลุดลอยไปกับก๊าซร้อน ซึ่งส่วนนี้เกิดจากการขัดสีระหว่าง เม็ดไถ่ หรือเม็ดหินน้ำมันขนาดเล็ก ๆ ที่ปะปนอยู่เนื่องจากหินน้ำมันมีกระจายขนาด และส่วนของ ไถ่ที่กระเด็นออกจากเตาเนื่องจากผลของการแตกตัวของฟองอากาศที่ผิวของเบด (Splashing) ดังนั้น การคำนวณหาประสิทธิภาพจำเป็นต้องตรวจสอบดูว่าค่าความเร็วตกอิสระ U_t มากกว่าหรือน้อยกว่าค่าความเร็ว U_o ช่วงเหนือเบดขณะเกิดการเผาไหม้ ซึ่งจากการพิจารณาค่าความเร็วดังกล่าว แสดงในตารางที่ ง-1 และ ง-2 ชี้ให้เห็นว่า หินน้ำมันขนาดเล็ก ๆ ที่ปะปนอยู่จะไม่หลุดลอยไปเนื่องจากความเร็ว U_t สูงกว่าความเร็ว U_o อย่างไรก็ตาม ไถ่ที่หลุดลอยออกจากเตาจากผลของการขัดสีมีแน่นอน แต่จะละทิ้งไม่นำมาพิจารณา ไถ่ที่หลุดลอยจากเตาเผาทั้งหมด จะสมมติให้มีคาร์บอน เหลืออยู่ในอัตราส่วน เดียวกันกับ ไถ่ที่ระบายออกจากท่อระบาย

จากข้อมูลในตารางที่ 6.4

$$Q = 65 \text{ Nm}^3/\text{hr}$$

$$\begin{aligned} U_{oc} &= \frac{1111.11Q}{\pi d_b^2} && (\text{ช่วงเหนือเบด } d_b = 20 \text{ ซม.}) \\ &= \frac{1111.11(65)}{\pi(20)^2} \\ &= 57 \text{ ซม./วินาที} \end{aligned}$$

หาความเร็วของก๊าซร้อนที่ไหลผ่านช่วงพรีบอร์ด ขณะเกิดการเผาไหม้ (U_o) โดยใช้สมมติดังนี้

1. ใช้สมการคงมวล (Conservation of Mass)
2. ไม่พิจารณาผลของสารระเหย และผลผลิตจากการเผาไหม้
3. สมมติอากาศเป็นก๊าซในทางอุดมคติ (Ideal gas)

จาก Conservation of Mass

$$(\rho U_o A_b)_c = (\rho U_o A_b)_h$$

$$U_{oh} = U_{oc} \cdot \frac{\rho_c}{\rho_h} \quad (A_b \text{ คงที่})$$

จาก Ideal gas

$$\frac{P}{\rho} = RT$$

จะได้ $\frac{\rho_c}{\rho_h} = \frac{T_h}{T_c}$

ฉะนั้น $U_{oh} = U_{oc} \frac{T_h}{T_c}$

$$T_h = \frac{T_7 + T_9}{2}$$

$$= \frac{832 + 628}{2}$$

$$= 730 \text{ } ^\circ\text{ซ.}$$

$$= 1003 \text{ } ^\circ\text{ค.}$$

$$T_c = 42 \text{ } ^\circ\text{ซ.} = 315 \text{ } ^\circ\text{ค.}$$

$$U_{oh} = \frac{57(1003)}{315}$$

$$= 182.5 \text{ ชม./วินาที}$$

ที่ $P = 1$ บรรยากาศ, $T_h = 1003 \text{ } ^\circ\text{ค.}$

$$\rho_g = 0.000352 \text{ กรัม/ซม.}^3$$

$$\mu = 0.000415 \text{ กรัม/ซม.-วินาที}$$

จากตารางที่ ค-1

$$\rho_s = 1.66 \text{ กรัม/ซม.}^3 \text{ (คิดความหนาแน่นของ เจ้า)}$$

$$d_{p,\min} = 0.045 \text{ ซม.}$$

ลองแทนค่าในสมการ 3.16 เพื่อหาค่า U_t ในช่วง $0.4 < Re_p < 500$

$$U_t = \left[\frac{4}{225} \cdot \frac{(\rho_s - \rho_g)^2 g^2}{\mu \rho_g} \right]^{\frac{1}{3}} d_p$$

$$U_t = \left[\frac{4}{225} \cdot \frac{(1.66 - 0.000352)^2 (980)^2}{(0.000415)(0.000352)} \right]^{\frac{1}{3}} (0.045)$$

$$= 308.4 \quad \text{ชม./วินาที}$$

ตรวจสอบค่า Re_p

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

$$= \frac{0.000352 \times 0.045 \times 308.4}{0.000415}$$

$$= 11.77 \quad (\text{เพราะฉะนั้นสมการที่ 3.16 ใช้ได้})$$

จากตารางที่ 6.4 และจากค่าคุณสมบัติของหินในหัวข้อ ง.3

$$F_i = 9.49 \quad \text{กก./ชม.}$$

$$C = 21.229 \quad \%$$

$$F_{ot} = 9.49 \times 0.62245 = 5.91 \quad \text{กก./ชม.}$$

$$C_o = 0.57 \quad \%$$

$$\eta_c^{(41)} = \left[1 - \frac{F_{ot} C_o}{F_i C} \right] \times 100$$

$$= \left[1 - \frac{5.91(0.57)}{9.49(21.229)} \right] \times 100$$

$$= 98.33 \quad \%$$

ตารางที่ ง-1 แสดงผลการคำนวณหาค่าความเร็ว U_t สำหรับหินน้ำมันขนาดเล็กที่สุดของหินน้ำมันขนาด $\bar{d}_p = 2.29$ มม.

Q (Nm ³ /hr)	U _{oc} (cm/s)	U _{oh} (cm/s)	T _h		μ (gm/cm.sec)	ρ _h (gm/cm ³)	U _t (cm/s)	Re _p
			(°C)	(°K)				
65	57	182.5	730.0	1003.0	0.000415	0.000352	308.40	11.77
70	62	192.9	707.0	980.0	0.000410	0.000360	307.35	12.14
75	66	201.8	690.5	963.5	0.000407	0.000366	306.41	12.39
80	71	210.0	659.0	932.0	0.000398	0.000379	305.13	13.73
85	75	211.0	610.5	883.5	0.000385	0.000398	303.54	14.12

Q - อัตราการไหลของอากาศ ; U_{oc} - ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่าน เคา เผาคิดที่อุณหภูมิของอากาศก่อน เข้า เคา เผา

U_{oh} - ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่าน เคา เผาคิดที่อุณหภูมิของอากาศขณะเกิดการ เผาไหม้ ; T_h - อุณหภูมิเฉลี่ยของก๊าซร้อนในช่วงพรีบอร์ด

μ - ค่าความหนืดของอากาศ ; ρ_h - ความหนาแน่นของอากาศที่อุณหภูมิ T_h ; U_t - ค่าความเร็ว เริ่มหลุดลอยของอนุภาค

ตารางที่ ง-2 แสดงผลการคำนวณหาค่าความเร็ว U_t สำหรับหินน้ำมันขนาดเล็กที่สุดของหินน้ำมันขนาด $\bar{d}_p = 1.15$ มม.

Q (Nm ³ /hr)	U_{oc} (cm/s)	U_{oh} (cm/s)	T_5		μ (gm/cm.sec)	ρ_h (gm/cm ³)	U_t (cm/s)	Re_p
			(°C)	(°K)				
30	27	76.8	606.0	879.0	0.000384	0.000402	151.39	3.56
35	31	92.0	650.0	923.0	0.000396	0.000382	152.49	3.31
40	35	105.6	671.5	944.5	0.000402	0.000374	152.73	3.19
45	40	120.9	676.5	949.5	0.000404	0.000372	152.75	3.16
50	44	132.8	678.0	951.0	0.000405	0.000371	152.76	3.15
55	49	146.8	677.0	950.0	0.000404	0.000372	152.75	3.16

Q - อัตราการไหลของอากาศ; U_{oc} - ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านเตาเผาคิดที่อุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าเตาเผา

U_{oh} - ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านเตาเผาคิดที่อุณหภูมิของอากาศขณะเกิดการเผาไหม้; T_h - อุณหภูมิเฉลี่ยของก๊าซร้อนในช่วงพรีเบิร์ด

μ - ค่าความหนืดของอากาศ; ρ_h - ความหนาแน่นของอากาศที่อุณหภูมิ T_h ; U_t - ค่าความเร็วเริ่มหลุดลอยของอนุภาค

ภาคผนวก จ.

ผลของอุณหภูมิที่มีต่อความเร็วของอากาศที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์เบด

พิจารณา Drag Force ที่กระทำบนเม็ดของแข็ง

Total drag บนเม็ดของแข็งหนึ่งเม็ดเป็นผลรวมของ Friction Drag และ Pressure Drag (42)

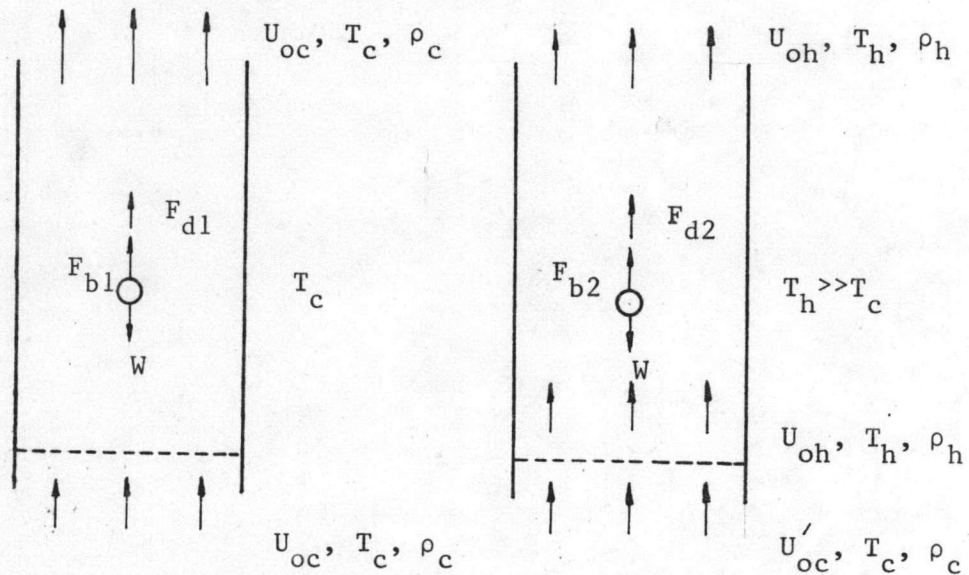
$$F_d = F_f + F_p \dots\dots\dots \text{จ.1}$$

แต่นิยมแสดงอยู่ในรูปของสมการ

$$F_d = \frac{C_d \rho U_o^2 A_p}{2} \dots\dots\dots \text{จ.2}$$

C_d เป็นค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายที่ Re_p สูง ๆ ค่า C_d จะคงที่

พิจารณาเม็ดของแข็งในภาวะสมดุล (สมมติให้เม็ดของแข็งมีลักษณะกลม)



รูปที่ จ-1 แสดงเม็ดของแข็งที่อยู่ในสมดุลของแรงภายในท่อทดลองที่มีอากาศไหลผ่านที่อุณหภูมิคงที่ และมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

- สมมติ
1. F_{b1} และ F_{b2} มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก ดังนั้นจะไม่นำมาพิจารณา
 2. น้ำหนักของเม็คของแข็งคงที่ = W
 3. ความดันคงที่ = P
 4. พื้นที่หน้าตัดของท่อทดลองคงที่ = A_b
 5. ความเร็ว $U_{oc} = U'_{oc}$

$$F_{d1} = \frac{C_{dc} \rho_c U_{oc}^2 A_p}{2} \dots\dots\dots \text{จ.3}$$

$$F_{d2} = \frac{C_{dh} \rho_h U_{oh}^2 A_p}{2} \dots\dots\dots \text{จ.4}$$

จากสมการคงมวล (Conservation of Mass)

$$\rho_c A_b U'_{oc} = \rho_h A_b U_{oh}$$

$$\frac{\rho_c}{\rho_h} = \frac{U_{oh}}{U_{oc}} \dots\dots\dots (U'_{oc} = U_{oc})$$

สมมติอากาศเป็นก๊าซทางอุดมคติ : $\frac{P}{\rho} = RT$

$$\frac{\rho_c}{\rho_h} = \frac{T_h}{T_c} = \frac{U_{oh}}{U_{oc}}$$

$$\rho_h = \left[\frac{T_h}{T_c} \right]^{-1} \rho_c \dots\dots\dots \text{จ.5}$$

$$U_{oh} = \left[\frac{T_h}{T_c} \right] U_{oc} \dots\dots\dots \text{จ.6}$$

แทนค่าสมการ จ.5 และ จ.6 ลงในสมการ จ.4

$$F_{d2} = C_d \left[\frac{T_h}{T_c} \right]^{-1} \rho_c \left[\frac{T_h}{T_c} \right]^2 \frac{U_{oc}^2}{2} A_p$$

$$F_{d2} = \left(\frac{T_h}{T_c} \right) C_{d\rho_c} \frac{U_{oc}^2}{2} A_p \quad \dots\dots\dots \text{จ.7}$$

เพราะฉะนั้น $\frac{F_{d2}}{F_{d1}} = \frac{T_h}{T_c}$

จะเห็นว่าผลของความเร็วจนเพิ่มขึ้นจากการขยายตัวของอากาศมีมากกว่าผลของความหนาแน่นของอากาศที่ลดลง ลองแทนค่า

$$T_h = (273 + 750) = 1023 \text{ }^{\circ}\text{ค.}$$

$$T_c = (273 + 40) = 313 \text{ }^{\circ}\text{ค.}$$

$$\frac{F_{d2}}{F_{d1}} = \frac{1023}{313} = 3.26$$

ถ้าต้องการให้ $F_{d2} = F_{d1}$ อาจลดความเร็วของอากาศ U'_{oc} ซึ่งทำได้โดยจัดสมการ จ.3 ให้เท่ากับสมการ จ.4

$$\frac{C_{d\rho_h} U_{oh}^2 A_p}{2} = \frac{C_{d\rho_c} U_{oc}^2 A_p}{2}$$

$$U_{oh}^2 = \left(\frac{\rho_c}{\rho_h} \right) U_{oc}^2$$

$$U_{oh} = \left(\frac{\rho_c}{\rho_h} \right)^{1/2} U_{oc}$$



เปลี่ยนค่า U_{oh} ให้เป็นค่าความเร็วของอากาศที่ T_c โดยใช้สมการคงมวล
จะได้

$$U'_{oc} = U_{oc} \left(\frac{\rho_c}{\rho_h} \right)^{-1/2}$$

$$= U_{oc} \left(\frac{T_h}{T_c} \right)^{-1/2}$$

อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ต่าง ๆ นี้ได้จากการพิจารณาเม็ดหินน้ำมันเพียงเม็ดเดียวเท่านั้น และอาศัยการสมมติต่าง ๆ ดังนั้นการหาความสัมพันธ์ดังที่ได้แสดงมา จึงเป็นเพียงแนวความคิดพื้นฐาน เพื่ออธิบายปัญหาการเกิดสภาพฟลูอิดซ์เบค แม้ว่าค่าความเร็ว U_0 จะต่ำกว่าค่าความเร็ว U_{mf} ในขณะที่เกิดการเผาไหม้

ประวัติ

นายชยันต์ นาคสวัสดิ์ สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรม
เครื่องกล จากมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ เมื่อปี พ.ศ. 2522 ปัจจุบันทำงาน อยู่ที่การ-
ไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ฝ่ายวิทยาการพลังงาน กองพลังงานพิเศษ ตำแหน่งวิศว
กรอันดับหนึ่ง

