

บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

3.1 กากตะกอน (Sludge) [3]

3.1.1 แหล่งที่มา

กากตะกอนโดยทั่วไปแล้วมาจากระบบบำบัดน้ำเสียจากชุมชนและโรงงานอุตสาหกรรมขนาดต่างๆซึ่งกากตะกอนที่มาจากโรงบำบัดน้ำเสียมียหลายจุด ซึ่งแต่ละจุดมีปริมาณและลักษณะที่ต่างกัันออกไปซึ่งรายละเอียดดังกล่าวแสดงให้เห็นในตารางที่ 3.1.1

ตารางที่ 3.1.1 ชนิดและแหล่งที่มาของกากตะกอน

ชนิดของกากตะกอน	แหล่งที่มา
1.ขยะจากตะแกรงดักขยะ	มาจากตะแกรงดักขยะที่ปะปนมากับน้ำเสีย มีกลิ่นเหม็นมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณสารอินทรีย์ที่มีในขยะมีขนาดไม่แน่นอน
2.กรวดทราย	มาจากถังดักกรวดทรายที่ปะปนมากับน้ำเสีย มีกลิ่นเหม็น มักจะมีพวกไขมันเกาะติดรอบๆกรวดทราย
3.ฝ้าไข	มาจากถังตกตะกอนทั้งแบบชั้นต้นและชั้นที่สอง โดยจะลอยอยู่ในบริเวณผิวน้ำในถังตกตะกอนแล้วทำการกวาดรวบรวมออกจากถังตกตะกอน ค่าความถ่วงจำเพาะของฝ้าไขประมาณ 0.95 จะมีกลิ่นเหม็นเนื่องจากฝ้าไขมีพวกเศษอาหาร ไขมัน เศษผัก ฯลฯ
4.กากตะกอนจากถังตกตะกอนแรก	กากตะกอนจากถังตกตะกอนแรกมีสีเทาดำคล้ายโคลน มีกลิ่นเหม็นมากเป็นกากตะกอนที่เกิดขึ้นจากการรวบรวมตะกอนในน้ำเสีย
5.กากตะกอนจากระบบตกตะกอนผลึกทางเคมี	กากตะกอนจากระบบการผลึกน้ำเสียทางเคมีเกิดขึ้นเนื่องจากมีสารเคมีตกตะกอนในน้ำเสียมีกลิ่นเหม็น มีลักษณะคล้ายโคลน
6.กากตะกอนจากระบบ เอ เอส (Activated Sludge)	กากตะกอนจากระบบ เอ เอส มีสีน้ำตาลเข้ม ถ้ากากตะกอนอยู่ในสภาพที่มีอากาศจะไม่มีการเหม็น แต่ถ้าขาดอากาศในระยะเวลาไม่นานนัก จะเกิดสภาพ Anaerobic ทำให้มีกลิ่นเหม็นมาก กากตะกอนที่ออกจากระบบนี้อาจถูกถ่ายออกจากถังเติมอากาศหรือออกจากถังตกตะกอนที่สอง
7.กากตะกอนจากระบบโปรยกรอง (Trickling Filter)	กากตะกอนชนิดนี้มีสีน้ำตาลเข้มค่อนข้างหนืดกว่าของระบบ เอ เอส สำหรับกากตะกอนใหม่จะไม่มีกลิ่นเหม็น กากตะกอนประเภทนี้จะถูกย่อยสลายได้ช้ากว่ากากตะกอนประเภทอื่นๆโดยเฉพาะจากจากระบบ เอ เอส
8.กากตะกอนย่อยแล้วแบบใช้อากาศ	กากตะกอนชนิดนี้มีสีน้ำตาลค่อนข้างเข้ม มักจะไม่มีการเหม็น กากตะกอนชนิดนี้สามารถถูกนำน้ำออกจากกากตะกอนได้ง่าย
9.กากตะกอนย่อยแล้วแบบไม่ใช้อากาศ	กากตะกอนชนิดนี้มีสีน้ำตาลเข้มมากถึงสีดำ จะไม่มีการเหม็นถ้าระบบการย่อยกากตะกอนสามารถกระทำได้ดีถึงแม้จะมีก๊าซอยู่ในกากตะกอนค่อนข้างมากโดยทั่วไปมักจะมีกลิ่นเหม็นบ้าง แต่ไม่รุนแรงถ้าระบบการย่อยอยู่ในระดับพอใช้ดังนั้นเมื่อนำกากตะกอนชนิดนี้ผ่านระบบนำน้ำออกบริเวณนั้นจะมีกลิ่นเหม็นบ้างแต่ไม่รุนแรง
10. กากตะกอนถูกหมักเป็นปุ๋ย	กากตะกอนชนิดนี้มีสีค่อนข้างน้ำตาลเข้มไปถึงสีดำ ถ้ากระบวนการหมักเป็นปุ๋ยเป็นไปอย่างถูกต้องจะไม่มีการเหม็นจะนิยมนำปุ๋ยนี้ไปใช้เป็นปุ๋ยหรือตัวปรับสภาพดิน
11. กากตะกอนจากบ่อกรอง	กากตะกอนจากบ่อกรองมีสีดำ จะมีการเหม็นค่อนข้างมาก ถ้านำไปตากแดดโดยตรงในช่วงแรก

3.1.2 ลักษณะของกากตะกอน

โดยทั่วไปลักษณะของกากตะกอนสามารถแยกออกได้เป็น 2 ลักษณะดังนี้

3.1.2.1 ลักษณะของกากตะกอนทางกายภาพ รายละเอียดแสดงไว้ในตารางที่ 3.1.2

3.1.2.2 ลักษณะของกากตะกอนทางเคมี รายละเอียดแสดงไว้ในตารางที่ 3.1.3

ซึ่งความเข้มข้นของกากตะกอนที่เกิดจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียในแต่ละขั้นตอนจะมีค่าที่แตกต่างกันออกไป โดยรายละเอียดแสดงไว้ในตารางที่ 3.1.4

ตารางที่ 3.1.2 ลักษณะของกากตะกอนทางกายภาพ

กากตะกอนจากกระบวนการกำจัดน้ำเสียต่างๆ	ความต้งจำเพาะ ของ ของแข็งกากตะกอน	ความต้งจำเพาะ ของกากตะกอน	ของแข็งแห้ง (กก./ลบ.ม)
1.ถังตกตะกอนแรก	1.4	1.02	0.10-0.17
2.ระบบ เอ เอ ส	1.25	1.005	0.07-0.10
3.ระบบไปรยกรอง	1.45	1.025	0.06-0.10
4.ระบบเติมอากาศแบบย่นเวลา	1.3	1.015	0.08-0.12
5.สระเติมอากาศ	1.3	1.01	0.08-0.12
6.ระบบกรองทราย	1.2	1.005	0.01-0.02
7.ระบบแยกสาหร่าย	1.2	1.005	0.01-0.02
8.ระบบทางเคมีใช้ปูนขาว 350-500 มก./ล.	1.9	1.004	0.24-0.40
9.ระบบทางเคมีใช้ปูนขาว 800-1600 มก./ล.	2.2	1.05	0.60-1.33

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.1.3 ลักษณะของกากตะกอนทางเคมี

ลักษณะทางเคมี	กากตะกอนขั้นต้น	กากตะกอนขั้นต้นย่อยแล้ว	ระบบ เอ เอส
	(%ของแข็งทั้งหมด)	(%ของแข็งทั้งหมด)	(%ของแข็งทั้งหมด)
1. ของแข็งทั้งหมด (TS),มก./ล	20,000-80,000	60,000-120,000	8,300-11,600
2. ของแข็งระเหยง่าย (VS)	60-80	30-60	59-88
3. ไขมันและไข	6-5	5-20	5-12
4. โปรตีน	20-30	15-20	32-41
5. ไนโตรเจน	1.5-4	1.6-6	2.4-5.0
6. ฟอสฟอรัส	0.8-2.8	1.5-4	2.8-11
7. Potash (K ₂ O)	0-1	0-3	0.5-0.7
8. Silica (SiO ₂)	15-20	10-20	-
9. pH	5-8	6.5-7.5	6.5-8
10. สภาพต่าง,มก./ล CaCO ₃	500-1,500	2,500-3,500	580-1,100
11. กรดอินทรีย์,มก./ล Hac	200-2,000	100-600	1,100-1,700

ตารางที่ 3.1.4 ค่าความเข้มข้นของกากตะกอน

กระบวนการบำบัดน้ำเสียต่างๆ	ความเข้มข้นของกากตะกอน (% ของแข็ง)
1. จากถังตกตะกอน	
กากตะกอน ขั้นต้น	4-10
กากตะกอน ขั้นต้นผสมกับกากตะกอนทั้งจากระบบ เอ เอส	3-8
กากตะกอน ขั้นต้นผสมกับระบบโปรยกรอง	4-10
กากตะกอน ขั้นต้น(เมื่อมีการใช้เหล็กเพื่อกำจัดฟอสฟอรัส)	0.5-3
กากตะกอน ขั้นต้น (เมื่อมีการใช้ปูนขาว 350-500 มก./ล)	2-8
กากตะกอน ขั้นต้น (เมื่อมีการใช้ปูนขาว 800-1600 มก./ล)	4-16
ฝ้าไข	3-10
2. จากถังตกตะกอนที่ 2	
กากตะกอน เอ เอส (เมื่อมีถังตกตะกอนแรก)	0.5-1.5
กากตะกอน เอ เอส (เมื่อไม่มีถังตกตะกอนแรก)	0.8-2.5
กากตะกอน จากระบบโปรยกรอง	1-3
กากตะกอน จากระบบแผ่นหมุนชีวภาพ	1-3
3. จากถังน้ำขึ้นแรงโน้มถ่วง	
กากตะกอน ขั้นต้น	5-10
กากตะกอน ขั้นต้นผสมกับกากตะกอนทั้งจากระบบ เอ เอส	2-8
กากตะกอน ขั้นต้นผสมกับกากตะกอนทั้งจากระบบโปรยกรอง	4-9
4. จากถังทำชั้นแบบอาศัยลอยตัวด้วยอากาศละลาย	
กากตะกอน เอ เอส (เมื่อใช้สารเคมีในถังนี้)	4-6
กากตะกอน เอ เอส (เมื่อไม่ใช้สารเคมีในถังนี้)	3-5
5. จากถังทำชั้นแบบอาศัยแรงหมุนเหวี่ยง	
กากตะกอน เอ เอส	4-8
6. จากถังทำชั้นแบบอาศัยสายพานรีดน้ำ	
กากตะกอน เอ เอส (เมื่อมีการใช้สารเคมีในถังนี้)	3-6

กระบวนการบำบัดน้ำเสียต่างๆ	ความเข้มข้นของกากตะกอน (% ของแข็ง)
7. จากถังย่อยแบบไร้อากาศ	
กากตะกอน ชั้นต้น	5-10
กากตะกอน ชั้นต้นผสมกับกากตะกอนทิ้งจากระบบ เอ เอส	2.5-7
กากตะกอน ชั้นต้นผสมกับระบบไปรยกรอง	3-8
8. จากถังย่อยแบบใช้ออกซิเจน	
กากตะกอน ชั้นต้น	2.5-7
กากตะกอน ชั้นต้นผสมกับกากตะกอนทิ้งจากระบบ เอ เอส	1.5-4
กากตะกอน ทิ้งจากระบบ เอ เอส	0.8-2.5

3.1.3 ปริมาณกากตะกอน

ในการคำนวณหาปริมาณกากตะกอนทั้งในรูปของน้ำหนักและปริมาตรของกากตะกอนเป็นสิ่งสำคัญยิ่งในการควบคุมระบบบำบัดและกำจัดกากตะกอน เมื่อพิจารณาปริมาณกากตะกอนจำเป็นต้องทราบค่าความเข้มข้นของกากตะกอนว่าเป็นของแข็งร้อยละเท่าไรของกากตะกอนและมีความถ่วงจำเพาะของของแข็งเท่าไร โดยความสัมพันธ์ของค่าต่างๆเหล่านี้สามารถเขียนได้เป็นสมการดังนี้

$$\frac{M_s}{S_s \rho} = \frac{M_f}{S_f \rho} + \frac{M_v}{S_v \rho} \quad (3.1.1)$$

โดยที่

- M_s = มวลของของแข็งทั้งหมด (Total Solids), กก.
- M_f = มวลของของแข็งคงตัว (Fixed Solids), กก.
- M_v = มวลของของแข็งระเหยง่าย (Volatile Solids), กก.
- S_s = ความถ่วงจำเพาะของของแข็ง
- S_f = ความถ่วงจำเพาะของของแข็งคงตัว
- S_v = ความถ่วงจำเพาะของของแข็งระเหยง่าย
- ρ = ความหนาแน่นของน้ำ, กก./ลบ.ม

เมื่อต้องการคำนวณหาปริมาตรกากตะกอนสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$V_{sl} = \frac{M_s}{\rho S_{sl} P_s} \quad (3.1.2)$$

โดยที่ V_{sl} = ปริมาตรของกากตะกอน, ลบ.ม
 S_{sl} = ความถ่วงจำเพาะของกากตะกอน
 P_s = ปริมาณของของแข็งในกากตะกอน, ค่าต่อหนึ่งหน่วย

สำหรับการคำนวณหาปริมาตรของกากตะกอนสามารถคำนวณหาได้โดยวิธีประมาณด้วย ซึ่งต้องทราบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของกากตะกอน และความเข้มข้นของกากตะกอนซึ่ง ปริมาตรของกากตะกอนจะแปรผกผันกับความเข้มข้นของกากตะกอนดังนี้

$$V_{sl} \propto \frac{1}{P_s}$$

ดังนั้นสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง V_{sl} กับ P_s ได้ดังนี้

$$\frac{V_{sl1}}{V_{sl2}} = \frac{P_{s2}}{P_{s1}} \quad (3.1.3)$$

เมื่อต้องการคำนวณค่าความถ่วงจำเพาะของกากตะกอนสามารถคำนวณทำได้ดังนี้

$$S_{sl} = \frac{S_s}{(P_s + (S_s)(P_w))} \quad (3.1.4)$$

โดยที่ S_{sl} = ความถ่วงจำเพาะของกากตะกอน
 P_w = ปริมาณน้ำในกากตะกอน, ค่าต่อหนึ่งหน่วย

3.1.4 กระบวนการกำจัดกากตะกอน

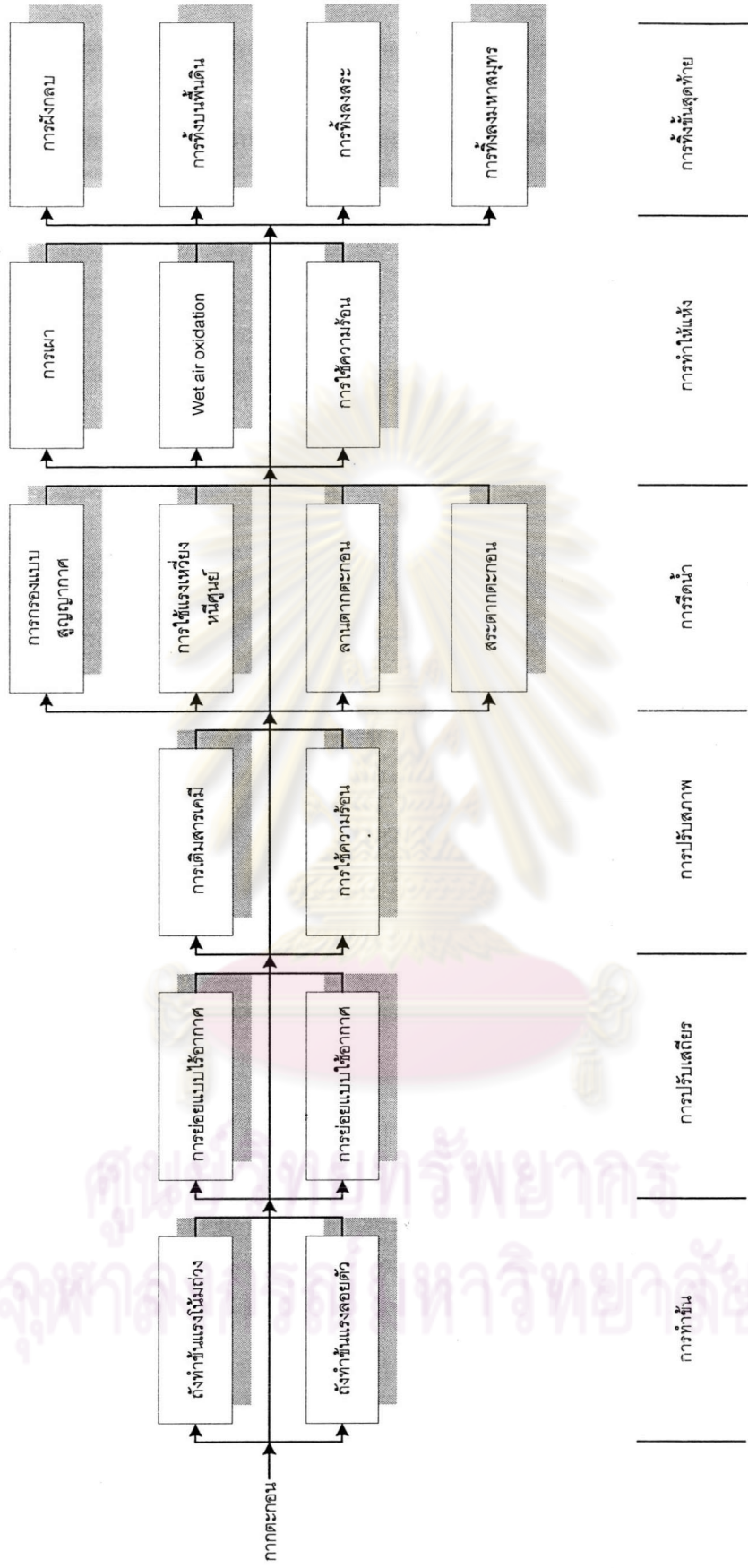
ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียทั่วไปจะมีปริมาณกากตะกอนเกิดขึ้นจากสารตะกอนแขวนลอยที่มากับน้ำเสียจากตะกอนจุลชีพที่ถ่ายออกจากระบบบำบัดทางชีวภาพและจากตะกอนเคมีที่ถ่ายทิ้งออกจากระบบบำบัดทางเคมี ในการเลือกระบบกำจัดกากตะกอนให้เหมาะสมจำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยต่างๆ ดังนี้คือ

1. ลักษณะของกากตะกอน
2. ความเหมาะสมของระบบกำจัดกากตะกอนกับสภาพพื้นที่
3. ปริมาณกากตะกอนที่เกิดขึ้น
4. ทางเลือกของการนำกากตะกอนไปทิ้ง

รูปที่ 3.1.1 แสดงให้เห็นถึงกระบวนการกำจัดพร้อมทั้งแสดงหน้าที่หลักของแต่ละระบบในการเลือกระบบกำจัดกากตะกอนให้เหมาะสม และตารางที่ 3.1.5 แสดงถึงลักษณะทั่วไปของกากตะกอนที่เกิดจากระบบบำบัดน้ำเสียต่าง



ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.1.1 กระบวนการกำจัดกากตะกอนและน้ำที่ลักษณะแต่ละระบบ

ตารางที่ 3.1.5 กากตะกอนที่เกิดขึ้นจากระบบบำบัดน้ำเสียต่างๆ

ระบบบำบัดน้ำเสียหรือประเภทของกากตะกอน	ลักษณะและปริมาณของกากตะกอนที่เกิดขึ้น
1. ตะแกรงดักขยะ	เศษขยะขนาดใหญ่ มักมีกลิ่นเหม็นมีปริมาณขยะประมาณ 20 ลิตรต่อ 1000 ลบ.ม. น้ำเสีย
2. ตั้งกำจัดตะกอนหนัก	มักจะเป็นตะกอนหนักพวกกรวดทราย อาจมีเศษกระดูก เศษสิ่งของหนักต่างๆ จะมีกลิ่นเหม็นบ้างมีปริมาณตะกอนหนักประมาณ 30 ลิตรต่อ 1000 ลบ.ม. น้ำเสีย
3. กากตะกอนจากถังตกตะกอน	กากตะกอนเป็นลักษณะตะกอนสีค่อนข้างดำ มีกลิ่นเหม็น มีปริมาณของแข็งประมาณ 3-4.5% TS มีปริมาณตะกอนประมาณ 150-250 กก.ต่อ 1000 ลบ.ม. น้ำเสีย
4. ฝาตะกอนจากถังตกตะกอนแรก	ตะกอนค่อนข้างเบา มักจะเป็นพวกน้ำมัน โขมน มีกลิ่นบ้าง มีปริมาณตะกอนประมาณ 8 กก.ต่อ 1000 ลบ.ม. น้ำเสีย
5. ระบบ เอ เอส (Activated Sludge)	กากตะกอนที่เมื่ออยู่ในถังเติมอากาศมักจะมีสีน้ำตาลเข้ม และเมื่ออยู่บริเวณกันถังตกตะกอนตะกอนมักจะมีสีค่อนข้างดำ โดยปกติจะไม่มีปัญหาเกี่ยวกับกลิ่น มีปริมาณของแข็งประมาณ 0.3-1.0% TS มีปริมาณตะกอนประมาณ 50-90 กก.ต่อ 1000 ลบ.ม. น้ำเสีย
6. ระบบโปรยกรอง (Trickling Filter Sludge)	กากตะกอนที่มีลักษณะเป็นเมือกสีเทาเข้ม ไม่มีปัญหากลิ่นมากนัก มีปริมาณของแข็งประมาณ 3% TS มีปริมาณตะกอนประมาณ 40-60 กก.ต่อ 1000 ลบ.ม. น้ำเสีย
7. กากตะกอนเคมีของพวกโลหะไฮดรอกไซด์	กากตะกอนที่มีลักษณะมีตะกอนจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน จะมีสีเข้มของสารโลหะที่เติมลงไป จะไม่มีปัญหาเกี่ยวกับกลิ่นเหม็น มีปริมาณของแข็งประมาณ 3-4% TS มีปริมาณตะกอนประมาณ 80-300 กก.ต่อ 1000 ลบ.ม. น้ำเสีย
8. กากตะกอนเคมี-ชีวภาพของระบบ เอ เอส	กากตะกอนที่มีลักษณะเป็นตะกอนสีค่อนข้างเข้มไปทางสีของพวกสารเคมีที่เติมผสมลงไป มีปริมาณของแข็งประมาณ 0.8% TS มีปริมาณตะกอนประมาณ 100-150 กก.ต่อ 1000 ลบ.ม. น้ำเสีย
9. กากตะกอนเคมี-ชีวภาพของระบบโปรยกรอง	กากตะกอนที่มีลักษณะเป็นตะกอนสีค่อนข้างเข้มไปทางสีของพวกสารเคมีที่เติมผสมลงไป มีปริมาณของแข็งประมาณ 2% TS มีปริมาณตะกอนประมาณ 50-80 กก.ต่อ 1000 ลบ.ม. น้ำเสีย
10. กากตะกอนปูนขาว	กากตะกอนที่มีลักษณะเป็นตะกอนสีค่อนข้างขาว มีปริมาณของแข็งประมาณ 2-5% TS มีปริมาณตะกอนประมาณ 500-600 กก.ต่อ 1000 ลบ.ม. น้ำเสีย
11. กากตะกอนปูนขาว-ชีวภาพ	กากตะกอนที่มาจากระบบ เอ เอส มีปริมาณของแข็งประมาณ 1% TS มีปริมาณของประมาณ 200-300 กก.ต่อ 1000 ลบ.ม. น้ำเสีย สำหรับกากตะกอนที่มาจากระบบโปรยกรองจะมีปริมาณของแข็งประมาณ 3% TS มีปริมาณตะกอนประมาณ 150-200 กก.ต่อ 1000 ลบ.ม. น้ำเสีย

3.1.5 การทำกากตะกอนให้มีลักษณะเดียวกัน (Preliminary Operations)

ในการบำบัดและกำจัดกากตะกอนจำเป็นต้องเตรียมกากตะกอนที่มาจากหลายๆจุด ซึ่งมีลักษณะที่แตกต่างกันดังนั้นจำเป็นต้องมีระบบทำกากตะกอนให้มีลักษณะเดียวกันโดยมีระบบต่างๆ คือ

1. การบดกากตะกอน (Sludge Grinding) จากขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กลงเพื่อป้องกันการอุดตันในระบบสูบกากตะกอน
2. การนำกรวดทรายออกจากกากตะกอน (Sludge Degritting)
3. การกวนกากตะกอน (Sludge blending) เพื่อให้ได้กากตะกอนที่มีลักษณะเดียวกันซึ่งง่ายต่อการบำบัด
4. การเก็บกากตะกอน (Sludge Storage) เพื่อเตรียมตัวนำไปบำบัดต่อไป

3.1.6 การทำให้กากตะกอนมีความเข้มข้นขึ้น (Thickening)

การทำให้กากตะกอนมีความเข้มข้นขึ้น เป็นระบบที่ทำการแยกน้ำออกจากกากตะกอนให้ได้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ซึ่งเป็นระบบบำบัดขั้นที่ 2 จาก 1-2% Solid ให้เป็น 3-6% Solid เพื่อลดปริมาณกากตะกอนก่อนการบำบัดขั้นต่อไป วิธีที่นิยมใช้มีด้วยกันหลายวิธีเช่น

1. การทำชั้นด้วยแรงโน้มถ่วง (Gravity Thickening)
2. การทำชั้นด้วยการลอยตัว (Flotation)
3. การทำชั้นด้วยแรงศูนย์กลาง (Centrifugal Thickening)
4. การทำชั้นด้วยสายพานรัดน้ำ (Gravity Belt Thickening)
5. การทำชั้นด้วยถังทรงกระบอกหมุน (Rotary Drum thickening)

โดยในทุกวิธีนิยมเติมสารสร้างตะกอน (Coagulant) เช่น โพลีเมอร์ (Polymer) หรือสารส้มลงไปด้วย

3.1.7 การปรับเสถียรกากตะกอน (Sludge Stabilization)

กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียทั่วไป มักจะเป็นกากตะกอนชีวภาพดังนั้นจะมีกลิ่นเหม็นถ้าอยู่ในสภาพของอากาศ ดังนั้นจึงต้องทำการปรับเสถียรเพื่อวัตถุประสงค์ต่างๆ ดังนี้

- เพื่อลดกลิ่นเหม็น
- เพื่อลดจำนวนเชื้อโรคลง
- เพื่อลดแนวโน้มที่จะทำให้กากตะกอนเน่า

ซึ่งมีวิธีการในการปรับเสถียรกากตะกอนดังนี้

1. การย่อยสลายแบบไร้อากาศ (Anaerobic Digestion) เป็นการหมักกากตะกอนไว้ในถังไร้อากาศที่มีอุณหภูมิสูง เพื่อให้จุลินทรีย์ทำปฏิกิริยา เปลี่ยนสารอินทรีย์ที่ไม่คงที่ เป็นก๊าซมีเทนซึ่งอาจนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ โดยใช้เวลาในการหมักประมาณ 15 วัน
2. การย่อยสลายแบบใช้อากาศ (Aerobic Digestion) มีลักษณะการทำงานเหมือนระบบเอเอสเพื่อทำลายสารอินทรีย์ที่ไม่คงที่ระเหยง่าย (Volatile) ซึ่งอาจทำให้เกิดกลิ่นเหม็น โดยใช้เวลาในการหมักประมาณ 15 วัน เช่นกัน
3. การปรับเสถียรด้วยปูนขาว (Line Stabilization) ทำได้โดยการเติมปูนขาวลงไป เพื่อยกค่า pH ให้สูงขึ้น ≥ 12 หรืออาจใช้ซีเมนต์แทนปูนขาวได้ในบางกรณี โดยเติมปูนขาวลงไปประมาณ 200-400 กรัมต่อกรัมของกากตะกอน
4. การบำบัดร้อน (Heat Treatment) ทำได้โดยใช้ความร้อนสูงถึง 260°C และมีความดันสูงถึง 2,760 กิโลนิวตัน/ตร.ม ในระยะเวลาเพียง 30 นาที
5. การเกิดการออกซิเดชันทางเคมี (Chemical Oxidation) โดยการใช้คลอรีนในปริมาณสูงๆ เพื่อช่วยกำจัดกลิ่นหรืออาจใช้ก๊าซโอโซนก็ได้ในกรณีที่กากตะกอนมีพวกสารโลหะหนักอยู่ซึ่งถ้าเติมคลอรีนลงไปจะทำให้เกิดกรดไฮโดรคลอริก HCl

3.1.8 การปรับสภาพกากตะกอน (Sludge Conditioning)

เป็นกระบวนการที่ช่วยให้น้ำออกจากกากตะกอนได้ง่ายขึ้น ซึ่งใช้วิธีทางกายภาพและทางเคมี ซึ่งวิธีที่นิยมใช้กันคือวิธีทางเคมี และวิธีใช้ความร้อน สำหรับวิธีทำให้เย็นจนแข็งและวิธีอบรังสีเป็นวิธีที่ยังไม่นิยมใช้กันซึ่งนอกเหนือจากก๊าซดังกล่าวยังมีวิธีที่ใช้การล้างด้วยน้ำเพื่อคัดสารเคมีออกไปเรียกว่า Elutriation

3.1.9 การฆ่าเชื้อโรคในกากตะกอน (Sludge Disinfecting)

การฆ่าเชื้อโรคในกากตะกอนเป็นวิธีที่ต้องการให้แน่ใจว่ากากตะกอนที่จะนำไปทิ้งหรือนำกลับมาใช้อีกจะไม่มีเชื้อโรคที่เป็นอันตรายต่อคนและสัตว์ที่สัมผัสวิธีฆ่าเชื้อโรคในกากตะกอนมีด้วยกันหลายวิธีคือ

1. วิธี Pasteurization ทำได้โดยการพ่นไอน้ำร้อนโดยตรงหรือใช้การถ่ายเทความร้อน
2. การเก็บกักไว้นาน โดยเก็บกากตะกอนไว้ในบ่อดินโดยปกติเก็บไว้นานถึง 60 วัน ที่อุณหภูมิ 20 °C

สำหรับวิธีอื่นๆ เช่น การอบแห้ง การเผา การเติมปูนขาว การใช้คลอรีน การใช้สารฆ่าเชื้อโรคและการอบรังสีจะเป็นวิธีการย่อยสลายกากตะกอน และปรับสภาพกากตะกอนควบคู่กันไป

3.1.10 การแยกน้ำออกจากกากตะกอน (Sludge Dewatering)

ในการแยกน้ำออกจากกากตะกอนเป็นระบบหลักของการกำจัดกากตะกอนเพราะก่อนที่จะนำกากตะกอนไปทิ้งหรือกำจัดนั้นต้องมีปริมาณน้อยและมีความชื้นน้อยที่สุดสาเหตุต่างๆที่จำเป็นต้องทำการแยกน้ำออกจากกากตะกอน มีดังนี้

1. เมื่อกากตะกอนมีน้ำลดน้อยลง ซึ่งจะมีปริมาตรของกากตะกอนน้อยลงด้วย ทำให้การขนส่งกากตะกอนเพื่อนำไปทิ้งจะน้อยลงด้วย ดังนั้นสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายในการขนส่งกากตะกอนในงานตักกวาดหรือเคลื่อนย้ายกากตะกอนที่มีน้ำน้อยจะดำเนินการได้ง่ายกว่ากากตะกอนที่มีน้ำมาก
2. กากตะกอนที่จะนำเข้าเตาเผาควรที่จะมีน้ำน้อยที่สุดในกากตะกอนทั้งนี้เพื่อลดการใช้พลังงานในการเผากากตะกอน
3. ก่อนที่จะนำกากตะกอนเข้าสู่ระบบหมักทำปุ๋ยควรที่จะเตรียมกากตะกอนให้มีลักษณะค่อนข้างแห้ง ซึ่งเหมาะสมกับการนำไปกองเพื่อทำการหมักทำปุ๋ยต่อไป
4. กากตะกอนที่มีน้ำน้อยจะมีกลิ่นเหม็นน้อยกว่ากากตะกอนที่มีลักษณะเปียก
5. กากตะกอนที่จะนำไปฝังกลบอย่างถูกหลักสุขาภิบาล ถ้าเป็นกากตะกอนที่ค่อนข้างแห้งอยู่แล้วจะเกิดปัญหาน้ำในกากตะกอนซึมลงใต้ดินให้น้อยลง

ในการนำน้ำออกจากกากตะกอนมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี แต่วิธีหลักคือวิธีปล่อยให้ น้ำระเหยออกพร้อมๆ กับปล่อยให้ น้ำในกากตะกอนซึมผ่านชั้นทรายลง และวิธีใช้เครื่องจักรกลทำให้น้ำออกจากกากตะกอนได้แก่ การกรอง การบีบคั้น การดูดน้ำแบบสุญญากาศ การหมุนเหวี่ยง เป็นต้น ในหลักการเลือกระบบใดนั้นต้องพิจารณาว่ากากตะกอนมีลักษณะใดและมีปริมาณมากน้อยเพียงใด พื้นที่ที่จะทำการแยกน้ำออกจากกากตะกอนมีมากน้อยขนาดไหน แต่ในภาพรวมเมื่อพิจารณา

เลือกระบบมักจะเลือกระบบที่มีค่าลงทุนต่ำ และต้องการการดำเนินงานควบคุมระบบที่ง่ายซึ่งระบบที่นิยมใช้กันมากนั้นคือ ลานตาก (Sludge Drying Bed) และ บ่อตาก (Lagoons)

3.1.11 การทำให้กากตะกอนแห้ง (Drying Sludge)

ระบบนี้ทำให้กากตะกอนที่ยังมีความชื้นอยู่ให้มีความชื้นเหลือน้อยที่สุดโดยอาจมีเหลือเพียง 5% วิธีทำให้กากตะกอน แห้งมีอยู่ด้วยกันหลายวิธีเช่น

1. การใช้ความร้อน (Heat Drying) ทำได้โดยการให้ความร้อนแก่กากตะกอนเพื่อทำให้กากตะกอนมีความชื้นน้อยที่สุดโดยปกติจะได้ค่าความชื้นในกากตะกอนเหลือน้อยกว่า 10%
2. เครื่องทำแห้งแบบฉับพลัน (Flash Dryers) ทำได้โดยการใช้ก๊าซร้อนที่ไหลอย่างปั่นป่วนไปสัมผัสกับกากตะกอนในระยะเวลาที่พอเพียงจะได้กากตะกอนที่มีความชื้นเหลือเพียง 8%
3. เครื่องทำแห้งแบบพ่น (Spray Dryers) เป็นระบบที่ใช้เครื่องหมุนเวียนความเร็วสูงจนทำให้กากตะกอนมีขนาดเล็กกลง และนำส่งกระจายไปเข้าห้องอบแห้งที่ใช้ก๊าซร้อน
4. เครื่องทำแห้งแบบหมุน (Rotary Dryers) เป็นระบบที่มีลักษณะเป็นถังใหญ่มากสำหรับการอบแห้งกากตะกอนด้วยอากาศร้อน หรืออีกแบบอาจใช้ไอน้ำร้อนอบแห้งรอบๆ โดยถังดังกล่าวนั้นจะหมุนรอบอย่างช้าๆ เพื่อการรบกวนกากตะกอนให้สัมผัสกับก๊าซร้อนอย่างทั่วถึง
5. เครื่องทำแห้งแบบเผา (Multiple Hearth Dryers) เป็นระบบที่ใช้การเผากากตะกอนซึ่งกากตะกอน ต้องได้ผ่านระบบแยกน้ำออกแล้ว
6. เครื่องทำแห้งแบบระเหยด้วยการใช้น้ำมัน (Multiple Effect Evaporators) ระบบนี้ใช้น้ำมันผสมกับกากตะกอนโดยอาศัยหลักการที่ว่าจุดเดือดของน้ำมีค่าต่ำกว่าของน้ำมัน ทำให้เมื่อน้ำได้ระเหยออกแล้วจะมีเพียงน้ำมันผสมกับกากตะกอนแห้งเหลืออยู่เท่านั้น ดังนั้นจึงต้องใช้วิธีแรงเหวี่ยงแยกน้ำมันออกจากกากตะกอนอีก 1 ครั้ง ระบบนี้จะใช้ไอน้ำร้อนทำการระเหยน้ำออกจากกากตะกอนที่แห้งอาจนำไปทิ้งหรือใช้เป็นเชื้อเพลิงได้

3.1.12 การทำปุ๋ยจากกากตะกอน (Composition)

กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียที่ไม่มีสารพิษหรือสารเคมีที่มีพิษอันตราย เช่น โลหะหนัก ยาปราบศัตรูพืช เป็นต้น อาจนำมาใช้ทำปุ๋ยได้โดยการหมักทำปุ๋ยใช้เวลาประมาณ 20 วัน อาจมีการผสมกับฟางข้าว เพื่อให้แห้งเร็วขึ้นจนถึง 15% Solid

3.1.13 การเผา

การเผากากตะกอนที่ค่อนข้างแห้งมาก ๆ ซึ่งผ่านการนำน้ำออกจากกากตะกอนและการทำให้กากตะกอนแห้งแล้วนั้นอาจนำมาเผาได้เลยโดยไม่ต้องผ่านกระบวนการย่อยสลายอินทรีย์เพื่อกำจัด กากตะกอน ก่อนนำไปทิ้ง

รายละเอียดทั่วไปของการเผานั้นกากตะกอนที่นำมาเผาอาจเป็นกากตะกอนที่ยังไม่ได้ถูกบำบัดแต่เป็นกากตะกอนที่ถูกรีดน้ำออกแล้ว โดยไม่จำเป็นต้องทำการย่อยสลายก่อนเข้าระบบนี้ ระบบนี้จะทำให้ปริมาณลดลงอย่างมากสามารถฆ่าเชื้อโรคและกำจัดสารพิษได้ค่อนข้างมากกว่าระบบอื่นและยังสามารถนำพลังงานที่ได้จากการเผากลับมาใช้ได้ แต่ระบบนี้จะสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูงและต้องมีผู้ควบคุมระบบได้เป็นอย่างดีโดยเฉพาะเกี่ยวข้องกับความปลอดภัย

วิธีการเผาไหม้

การเผาไหม้กากตะกอนแบบต่างๆ มีวิธีการปฏิบัติดังนี้

1. การเผาโดยไหม้ทั่วไป ระบบการเผาไหม้โดยทั่วไปนั้นนี้มีหลายวิธี ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้คือ คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และไนโตรเจนออกไซด์ โดยจำเป็นต้องใช้ความร้อน 4-5 MJ ในการระเหยน้ำ 1 กก. ออกจากกากตะกอนค่าร้อยละของคาร์บอน ออกซิเจน ไฮโดรเจน และไนโตรเจนสามารถวิเคราะห์ได้ในห้องปฏิบัติการ ซึ่งการวิเคราะห์นี้เรียกว่า Ultimate Analysis โดยในทางทฤษฎี ปริมาณอากาศที่ต้องการใช้ในระบบจะเท่ากับ 4.35 เท่าของปริมาณออกซิเจนที่ต้องการใช้ใน ระบบสำหรับสูตรคำนวณหาความร้อนที่ต้องการสำหรับการเผา กากตะกอน มีดังนี้

$$Q = \sum C_p W_s (T_2 - T_1) + W_w H_L \quad (3.1.5)$$

$$Q = a \left[\frac{100P_v}{100 - P_c} - b \right] \frac{(100 - P_c)}{100} \quad (3.1.6)$$

โดยที่ Q = ความร้อนที่ต้องการใช้ในการเผา

C_p = ความร้อนจำเพาะของแต่ละสารในแก๊สและในก๊าซ

W_s = น้ำหนักของแต่ละสาร

T_1, T_2 = อุณหภูมิแรกและอุณหภูมิสุดท้าย

W_w = น้ำหนักความชื้นใน กากตะกอน

H_L = ความร้อนแฝงของการระเหยต่อกิโลกรัม

a = ค่าสัมประสิทธิ์ (สำหรับกากตะกอนชนิดเอเอส และกากตะกอนชนิดอื่นๆเท่ากับ 107 และ 131 ตามลำดับ

P_v = ค่าร้อยละของ V_s ในกากตะกอน

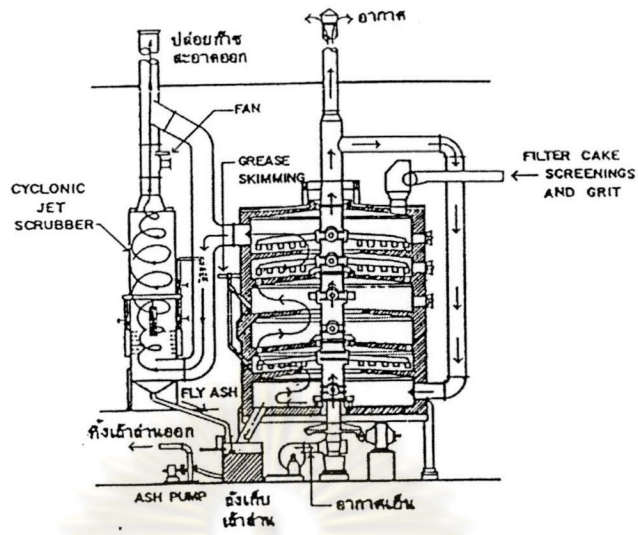
P_c = ค่าร้อยละของสารสร้างตะกอนที่เติมผสมกับกากตะกอน

เมื่อคำนวณหาค่าความร้อนที่ต้องการแล้วยังต้องพิจารณาถึงค่าความร้อนที่สูญเสียไปเนื่องจากสภาพแวดล้อมอื่นๆ เช่น ความร้อนที่สูญเสียผ่านกำแพงถัง เป็นต้น รายละเอียดชนิดของกากตะกอนและค่าความร้อนของกากตะกอนแสดงให้เห็นในตารางที่ 3.1.6

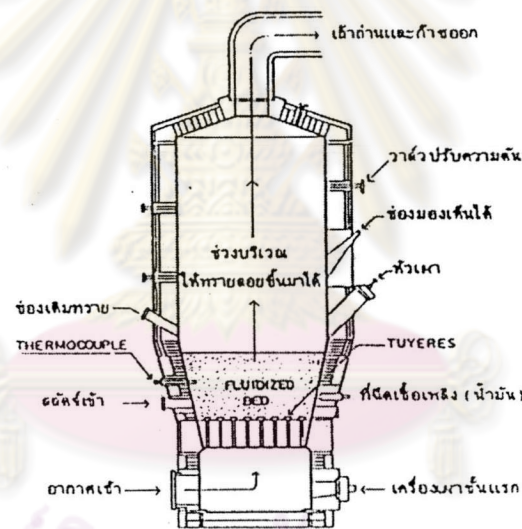
ตารางที่ 3.1.6 ชนิดและค่าความร้อนของกากตะกอน

ชนิดของกากตะกอน	ค่าความร้อนของกากตะกอน (กิโลจูล/กิโลกรัม ของ TS)
กากตะกอนขั้นต้น	25,600
กากตะกอน เอ เอส	21,000
กากตะกอนขั้นต้นที่ถูกย่อยสลายแบบไร้อากาศ	12,000
กากตะกอนขั้นต้นที่ได้ผสมกับสารเคมีเพื่อการตกผลึก	16,000
กากตะกอนชีวภาพตัวกลางกรอง	20,000

ซึ่งเชื้อเพลิงที่นิยมใช้กันมากในระบบการเผาไหม้ทั่วไปได้แก่ น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ ก๊าซที่ได้จากตัวย่อยกากตะกอน มีเทน (CH_4) ซึ่งระบบการเผาไหม้ที่นิยมใช้ได้แก่ Multiple Hearth Incineration และระบบเผาไหม้แบบ Fluidized-Bed Incineration ลักษณะและรูปร่างของเตาเผาทั้ง 2 แบบแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.1.2 และรูปที่ 3.1.3



รูปที่ 3.1.2 เตาเผาภาคตะกอนแบบ Multiple Hearth Incineration



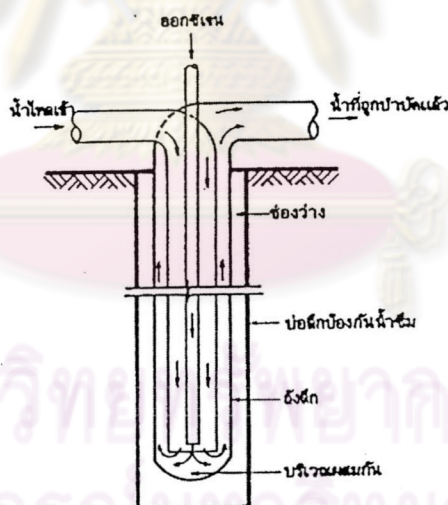
รูปที่ 3.1.3 เตาเผาภาคตะกอนแบบ Fluidized-Bed Incineration

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2. Pyrolysis เป็นระบบที่ให้ความร้อน ซึ่งเป็นการกลั่นทำลายและการสลายตัวของสารอินทรีย์ในรูปของแข็งในสภาพที่มีออกซิเจนน้อย โดยจะให้ก๊าซร้อนที่ประกอบด้วยไฮโดรเจน มีเทน คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซอื่นๆอาจใช้น้ำมันหรือใช้คาร์บอนบริสุทธิโดยปกติจะใช้อุณหภูมิประมาณ 370-870 °C

3. Starved Air Combustion เป็นระบบที่นำเอาวิธีการเผาไหม้โดยทั่วไปและวิธี Pyrolysis มารวมกัน ซึ่งเป็นการเผาไหม้แบบที่ไม่ต้องใช้อากาศ ผลที่ได้จากระบบได้แก่ ก๊าซต่างๆ น้ำมันต่างๆ ชี๊ถั่ว ฯลฯ การควบคุมการทำงานของระบบนี้จะง่ายกว่าระบบ Pyrolysis

4. Wet combustion สารอินทรีย์ต่างๆจาก กากตะกอน ถูกเผาไหม้ภายใต้ความดันสูงที่อุณหภูมิสูงๆ การเติมอากาศเข้าถึงความดันกระทำด้วยเครื่องอัดอากาศ ระบบนี้จะมีการเผาไหม้ไม่ได้ทั้งหมด แต่จะเผาไหม้ได้ถึงประมาณ 80-90% ผลที่ได้จะเป็นพวกสารอินทรีย์หลงเหลือบางส่วน คาร์บอนไดออกไซด์, น้ำ และแอมโมเนีย ระบบนี้จะใช้ความร้อน 2.6 ถึง 3 MJ เมื่อใช้อากาศ 1 กก. อุณหภูมิภายในระบบจะอยู่ในช่วง 135-175 °C ภายใต้ความดันตั้งแต่ 1 ถึง 20 MPa/ตร.ม.ระบบที่มีใช้กันได้แก่ กระบวนการของ Zimpre, Deep-Well Reactor ลักษณะของเตาเผา กากตะกอน แบบ Wet Combustion แสดงให้เห็นในรูปที่ 3.1.4



รูปที่ 3.1.4 เตาเผาแบบ Wet Combustion Deep-Well Reactor

3.2 การเผาไหม้ (Combustion) [1] [29]

3.2.1 ความหมาย

การเผาไหม้ หมายถึง การรวมตัวกันอย่างรวดเร็วของ ออกซิเจน กับ คาร์บอนและ ไฮโดรเจน ผลที่ได้ตามมาจากการรวมตัวกันในครั้งนี้คือ ความร้อน

เชื้อเพลิงโดยส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และในบางเวลาอาจมีซัลเฟอร์อยู่ด้วยเราอาจจะกล่าวได้ว่า การเผาไหม้เกิดขึ้นตามกระบวนการ 3 ขั้นตอนดังนี้คือ

คาร์บอน (C) + ออกซิเจน (O₂) → คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) + ความร้อน

ไฮโดรเจน (H) + ออกซิเจน (O₂) → ไอน้ำ + ความร้อน

ซัลเฟอร์ (S) + ออกซิเจน (O₂) → ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) + ความร้อน

3.2.2 กระบวนการการเผาไหม้ (Combustion Process)

กระบวนการการเผาไหม้จะเกิดขึ้นได้ต้องประกอบไปด้วย

1. เชื้อเพลิง (Fuel)
2. อากาศ (Air)
3. ความร้อน (Heat)

ในกระบวนการเผาไหม้นั้นเชื้อเพลิงจะถูกเผาไหม้ร่วมกับอากาศแห้ง (Dry Air) ซึ่งอากาศแห้งเหล่านี้จะประกอบด้วย ก๊าซออกซิเจน (O₂) 20.99% ก๊าซไนโตรเจน (N₂) 78.03% และก๊าซอาร์กอน (Ar) 0.94% โดยปริมาตรหรือก๊าซออกซิเจน 23.3% ก๊าซไนโตรเจน 76.7% โดยมวลส่วนที่เหลือจะเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ก๊าซนีออน (Ne) ก๊าซฮีเลียม (He) ก๊าซมีเทน (CH₄) และก๊าซอื่นๆซึ่งส่วนประกอบหลักของอากาศแห้ง แสดงให้เห็นในตารางที่ 3.2.1

ตารางที่ 3.2.1 ส่วนประกอบหลักของอากาศแห้ง

Component	%	Dry Bulb Temperature (db) and Relative Humidity (rh)				
		60 F db	60 F db	60 F db	90 F db	90 F db
		0% rh ²	80% rh	100% rh	0% rh ²	100% rh
Oxygen, O ₂	By Volume	20.99	20.696	20.623	20.99	19.991
	By Weight	23.2	22.997	22.944	23.2	22.496
Nitrogen, N ₂	By Volume	78.03	76.938	76.665	78.03	74.317
	By Weight	75.46	74.806	74.631	75.46	73.176
Argon, Ar	By Volume	0.94	0.972	0.924	0.94	0.895
	By Weight	1.3	1.288	1.285	1.3	1.26
Other	By Volume	0.04	0.039	0.039	0.04	0.038
	By Weight	0.04	0.045	0.045	0.04	0.044
Water, H ₂ O	By Volume	0	1.399	1.749	0	4.758
	By Weight	0	0.872	1.096	0	3.024

ในกระบวนการเผาไหม้ ออกซิเจนในอากาศจะเป็นตัวทำปฏิกิริยาและในการคำนวณจะใช้ค่าส่วนประกอบของอากาศเป็น ออกซิเจน 21% และไนโตรเจน 79% และเรียกไนโตรเจนในที่นี้ว่า ไนโตรเจนในบรรยากาศ (Atmospheric Nitrogen) สำหรับอากาศ 4.773 โมล จะประกอบด้วย ออกซิเจน 1 โมล และ Atmospheric Nitrogen 3.773 โมล

กฎต่างๆ ที่สำคัญในการศึกษาเรื่องการเผาไหม้มีดังนี้

กฎของก๊าซสมบูรณ์ (Perfect Gas Law)

สำหรับก๊าซสมบูรณ์ เช่น O₂, N₂, CO, CO₂, ความดัน (P), ปริมาตรจำเพาะ (V) และ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (T) จะสัมพันธ์กันโดย

$$\frac{P}{T} = R \quad (3.2.1)$$

$$\text{หรือ} \quad PV = mRT \quad (3.2.2)$$

เมื่อ R = ค่าคงที่ของก๊าซ (Gas Constant)

$$V = mv$$

m = มวลของก๊าซ

ค่า R อาจหาได้ค่าคงที่สากลของก๊าซ (Universal Gas Constant) \bar{R} โดยที่

$$R = \frac{\bar{R}}{M} \quad (3.2.3)$$

เมื่อ M = น้ำหนักโมเลกุลหรือมวลโมเลกุลของก๊าซ (Molecular Weight) ดังนั้นจากสมการที่ (3.2.2) และ (3.2.3) จะได้ว่า

$$PV = \frac{m}{M} \bar{R} T = n \bar{R} T \quad (3.2.4)$$

โดยที่ n = จำนวนโมล $\cong \frac{m}{M}$

กฎของอโวกาโดร (Avogadro Hypothesis)

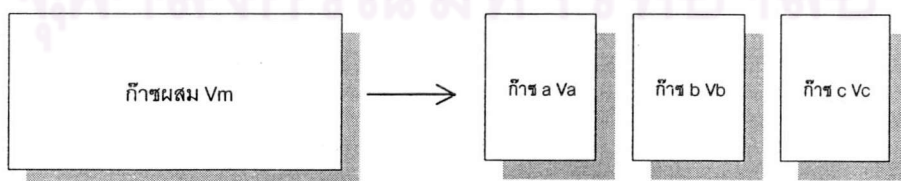
กฎของอโวกาโดรมีใจความสำคัญคือ ที่ความดันและอุณหภูมิเดียวกันปริมาตรของก๊าซต่างๆ จะแปรผันตามจำนวนโมลนั้นคือ

$$V \propto n$$

ดังนั้นแล้วถ้าก๊าซมีจำนวนโมลเท่ากันย่อมมีปริมาตรเท่ากัน

กฎของอมาแกท (Amagat Law of Partial Volume)

กฎของอมาแกท กล่าวว่า ที่อุณหภูมิคงที่ปริมาตรของก๊าซผสม (Gas Mixture) ระหว่างก๊าซต่างๆ เท่ากับปริมาตรของก๊าซต่างๆ แต่ละชนิดรวมกัน เมื่อก๊าซเหล่านั้นมีความดันเท่ากับของผสม



รูปที่ 3.2.1 ปริมาตรของก๊าซผสม

$$V_m = V_a + V_b + V_c \quad (3.2.5)$$

โดย V_m = ปริมาตรก๊าซผสม
 V_a = ปริมาตรก๊าซ a
 V_b = ปริมาตรก๊าซ b
 V_c = ปริมาตรก๊าซ c

น้ำหนักโมเลกุลหรือมวลโมเลกุลของของผสม (Molecular Weight of Mixture)

$$M = m_i / N_i \quad (3.2.6)$$

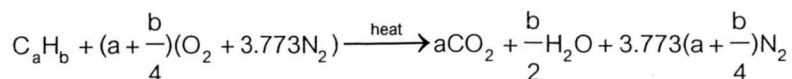
$$\text{เมื่อ } N_i = \sum m_i / M_i \quad (3.2.7)$$

โดยที่ i = สารประกอบแต่ละชนิด
 M = น้ำหนักโมเลกุลหรือมวลโมเลกุลของของผสม
 M_i = น้ำหนักโมเลกุลหรือมวลโมเลกุลของของสารประกอบแต่ละชนิด
 N_i = จำนวนโมลทั้งหมดของของผสม

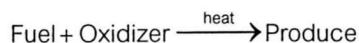
3.2.3 การเผาไหม้แบบสมบูรณ (Combustion Stoichiometry)

ในหัวข้อนี้จะพิจารณาถึงส่วนประกอบของสารตั้งต้น (Reactant) ซึ่งก็คือส่วนผสมของน้ำมันเชื้อเพลิงกับอากาศ (Fuel and Air) และส่วนประกอบของสารผลิตภัณฑ์ (Products) ทั้งนี้ความสัมพันธ์เหล่านี้ขึ้นอยู่กับกฎทรงมวลของส่วนประกอบทางเคมีแต่ละส่วนของสารตั้งต้นและจะสนใจเฉพาะความสัมพันธ์ของส่วนประกอบของน้ำมันเชื้อเพลิงและความสัมพันธ์ของสัดส่วนระหว่างน้ำมันเชื้อเพลิงกับอากาศ

ถ้ามีออกซิเจนเพียงพอเชื้อเพลิงที่เป็นไฮโดรคาร์บอนจะเกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณคาร์บอนในเชื้อเพลิงจะเปลี่ยนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และไฮโดรเจนจะเปลี่ยนเป็นน้ำ (H_2O) ถ้ามีปริมาณอากาศในการทำปฏิกิริยาเป็นไปตามทางทฤษฎีที่คำนวณ โดยการทำสมดุลสมการของการเผาไหม้จะเรียกว่า "การเผาไหม้แบบสมบูรณทางทฤษฎี" (Combustion Stoichiometry) ตามสมการดังนี้



หรือเปรียบเทียบได้ดังนี้



ส่วนผสมของน้ำมันกับอากาศเราจะใช้คำว่า "ส่วนผสม" ถ้าส่วนผสมมีปริมาณอากาศในการทำปฏิกิริยาการเผาไหม้มากกว่าปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้แบบสมบูรณ์ทางทฤษฎีจะเรียกลักษณะดังกล่าวว่า "การเผาไหม้แบบส่วนผสมบาง" (Fuel-Lean Combustion) หรือ "การเผาไหม้แบบมีอากาศส่วนเกิน" (Excess Air Combustion)

ถ้าส่วนผสมมีปริมาณอากาศในการทำปฏิกิริยาการเผาไหม้น้อยกว่าปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้แบบสมบูรณ์ทางทฤษฎีจะถูกเรียกว่า "การเผาไหม้แบบส่วนผสมหนา" (Fuel-Rich Combustion) ซึ่งจะทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ซึ่งสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นนั้นได้จะเป็น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) น้ำ (H₂O) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ไฮโดรเจน (H₂) และสารประกอบอื่นๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับสารตั้งต้น

เราจะเห็นได้ว่าอัตราส่วนของเชื้อเพลิงกับอากาศของสารตั้งต้นมีอิทธิพลต่อส่วนประกอบของสารผลิตภัณฑ์ ในทางปฏิบัติเรามักจะใช้ค่าอัตราส่วนของเชื้อเพลิงต่ออากาศ (Fuel to Air Ratio, F/A) หรือ อัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิง (Air to Fuel Ratio, A/F) อัตราส่วนสองอย่างนี้สามารถแสดงได้โดยแสดงเป็น

อัตราส่วนโดยมวล (Mass Basis)

$$A/F = \frac{\text{mass of air (kg air)}}{\text{mass of fuel (kg fuel)}} \quad (3.2.8)$$

$$F/A = \frac{\text{mass of fuel (kg fuel)}}{\text{mass of air (kg air)}} \quad (3.2.9)$$

และอัตราส่วนโดยโมล (Mole Basis)

$$A/F = \frac{\text{moles of air (kgmole air)}}{\text{moles of fuel (kgmole fuel)}} \quad (3.2.10)$$

$$F/A = \frac{\text{moles of fuel (kgmole fuel)}}{\text{moles of air (kgmole air)}} \quad (3.2.11)$$

และเนื่องจากอัตราส่วนของน้ำมันเชื้อเพลิงต่ออากาศทางทฤษฎี (Stoichiometric Fuel/Air Ratio) จะขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของน้ำมันเชื้อเพลิง การใช้อัตราส่วนของอัตราส่วนน้ำมันเชื้อเพลิงต่ออากาศในทางปฏิบัติจริงกับอัตราส่วนน้ำมันเชื้อเพลิงต่ออากาศทางทฤษฎีจะช่วยให้การหาส่วนประกอบของส่วนผสมง่ายและสะดวกยิ่งขึ้น และจะเรียกอัตราส่วนนี้ว่า "สัดส่วนสมมูลของน้ำมันเชื้อเพลิงต่ออากาศ" (The Fuel / Air Equivalence Ratio ϕ)

$$\phi = \frac{(F/A)_{\text{actual}}}{(F/A)_{\text{stoich}}} \quad (3.2.12)$$

โดยที่ F/A_{actual} คือ อัตราส่วนน้ำมันเชื้อเพลิง/อากาศ ในทางปฏิบัติจริง
 F/A_{stoich} คือ อัตราส่วนน้ำมันเชื้อเพลิง/อากาศ ในทางทฤษฎี

ส่วนกลับของสัดส่วนสมมูลของน้ำมันเชื้อเพลิงต่ออากาศ (ϕ) เราเรียกว่า "สัดส่วนสมมูลผกผัน" (The Relative Air/Fuel Ratio, λ) ซึ่ง

$$\lambda = \frac{1}{\phi} = \frac{(A/F)_{\text{actual}}}{(A/F)_{\text{stoich}}} \quad (3.2.13)$$

โดยที่ A/F_{actual} คือ อัตราส่วนอากาศ/น้ำมันเชื้อเพลิง ในทางปฏิบัติจริง
 A/F_{stoich} คือ อัตราส่วนอากาศ/น้ำมันเชื้อเพลิง ในทางทฤษฎี

และเป็นการสะดวกที่จะใช้ค่า ϕ และ λ ในการระบุว่าเป็นส่วนผสมหนาหรือส่วนผสมบาง โดยแสดงให้เห็นในตารางที่ 3.2.2

ตารางที่ 3.2.2 การเผาไหม้ที่อัตราส่วนผสมมูลต่างๆ ระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศ

ลักษณะการเผาไหม้	อัตราส่วนผสมมูลของน้ำมันเชื้อเพลิง ต่ออากาศ	อัตราส่วนผสมมูลของอากาศ ต่อน้ำมันเชื้อเพลิง
1. การเผาไหม้แบบส่วนผสมบาง	$\phi < 1$	$\lambda > 1$
2. การเผาไหม้สมบูรณ์ทางทฤษฎี	$\phi = 1$	$\lambda = 1$
3. การเผาไหม้แบบส่วนผสมหนา	$\phi > 1$	$\lambda < 1$

3.2.4 การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแข็ง

โดยทั่วไปแล้วเชื้อเพลิงแข็งมีส่วนประกอบที่เป็นสารระเหย และคาร์บอนคงตัว ในช่วงแรกเป็นการเผาไหม้ของสารระเหย ซึ่งเกิดขึ้นในวัฏภาคก๊าซ เป็นปฏิกิริยาระหว่างก๊าซกับก๊าซในช่วงหลังเป็นการเผาไหม้ของกากของแข็งที่เหลืออยู่คือ คาร์บอนและก๊าซ และเพื่อให้เชื้อเพลิงและออกซิเจน (อากาศ) สัมผัสกันได้ทั่วถึงภายใต้สภาวะที่เหมาะสมจะต้องทำดังนี้

1. จัดให้มีปริมาณอากาศที่เพียงพอที่ตำแหน่งที่ถูกต้องโดยตลอดบริเวณที่มีเชื้อเพลิง
2. ให้เวลาและจัดให้มีการปั่นป่วนเพียงพอและที่อุณหภูมิสูงพอที่จะเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ภายในปริมาตรห้องเผาไหม้ที่มีอยู่ ข้อนี้นิยมเรียกว่ากฎ 3T's (Time, Turbulence and Temperature)

การจัดให้มีปริมาณอากาศที่เพียงพอที่ตำแหน่งที่ถูกต้องโดยตลอดบริเวณที่มีเชื้อเพลิงนั้น หมายถึง การทำให้อากาศไหลผ่านบริเวณที่ต้องการในปริมาณที่เพียงพอ การทำให้อากาศไหลผ่านเข้าสู่ระบบการเผาไหม้และก๊าซเสียไหลออกจากระบบอย่างต่อเนื่องนั้นเกิดขึ้นได้ด้วยกระแสลมแรง ดังนั้นแล้วกระแสลมแรง หมายถึง ความดันแตกต่างระหว่างปากเตาเผาคือ จุดที่อากาศถูกป้อนเข้ากับท้ายเตาเผาคือจุดที่ก๊าซเสียไหลออกจากระบบหรือปล่องควันเพื่อปล่อยสู่บรรยากาศ ซึ่งกระแสลมแรงดังกล่าวมีอยู่ด้วยกันหลายประเภท โดยมีรายละเอียดดังนี้

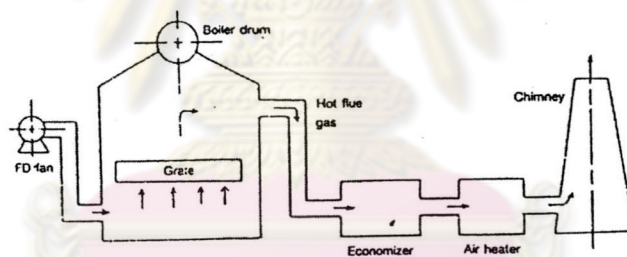
กระแสลมแรงธรรมชาติ (Natural Draught)

ความดันแตกต่างกันเกิดขึ้นได้โดยธรรมชาติเนื่องจากกระแสอากาศที่เย็นกว่าไหลเข้าแทนที่กระแสก๊าซเสียที่ร้อนกว่าที่ไหลออกจากระบบเผาไหม้ตลอดเวลา แต่กระแสลมแรงธรรมชาติมีค่าต่ำ จึงใช้ได้กับระบบเผาไหม้ขนาดเล็ก

กระแสลมแรงทางกล (Mechanical Draught)

ในระบบเผาไหม้ขนาดใหญ่ ความต้องการอากาศในห้องเผาไหม้แต่ละบริเวณแตกต่างกัน และก๊าซเสียต้องไหลผ่านบริเวณแลกเปลี่ยนความร้อนจึงมีแรงเสียดทานมาก กระแสอากาศและก๊าซเสียจำเป็นต้องมีโมเมนตัมสูงเพื่อให้การจัดอากาศป้อนเหมาะสมและมีการถ่ายโอนความร้อนที่ดีระหว่างก๊าซเสียและผิวท่อ จึงต้องเพิ่มกระแสลมแรงโดยใช้อุปกรณ์ทางกลซึ่งทำได้ 3 วิธีคือ

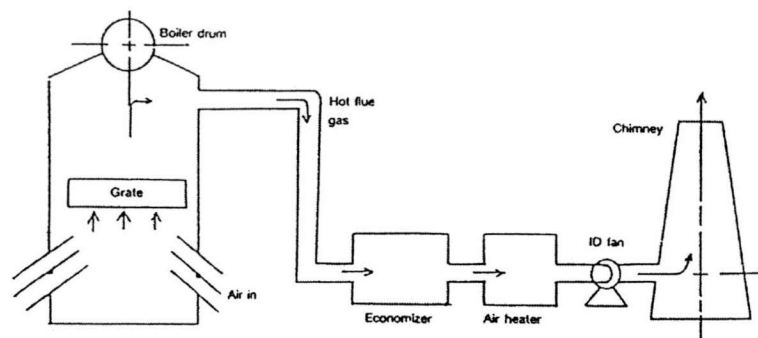
1. ใช้พัดลมเป่าอากาศเข้าด้านหน้า ความดันด้านหน้าเตาเป็นบวก ความดันด้านหลังเตาเป็นศูนย์เรียกว่า “กระแสลมแรงบังคับ” (Force Draught) แสดงให้เห็นตามรูปที่ 3.2.2



รูปที่ 3.2.2 กระแสลมแรงแบบบังคับ

ข้อดีคือ ปริมาณอากาศน้อย ใช้พัดลมขนาดเล็กใบพัดไม่สัมผัสกับความร้อน และฝุ่น
ข้อเสียคือ ถ้ามีรอยรั่วหรือเปิดประตูเตาเผา ก๊าซร้อนจะพุ่งออกด้านนอกเป็นอันตรายได้
ข้อได้เปรียบคือ วิธีนี้สามารถรักษาอุณหภูมิภายในเตาเผาได้ดีกว่า

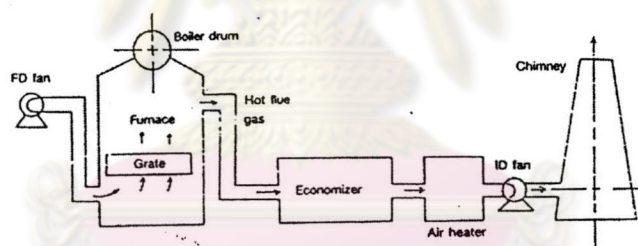
2. ใช้พัดลมดูดก๊าซเสียจากเตา ความดันหลังเตาเป็นลบ เรียกว่า “กระแสลมแรงเหนี่ยวนำ” (Induced Draught) แสดงให้เห็นตามรูปที่ 3.2.3



รูปที่ 3.2.3 กระแสลมแรงเหวี่ยงน้ำ

ข้อดีคือ ความดันภายในเตาเป็นลบเล็กน้อย การทำงานปลอดภัยกว่า การสูญเสียความร้อนเนื่องจากรอยรั่วหรือการเปิดประตูเตาน้อยกว่า

3. ใช้ทั้งพัดลมเป่าอากาศเข้าด้านหน้า และพัดลมดูดก๊าซเสียออกจากเตา ความดันด้านหน้าเตาและความดันด้านหลังเตาเป็นบวกเล็กน้อย เรียกว่า “กระแสลมแรงสมดุล” (Balance Draught) แสดงให้เห็นตามรูปที่ 3.2.4



รูปที่ 3.2.4 กระแสลมแรงแบบสมดุล

เป็นระบบที่ใช้กันมากโดยเฉพาะหม้อไอน้ำขนาดใหญ่ที่มีความต้องการกระแสลมแรงในแต่ละบริเวณแตกต่างกัน การใช้พัดลมมากกว่าหนึ่งอัน สามารถควบคุมกระแสลมแรงได้ดีกว่า

กฎ 3T's (Time, Turbulence and Temperature)

ถ้าอากาศไหลผ่าน (มีกระแสลมแรง) แต่มีเวลาไม่เพียงพอที่จะผสมกับเชื้อเพลิงไม่มีการปั่นป่วนเพื่อให้มวลของก๊าซเชื้อเพลิงและอากาศสัมผัสกัน และมีบางบริเวณที่อุณหภูมิไม่สูงพอการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ไม่อาจเกิดขึ้นได้การจัดให้มีองค์ประกอบที่เหมาะสมทั้ง 3 ประการขึ้นอยู่กับการป้อนอากาศและปริมาณอากาศ

การป้อนอากาศ แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ อากาศส่วนแรก และอากาศส่วนที่สอง อากาศส่วนแรก (Primary Air) คือส่วนที่ป้อนเข้ามาพร้อมกับเชื้อเพลิงหรือส่วนที่สัมผัสกับเชื้อเพลิงก่อน อากาศส่วนที่ 2 (Secondary Air) คืออากาศส่วนที่ป้อนเข้ามาสัมผัสกับเชื้อเพลิงหรือผลผลิตจากการไพโรไลส์หรือการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงในระยะถัดไป

สัดส่วนและปริมาณการป้อนอากาศส่วนแรก และอากาศส่วนที่สอง มีความสำคัญมากและมีผลเป็นอย่างมากต่อการเกิดควันและความสมบูรณ์ของปฏิกิริยา

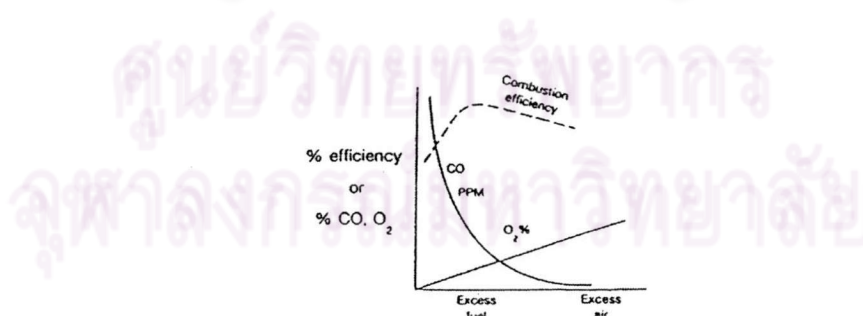
อากาศเกินพอ (Excess Air)

ระบบการเผาไหม้โดยทั่วไปจะใช้อากาศเกินพอเพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ในกรณีของก๊าซเชื้อเพลิง มวลของก๊าซและอากาศผสมเป็นเนื้อเดียวกันอยู่แล้ว จึงไม่ต้องใช้อากาศเกินพอหรือใช้เพียงเล็กน้อย (ระหว่าง 0-10%) ในกรณีเชื้อเพลิงเหลว หยดน้ำมันเกิดการระเหยเป็นไอพร้อมๆกันกับการเผาไหม้จึงจำเป็นต้องใช้อากาศเกินพอสูงกว่าในกรณีของก๊าซเชื้อเพลิงเพื่อให้ทันถึงการระเหย (ระหว่าง 5-20%) ในกรณีเชื้อเพลิงแข็ง นอกจากต้องแบ่งการป้อนอากาศเป็นสองส่วนแล้ว ยังต้องใช้อากาศเกินพอสูงมาก (ระหว่าง 15-60%) ทั้งอากาศส่วนแรกเพื่อทำปฏิกิริยากับคาร์บอนในกากของแข็ง และอากาศส่วนที่สองเพื่อทำปฏิกิริยากับสารระเหยที่ถูกไล่ออกจากพื้นผิวทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระบบและอุปกรณ์ที่ใช้ด้วย ปริมาณอากาศเกินพอที่มักใช้ในระบบเผาไหม้เชื้อเพลิงแสดงให้เห็นในตารางที่ 3.2.3

ตารางที่ 3.2.3 ปริมาณอากาศเกินพอที่มักใช้กับระบบเผาไหม้เชื้อเพลิง

Fuel	Type of Furnace or Burners	Excess Air % by Weight
Pulverized coal	Complete water-cooled furnace for slag-tap or dry-ash-removal	15-20
	Partially water-cooled furnace for dry-ash-removal	15-40
Crushed coal	Cyclone Furnace pressure or suction	10-15
Coal	Spreader stoker	30-60
	Water-cooled vibrating-grate stoker	30-60
	Chain-grate and traveling-grate stokers	15-50
	Underfeed stoker	20-50
Fuel oil	Oil burners, register-type	5-10
	Multifuel burners and flat-flame	10-20
Acid sludge	Cone and flat-flame type burner, steam-atomized	10-15
Natural, coke-oven and refinery gas	Register-type burners	5-10
	Multifuel burners	7-12
Blast-furnace gas	Intertube nozzle-type burners	15-18
Wood	Dutch oven(10-23% through grates) and Hofftt-type	20-25
Bagasse	All furnaces	25-35
Black liquor	Recovery furnaces for kraft and soda-pluping processes	5-7

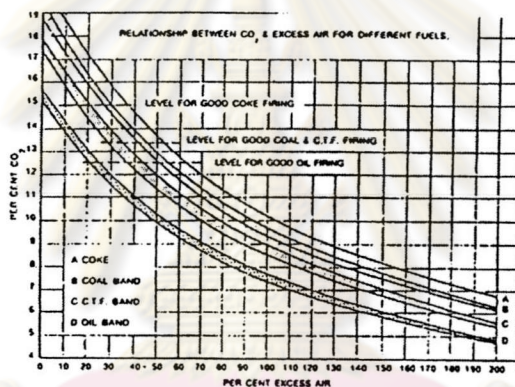
ปริมาณอากาศเกินพอที่เหมาะสมนั้นนอกจากจะหมายถึงการเผาไหม้ที่สมบูรณ์แล้ว ยังมีผลให้การสูญเสียความร้อนต่ำที่สุดด้วย ทั้งนี้เนื่องจากถ้าใช้อากาศเกินพอเกินไปจนเกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์จะทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนในรูปขององค์ประกอบก๊าซและของแข็งที่ยังเผาไหม้ได้ออกไปจากระบบ เรียกว่า "การสูญเสียศักยภาพทางความร้อน" (Potential Heat Loss) เช่น ก๊าซ CO, H₂ หรือคาร์บอนเป็นต้น โดยเฉพาะก๊าซ CO ซึ่งมักพบเสมอถ้าเผาไหม้ต่อไป แต่ถ้าใช้อากาศเกินพอมากเกินไป ปริมาตรอากาศส่วนที่เกินพอที่เข้ามาจะออกไปจากระบบโดยไม่ได้ทำปฏิกิริยาทำให้ปริมาตรรวมของก๊าซเสียเพิ่มขึ้นความร้อนสัมผัสที่สูญเสียออกไปจากระบบนี้เรียกว่า "การสูญเสียความร้อนสัมผัส" (Sensible Heat Loss) ดังนั้นจะมีจุดที่เหมาะสมที่ทำให้การสูญเสียต่ำที่สุดดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.2.5



รูปที่ 3.2.5 เส้นโค้งการสูญเสียความร้อนออกจากระบบเผาไหม้

จากรูปเส้นโค้งการสูญเสียที่อากาศเกินพอน้อยเกินไปซึ่งกว่าเส้นโค้งการสูญเสียที่อากาศเกินพอน้อยเกินไป ดังนั้นในปฏิบัติการจริงซึ่งการควบคุมอากาศเกินพอให้อยู่ที่ค่าเดียวกระทำได้อย่าง จึงมักจะยอมให้อากาศเกินพอนอกกว่าค่าที่เหมาะสมเล็กน้อยเสมอ

ถ้าคำนวณดุลของระบบเผาไหม้จะพบว่ามีความสัมพันธ์ระหว่าง CO_2 และ O_2 คือถ้าอากาศเกินพอน้อยก๊าซเสียมีความเข้มข้นของ CO_2 สูงและของ O_2 ต่ำ ตรงกันข้ามถ้าอากาศเกินพอนอกก๊าซเสียถูกเจือจางด้วยไนโตรเจนและออกซิเจนเกินพอจากอากาศจึงมีความเข้มข้นของ CO_2 ต่ำและของ O_2 สูง ในการควบคุมอากาศเกินพอจึงอาจใช้เครื่องมือวัดความเข้มข้นของแก๊ส CO_2 หรือ O_2 เพียงชนิดเดียวได้ ในหลักการการตรวจวัดความเข้มข้นของก๊าซ CO_2 ในก๊าซเสียให้ผลถูกต้องกว่าเพราะไม่มีผลจากการรั่วของอากาศเข้าสู่ระบบขณะวัด ความสัมพันธ์ระหว่าง % ของ CO_2 กับ % ของอากาศเกินพอของเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ แสดงให้เห็นในรูปที่ 3.2.6



รูปที่ 3.2.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง % ของ CO_2 กับ % ของอากาศเกินพอของเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3 ฟลูอิดไดเซชัน [13]

3.3.1 ความหมาย

“ฟลูอิดไดเซชัน” คือ กระบวนการหรือวิธีการที่ของแข็งซึ่งมีรูปร่างลักษณะเป็นเม็ดหรือเป็นชิ้นสัมผัสกับของไหลแล้วเม็ดของแข็งเหล่านั้นจะมีคุณสมบัติคล้ายของไหลเนื่องจากเม็ดหรือชิ้นของของแข็งดังกล่าวแรกที่เดี่ยวถูกวางไว้บนตะแกรงในหอทดลองที่มักจะมีรูปร่างเป็นทรงกระบอก แต่ในปัจจุบันเปลี่ยนแปลงให้อยู่ในรูปร่างแนวอนกก็มี ซึ่งของไหลที่ใช้มีก๊าซหรือของเหลวปล่อยให้ผ่านมาจากด้านล่างของตะแกรงที่รองรับเม็ดของแข็งหรือชิ้นของแข็งเหล่านั้น ของไหลก็จะไหลผ่านชั้นเม็ดของแข็งแล้วไหลออกทางส่วนบนของหอทดลองเพิ่มความเร็วของของไหลให้มากขึ้นเรื่อยๆ จนในที่สุดจะเห็นเม็ดของแข็งขยับตัวและเกิดการลอยตัวขึ้นเป็นอิสระไม่เกาะติดกันของแข็งที่อยู่ใกล้ๆ นี้จะมีคุณสมบัติคล้ายของไหล กล่าวคือมีการไหลหมุนเวียนของเม็ดของแข็งภายในเบดหรือภายในหอทดลองหรือระหว่างเบดต่อบેดก็ได้เราจึงเรียกของแข็งซึ่งอยู่ในสถานะนี้ว่า “ฟลูอิดไดเซชัน”

3.3.2 ประเภทของฟลูอิดไดเซชัน

สำหรับประเภทของฟลูอิดไดเซชันหลักทั่วไปมีอยู่ด้วยกัน 2 แบบคือ

3.3.2.1 ฟลูอิดไดเซชันสองสถานะ (Two-phase Fluidization) ลักษณะคือ ในหอทดลองหรือเบดที่ใช้งานจะประกอบด้วย 2 สถานะทั้งของแข็งและของไหลซึ่งสามารถแบ่งย่อยออกไปได้อีกคือ

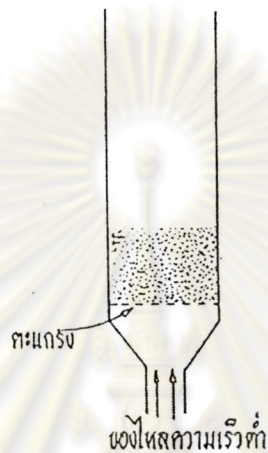
3.3.2.1.1 ก๊าซฟลูอิดไดเซชัน (Gas Fluidization)

3.3.2.1.2 ฟลูอิดไดเซชันของเหลว (Liquid Fluidization)

3.3.2.2 ฟลูอิดไดเซชันสามสถานะ (Three-phase Fluidization) ลักษณะคือ ในหอทดลองหรือเบดจะประกอบไปด้วยของสามสถานะอยู่พร้อมกันคือ ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ

3.3.3 ลักษณะของฟลูอิดไดเซชัน

เบด (Bed) หมายถึง อาณาเขตในหอทดลองที่มีปริมาณของเม็ดของแข็งบรรจุอยู่ไม่ว่าเม็ดของแข็งนั้นจะอยู่นิ่งหรือเคลื่อนไหว ของไหลในหอทดลองจะมีระดับตั้งแต่แผ่นโลหะซึ่งทำเป็นตะแกรงรองรับหรือเป็นตัวกระจายของไหล (Distributor) จนถึงระดับสูงสุดคือผิวหน้าของเม็ดของแข็งที่อยู่ในหลอดทดลองดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.3.1

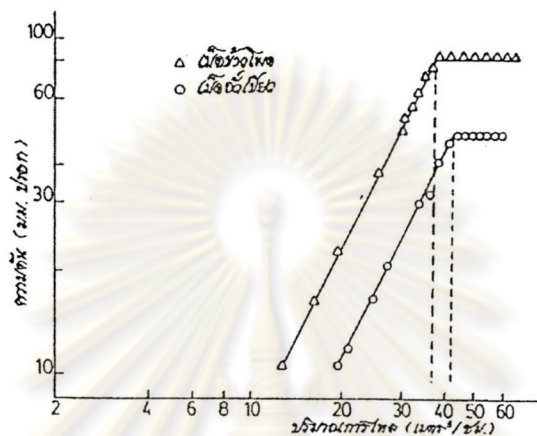


รูปที่ 3.3.1 ระดับของเบดในหอทดลอง

เมื่อบรรจุเม็ดของแข็งในหอทดลองเรียบร้อยตามความต้องการแล้วเริ่มปล่อยของไหลเข้าทางด้านล่างของหอทดลองอย่างช้าๆขณะที่ของไหลความเร็วยังน้อยอยู่เม็ดของแข็งจะไม่ขยับตัวเลย ลักษณะของเบดเช่นนี้เรียกว่า “เบดนิ่ง” (Fixed Bed) เราค่อยๆ เพิ่มความเร็วของของไหลให้มากขึ้นทีละน้อยจนถึงความเร็วระดับหนึ่ง เม็ดของแข็งจะเริ่มขยับตัวและจัดตัวอย่างเป็นระเบียบ เมื่อความเร็วของของไหลเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย เม็ดของแข็งจะหลุดออกจากกันและลอยตัวอย่างอิสระซึ่งลักษณะนี้เรียกว่า “จุดเริ่มฟลูอิดไดเซชัน” (Onset of Fluidization) หลังจากจุดนี้ไปแล้วความเร็วของของไหลที่เพิ่มขึ้นจะไปทำให้เบดขยายตัวตามความเร็วของของไหล เม็ดของแข็งยังอยู่ชิดกันมากดูเหมือนว่าเม็ดของแข็งยังจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน เบดลักษณะนี้เราเรียกว่า “ฟลูอิดไดเซชันแบบหนาแน่น” (Dense-Phase Fluidized Bed)

ฟลูอิดไดเซชันเบด นั้นจะเกิดขึ้นได้ต้องอาศัยแฟคเตอร์หลายๆอย่างมาผสมผสานกันให้เกิดความเหมาะสมขึ้นในเบด เบดนั้นจึงจะมีคุณสมบัติคล้ายของไหลได้ แฟคเตอร์ที่สำคัญในลำดับแรกคือ ความเร็วของของไหล ความเร็วของของไหลที่เพิ่มขึ้นทีละน้อยนั้น ในระยะแรกเบดยังอยู่นิ่ง

ความดันตกก็จะเพิ่มขึ้นพร้อมกับความเร็วของไหลจนถึงระดับหนึ่งเมื่อเม็ดของแข็งเริ่มขยับและแยกตัวเป็นอิสระความดันตกของเบดก็ไม่เพิ่มขึ้นต่อไป ไม่ว่าเราจะเพิ่มความเร็วให้กับของไหลเท่าไรก็ตามเบดในช่วงนี้เรียกว่า “ฟลูอิดไดซ์เบด” ซึ่งรายละเอียดดังกล่าวแสดงให้เห็นได้จากกราฟในรูปที่ 3.3.2 ซึ่งได้จากการทดลองโดยใช้เม็ดข้าวโพดที่มีความชื้นประมาณ 12% และเม็ดถั่วเขียวที่มีความชื้นประมาณ 13%



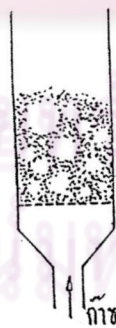
รูปที่ 3.3.2 ผลการทดลองปริมาณการไหลกับความดันตก

จากรูปขณะที่เบดเริ่มเกิดเป็น ฟลูอิดไดซ์เบด เม็ดของแข็งจะเริ่มขยับตัวจัดระเบียบของตัวเองให้อยู่ในแนวเดียวกันหรือจัดเรียงเม็ดต่อเม็ดอย่างสวยงามจากนั้นแต่ละเม็ดก็ค่อยๆ แยกห่างกันออกไปเป็นอิสระตามความเร็วของของไหลที่เพิ่มขึ้น ความเร็วของของไหลที่ทำให้เบดเริ่มขยับตัวหรือเริ่มจัดตัวเองนี้ (ในขณะเดียวกันความดันตกเริ่มคงที่) ความเร็วจำนวนนี้เรียกว่า “ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดซ์เบด” ซึ่งจากรูปแสดงให้เห็นผลการทดลองโดยใช้เม็ดข้าวโพดและเม็ดถั่วเขียว ซึ่งมีคุณสมบัติดังที่กล่าวไปแล้วคือ เม็ดข้าวโพดมีความชื้นประมาณ 12% และเม็ดถั่วเขียวมีความชื้นประมาณ 13% พบว่าความเร็วต่ำสุดของอากาศเมื่อใช้เม็ดข้าวโพดในการทดลองมีค่าประมาณ 41.7 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง และความเร็วต่ำสุดของอากาศเมื่อใช้เม็ดถั่วเขียวในการทดลองมีค่าประมาณ 36.6 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ถ้าความเร็วของของไหลมากขึ้นอีกของไหลก็เกือบจะพาเอาเม็ดของแข็งเหล่านั้นหลุดออกไปจากหอทดลองอยู่แล้ว ซึ่งเบดที่อยู่ในลักษณะดังกล่าวจะเรียกว่า “ฟลูอิดไดซ์เบดเจือจาง” (Diluted Phase Fluidized Bed) หลังจากนั้นเพิ่มความเร็วของไหลอีกเล็กน้อยเม็ดของแข็งเหล่านั้นจะหลุดลอยออกจากหอทดลองไป ซึ่งในลักษณะนี้เราใช้เป็นการขนส่งของแข็งจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งได้หรือถ้าใช้อากาศก็จะเป็นการขนส่งด้วยอากาศ (Pneumatics Transport) เช่นการลำเลียงผลิตภัณฑ์อาหารสัตว์เป็นต้น ถ้าเป็นของเหลวก็เรียกว่าการขนส่งของเหลว (Hydraulic Transport) ตัวอย่างเช่นการส่งเม็ดแร่

ฟลูอิดไดซ์เบดที่ของไหลเป็นของเหลวการขยายตัวของเบดเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งการลอยตัวและหมุนรอบตัวเองของเม็ดของแข็งเป็นไปในลักษณะช้าเราเรียกเบดนี้ว่า “เบดสม่ำเสมอ” หรือ “เบดที่มีลักษณะเนื้อเดียวกัน” (Particulated Bed of Homogeneously Bed of Smoothing Fluidized-Bed or Liquid Fluidized-Bed) ฟลูอิดไดซ์เบดที่ของไหลเป็นก๊าซ ลักษณะเบดจะแตกต่างจากที่ใช้ของเหลวมาก เพราะว่าเมื่อความเร็วของก๊าซสูงกว่าความเร็วที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์เบดแล้ว ก๊าซส่วนหนึ่งยังทำหน้าที่ให้เกิดการลอยตัวของเม็ดแข็งเหมือนเดิม แต่มีอีกส่วนหนึ่งรวมตัวกันแล้วก่อตัวกันเป็นฟองก๊าซเกิดขึ้น ฟองก๊าซก็จะแทรกตัวเองขึ้นมาบนผิวหน้าของเบดและแตกตัวเองในที่สุด ขณะที่ฟองก๊าซลอยขึ้นมาจะทำให้เม็ดของแข็งไหลจากส่วนหลังคาของฟองก๊าซมายังส่วนล่าง พร้อมกันนั้นยังมีบางส่วนของเม็ดของแข็งลอยติดตามฟองก๊าซขึ้นไปด้วยภายในเบดจะเห็นว่าการเคลื่อนของเม็ดของแข็งเป็นไปอย่างสุ่มเบดซึ่งเรียกว่า “ฟลูอิดไดซ์เบดสุ่ม” หรือเรียกสั้นๆว่า “เบดสุ่ม” ทั้งหมดแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.3.3 และรูปที่ 3.3.4

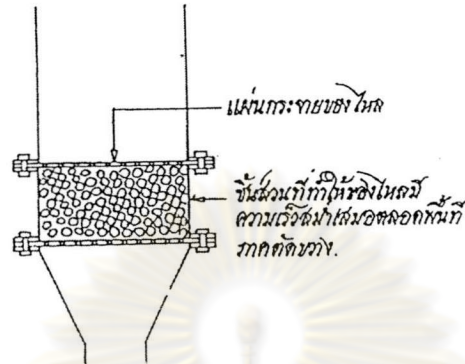


รูปที่ 3.3.3 ฟลูอิดไดซ์เบดที่ของไหลเป็นของเหลว



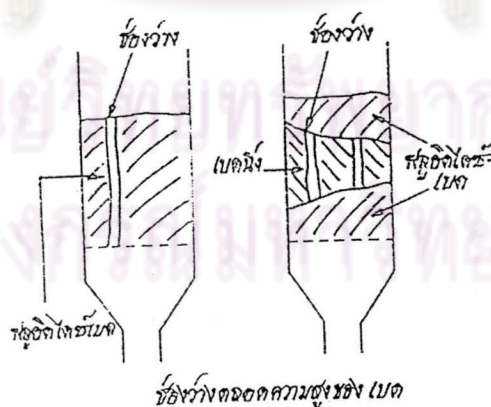
รูปที่ 3.3.4 ฟลูอิดไดซ์เบดของไหลเป็นก๊าซ

แพคเตอร์ที่สำคัญอีกประการหนึ่งก็คือ ตัวกระจายของไหล (Distributor) และชั้นส่วนที่จะทำให้ของไหลมีความเร็วสม่ำเสมอตลอดพื้นที่ภาคตัดขวางของหอทดลอง (Homogeneity Section) ซึ่งแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.3.5



รูปที่ 3.3.5 ลักษณะตัวกระจายและชั้นส่วนที่ทำให้ของไหลมีความเร็วสม่ำเสมอ

ในหอทดลองใดก็ตามการออกแบบตัวกระจายหรือชั้นส่วนกระจายของไหลไม่เหมาะสมกับเบดที่ใช้แล้ว มักมีโอกาที่จะเกิดช่องหรือแนวช่องที่มีแต่ของไหลเพียงอย่างเดียวไหลผ่าน (Channeling) ที่เกิดเหตุการณ์เช่นนี้ เพราะความเร็วที่ไหลสูงเบดมีส่วนหนึ่งเร็วกว่าส่วนอื่นๆ บริเวณนี้ของไหลจะทำให้เม็ดของแข็งกระจายหรือแยกตัวออกไปอยู่ด้านข้างเกิดเป็นช่องว่างตลอดทั้งความสูงของเบดหรือส่วนหนึ่งของเบดซึ่งปรากฏการณ์เช่นนี้มักเกิดในก๊าซฟลูอิดไดซ์เบดโดยเฉพาะเบดที่มีความเร็วของก๊าซสูงๆ ส่วนโอกาสที่จะเกิดกับฟลูอิดไดซ์ชั้นของเหลวมีน้อยมากเนื่องจากของเหลวมีแรงพุงมากซึ่งแสดงให้เห็นได้จากรูปที่ 3.3.6



รูปที่ 3.3.6 การเกิด Channeling

สำหรับแฟคเตอร์อื่น ๆ ที่มีอิทธิพลต่อไฮโดรไดนามิกของเบตได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหอคดลอง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดของแข็ง ความถ่วงจำเพาะของของไหลและเม็ดของของแข็ง ความหนืด ความสูงของเบต เป็นต้น

3.3.4 การคำนวณหาความเร็วต่ำสุดของของไหลที่ทำให้เบตเกิดฟลูอิดไดเซชัน (U_{mf})

ในขณะที่เม็ดของแข็งเริ่มลอยตัวเป็นอิสระอยู่นั้นอาจกล่าวได้ว่า เม็ดของแข็งอยู่ในสภาวะสมดุลของแรง 2 แรงที่เกิดขึ้นบนเม็ดของแข็ง คือแรงที่เกิดจากน้ำหนักของตัวเม็ดของแข็งกับแรงพยุงจากของไหลหรือเกิดจากแรงเสียดทานกับแรงต้านของของไหล

$$\text{แรงพยุง (แรงเสียดทาน + แรงต้าน)} = \text{น้ำหนักของเม็ดของแข็ง} \quad (3.3.1)$$

$$\begin{aligned} & (\text{ความดันตกในพ.ท.ตัดขวางของเบต})(\text{พ.ท.ตัดขวางของหอคดลอง}) \\ & = (\text{ปริมาตรของเบต})(\text{ส่วนของแข็งในเบต})(\text{ความถ่วงจำเพาะของของแข็ง}) \end{aligned} \quad (3.3.2)$$

ซึ่งเขียนใหม่ได้เป็น

$$\Delta P A = W = (AL_{mf}) (1 - \epsilon_{mf}) (\rho_s - \rho_g) \frac{g_c}{g} \quad (3.3.3)$$

จัดระเบียบใหม่เพื่อให้ได้สถานะต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชันเป็นดังนี้

$$\frac{\Delta P}{L_{mf}} = (1 - \epsilon_{mf}) (\rho_s - \rho_g) \frac{g_c}{g} \quad (3.3.4)$$

ปริมาณช่องว่างในเบตต่ำสุดสำหรับขณะที่เริ่มเกิดนั้นจะมีค่ามากกว่าปริมาณช่องว่างที่อยู่ในเบตหนึ่งเล็กน้อยในขณะที่เบตยังอยู่ในลักษณะของค่าต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชันนั้น สมการของความดันตกยังสามารถเอามาประยุกต์ใช้ได้เมื่อแทนค่าความดันในสมการของ ERGUN [19] จะได้ว่า

$$\frac{1.75 (D_p L_{mf} \rho_g)^2 + 150 (1 - \epsilon_{mf}) (D_p L_{mf} \rho_g)}{\phi_s \epsilon_{mf}^3 \mu} = \frac{D_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g_c}{\mu^2} \quad (3.3.5)$$

ในเบดที่ใช้เม็ดของแข็งขนาดเล็กจะทำให้สามารถใช้ความเร็วของของไหลเพียงเล็กน้อยก็ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันแล้ว เพราะฉะนั้นความเร็วต่ำสุดที่จะทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันนั้นสามารถคำนวณได้จาก

$$U_{mf} = \frac{(\phi_s D_p)^2}{150} \frac{\rho_s - \rho_g}{\mu} g_c \frac{\epsilon_{mf}^3}{1 - \epsilon_{mf}} \quad (3.3.6)$$

เมื่อ $Re < 20$

และสำหรับเบดที่ใช้เม็ดของแข็งขนาดใหญ่ต้องใช้ความเร็วของของไหลสูงมาก ๆ ซึ่งจะทำให้เม็ดของแข็งลอยเป็นอิสระได้ ดังนั้นความเร็วต่ำสุดของของไหลที่จะทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันคำนวณได้จาก

$$U_{mf}^2 = \frac{\phi_s D_p}{1.75} \frac{\rho_s - \rho_g}{\rho_g} g_c \epsilon_{mf}^3 \quad (3.3.7)$$

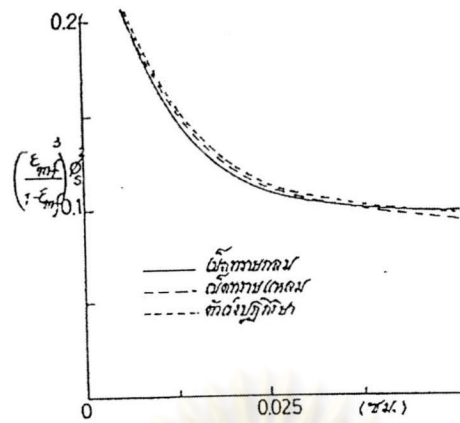
เมื่อ $Re > 1000$

3.3.5 สมการทั่วไปของความเร็วต่ำสุดของการฟลูอิดไดเซชัน

บางครั้งการหาค่าของแฟคเตอร์รูปร่าง (ϕ_s) และค่าของสัดส่วนช่องว่างต่ำสุดของเบด (ϵ_{mf}) ทำได้ยากมากได้มีการหลีกเลี่ยงที่จะใช้ค่าทั้งสองนี้โดยพยายามเปลี่ยนให้อยู่ในเทอมของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดของแข็งดังสมการ (3.3.7)

Leva et al. [25] ได้หาความสัมพันธ์ของเทอม $\frac{\epsilon_{mf}^3}{1 - \epsilon_{mf}} \phi_s^2$ กับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง

กลางของเม็ดของแข็งดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.3.7



รูปที่ 3.3.7 ความสัมพันธ์ของเทอม $\frac{\epsilon_{mf}^3}{1 - \epsilon_{mf}} \phi_s^2$ กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง

ความเร็วต่ำสุดจากสมการ (3.3.6) เขียนใหม่ได้เป็น

$$U_{mf}^2 = \frac{CD_p^2 g (\rho_s - \rho_f)}{\mu} \quad (3.3.8)$$

โดยที่ C เป็นฟังก์ชันบอกค่า Reynolds number

และสำหรับของไหลที่มีค่า $Re < 5.0$ (มีค่าเท่ากับ $0.0007 Re^{-0.063}$) เมื่อแทนค่า g จะได้ว่า

$$U_{mf} = \frac{688 D_p^{1.82} (\rho_s - \rho_f)^{0.94}}{\mu^{0.88}} \quad (3.3.9)$$

Wen and Yu [31] ได้เสนอผลคูณของช่องว่างต่ำสุด และแฟคเตอร์รูปร่างมีค่าคงที่และอาจสังเกตได้จากการทดลอง โดยใช้วัตถุชนิดต่างๆกันบรรจุลงในเบดแล้วสรุปว่าวัตถุอย่างหนึ่งก็จะมีสัดส่วนช่องว่างอันหนึ่ง ซึ่งกำหนดไว้ว่า

$$\frac{1}{\phi_s \epsilon_{mf}^3} \approx 14 \quad \text{และ} \quad \frac{1 - \epsilon_{mf}}{\phi_s^2 \epsilon_{mf}^3} \approx 11 \quad (3.3.10)$$

ดังนั้นจากสมการ (3.3.5) จะเปลี่ยนเป็น

$$\frac{D_p U_{mf} \rho_f}{\mu} = (33.7)^2 + 0.0408 \frac{D_p^3 \rho_f (\rho_s - \rho_f) g_c^{\frac{1}{2}}}{\mu^2} - 33.7 \quad (3.3.11)$$

สำหรับเบดที่มีขนาดของเม็ดของแข็งขนาดเล็กความเร็วต่ำสุดสามารถคำนวณได้ใหม่เป็น

$$U_{mf}^2 = \frac{D_p^2 (\rho_s - \rho_f) g_c}{1650 \mu} \quad (3.3.12)$$

เมื่อ $Re_p < 20$

สำหรับเบดที่มีเม็ดของแข็งขนาดใหญ่ความเร็วต่ำสุดหาได้จาก

$$U_{mf}^2 = \frac{D_p^2 (\rho_s - \rho_f) g_c}{24.5 \rho_f} \quad (3.3.13)$$

เมื่อ $Re > 1000$

Miller and Logwinuk [26] ได้ทำการทดลองกับวัสดุหลายชนิดแล้วพยายามรวบรวมตัวแปรเป็นกลุ่มแบบไม่มีหน่วยแล้วจึงดัดแปลงมาเพื่อคำนวณหาความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชันดังนี้

$$U_{mf} = \frac{0.00125 D_p^2 (\rho_s - \rho_f)^{0.9} \rho_f^{0.1} g}{\mu} \quad (3.3.14)$$

Vanheerden, Nobel and Van Krevelen [30] ได้ทำการทดลองกับวัสดุ 3 ชนิดคือ Carborundum ถ่านโค้ก และเหล็กออกไซด์ แล้วสรุปผลทดลองออกมาได้ดังนี้

$$U_{mf} = \frac{0.00123 D_p^2 \rho_b g}{B \mu} \quad (3.3.15)$$

เมื่อ B คือแฟกเตอร์รูปร่างที่ถูก generalized และมีขนาดแตกต่างกันดังนี้

วัสดุ	ค่า B
Carborundum	0.62-0.78
ถ่านโค้ก	0.39-0.58
เหล็กออกไซด์	0.59

ค่า B เกิดจากการรวมค่าช่องว่างและรูปร่างของวัสดุ นอกจากนี้เขายังกล่าวอีกว่าสัดส่วนช่องว่างภายในเบดไม่ขึ้นกับลักษณะรูปร่างของวัตถุนั้นๆ เลย

Johnson [21] ได้ทดลองกับก๊าซโดยใช้ของแข็งขนาดต่างๆกัน เขาได้พยายามศึกษาถึงคุณสมบัติต่างๆของเบดอย่างเช่น ความหนาแน่นและความหนืดของเบดในขณะที่ยังอยู่ในลักษณะฟลูอิดไดเซชันเข้าได้เสนอกฎเกณฑ์ไว้ 2 อย่างคือ ค่าการไหลของ gas มีค่า Reynold number น้อยกว่า 2 จะได้ว่า

$$U_{mf} = \frac{D_p^2 \phi_s^2 g (\rho_s - \rho_g)}{18\mu} - \frac{\varepsilon^3}{1 + 0.5(1 - \varepsilon)} \quad (3.3.16)$$

และในเบดที่มีค่า Reynold number มากกว่า 2 หมายความว่าขนาดของแข็งใหญ่ขึ้น ความเร็วต่ำสุดของก๊าซที่จะทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันหาได้จาก

$$U_{mf} = 0.171 D_p \phi_s = \left(\frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \right)^3 \frac{g^2 \rho_s \varepsilon^6}{\mu(1 - \varepsilon) + 0.5(1 - \varepsilon)} \quad (3.3.17)$$

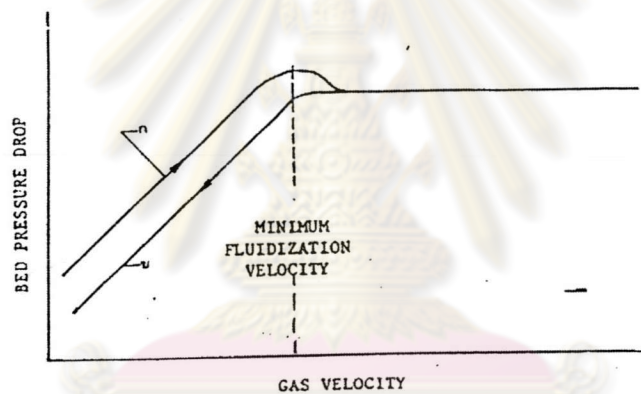
Baerg, Klassen and Gisher [17] มีวิธีการทดลองที่แปลกไปจากคนอื่นซึ่งได้ศึกษาตัวไฮโดรไดนามิกของเบดด้วยแล้วพบว่า

$$U_{mf} = 1.8 \times 10^2 (D_p \rho_b)^{1.23} \quad (3.3.18)$$

โดยที่สัญลักษณ์ต่างๆ ตั้งแต่สมการที่ 3.3.3 ถึงสมการที่ 3.3.18 มีรายละเอียดดังนี้

3.3.6 การทดลองหาค่าความเร็วต่ำสุดของของไหลที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน

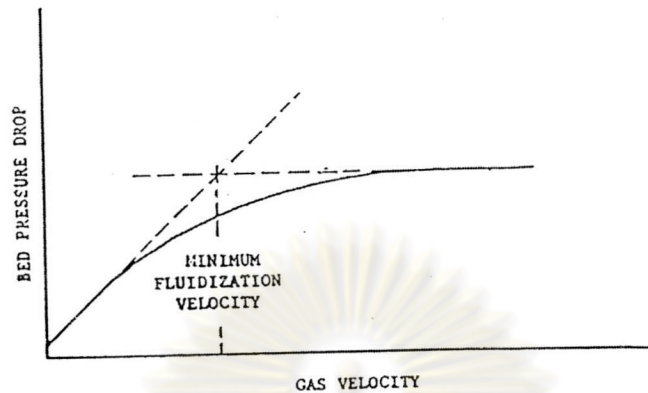
ในการหาค่าความเร็วต่ำสุดของของไหลที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันนั้น นอกจากจะได้จากการคำนวณแล้วสามารถหาได้จากวิธีการทดลองอีกด้วย ซึ่งสำหรับวิธีการทดลองมีรายละเอียดดังนี้คือ ทำการทดลองและบันทึกค่าความเร็วของของไหลที่ไหลผ่านเบดและค่าความดันตกภายในเบดแล้วนำมาเขียนกราฟในกระดาษฟลอก-ลอค ค่าของ U_{mf} สามารถหาได้จากกราฟดังแสดงในรูปที่ 3.3.8 และรูปที่ 3.3.9 ซึ่งรูปที่ 3.3.8 นั้นเป็นการทดลองของเม็ดของแข็งที่มีขนาดใกล้เคียงกัน จะสังเกตเห็นว่าเส้นกราฟมีความแตกต่างระหว่างขณะเพิ่มและลดความเร็วของของไหลเส้นกราฟขณะเพิ่มความเร็ว (เส้น ก.) ในบริเวณที่ใกล้เคียงกับความเร็ว U_{mf} ความดันในเบดจะโดดสูงขึ้น (Bump) เนื่องจากในช่วงนี้จะต้องใช้แรงดันมากเป็นพิเศษในการเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดของแข็งให้แยกออกจากกัน เมื่อเกิดการจัดเรียงตัวเรียบร้อยแล้วความดันตกจะค่อยๆ ลดลงและคงที่ตลอดในช่วงความเร็วของของไหลช่วงหนึ่ง



รูปที่ 3.3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกภายในเบดกับความเร็วของของไหลที่ไหลผ่านเบดเมื่อเม็ดของแข็งมีขนาดใกล้เคียงกัน

สำหรับเส้นกราฟขณะลดความเร็วลงนั้น (เส้น ข.) ในช่วงที่มีความเร็วเกินกว่าความเร็ว U_{mf} เส้นกราฟจะใกล้เคียงกับ เส้น ก. แต่ในช่วงหลัง เส้น ข. จะขนานกับ เส้น ก. ความดันตกขณะลดความเร็วจะมีค่าน้อยกว่า ทั้งนี้เป็นเพราะขณะที่เบดเปลี่ยนจากฟลูอิดไดซ์เบดเข้าสู่เบดนิ่งนั้น เม็ดของแข็งจะเกิดการจัดเรียงตัวเองแล้วทำให้ไม่ต้องสูญเสียพลังงานในการจัดช่องว่างในเบดให้เป็นระเบียบอีก และถ้าทำการทดลองซ้ำในเบดเดิมอีก จะพบว่าเส้นกราฟขณะที่เพิ่มความเร็วของของไหลจะใกล้เคียงกับ เส้น ข. ขณะลดความเร็วในการทดลองครั้งแรก

สำหรับเม็ดของแข็งที่มีการกระจายขนาดที่ดี (Size Distribution) ลักษณะของกราฟที่ได้จะราบเรียบกว่าดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.3.9



รูปที่ 3.3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกภายในเบดกับความเร็วของของไหลที่ไหลผ่านเบดเมื่อเม็ดของแข็งมีการกระจายขนาดที่ดี

3.3.7 ความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งในของไหลอยู่นิ่ง (U_t)

ในฟลูอิดไดเซชันนั้นมีความเร็วของของไหลอยู่ 2 ขอบเขตคือ ขอบเขตชนิดแรกได้แก่ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชัน ขอบเขตชนิดที่สองคือ ความเร็วของของไหลที่เพิ่มขึ้นจากความเร็วต่ำสุดจนกระทั่งทำให้เม็ดของแข็งหลุดออกจากหอตกลงไป ความเร็วอันนี้จะมีขนาดเท่ากับความเร็วตกอิสระของแข็งพอดี

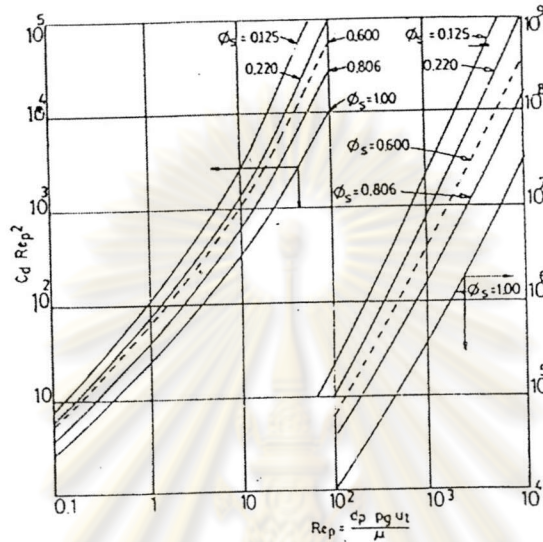
จากการศึกษาเกี่ยวกับการไหลของของไหลพบว่าความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งในของไหลที่อยู่นิ่งเท่ากับ

$$U_t = \left(\frac{4gD_p(\rho_s - \rho_f)}{3\rho_f C_d} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.3.19)$$

ค่า Reynolds number ที่ความเร็วตกอิสระคือ $Re_p = \frac{D_p \rho_f U_t}{\mu}$

$$C_d Re_p^2 = \frac{4g_c D_p^3 \rho_f (\rho_s - \rho_f)}{\mu} \quad (3.3.20)$$

Brown et al. [18] ได้หาความสัมพันธ์ของ $C_d Re_p^2$ กับ Re_p โดยผลการคำนวณได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.3.10



รูปที่ 3.3.10 ความสัมพันธ์ของ $C_d Re_p^2$ และ Re_p

วิธีการหาค่า U_t นั้นอันดับแรกคำนวณจากคุณสมบัติทางกายภาพของของแข็งและของไหลคำนวณหา $C_d Re_p^2$ ได้แล้วก็ตรวจหาค่า Re_p จากรูปที่ 3.3.10 ได้ทันทีจากนั้นก็คำนวณหาค่า U_t ต่อไปได้

สัมประสิทธิ์ของการเสียดทาน (Drag Coefficient) ได้มีนักวิทยาศาสตร์หลายท่านตรวจหาจากเม็ดทรงกลมแล้วพบว่าค่าสัมประสิทธิ์นั้นแปรผันตามขนาดของเม็ดของแข็งดังนี้

$$C_d = \frac{24}{Re_p} \quad \text{สำหรับ } Re_p < 0.4 \quad (3.3.21)$$

$$C_d = \frac{10}{Re_p^{1/2}} \quad \text{สำหรับ } 0.4 < Re_p < 500 \quad (3.3.22)$$

$$C_d = 0.43 \quad \text{สำหรับ } 500 < Re_p < 200,000 \quad (3.3.23)$$

แทนค่าในสมการ (3.3.19) จะได้ค่าของ U_t ดังนี้

$$U_t = \frac{g(\rho_s - \rho_f)D_p^2}{18\mu} \quad \text{สำหรับ } Re_p < 0.4 \quad (3.3.24)$$

$$U_t = \left[\frac{4(\rho_s - \rho_f)^2 g_c^2}{225\rho_s\mu} \right]^{\frac{1}{3}} D_p \quad \text{สำหรับ } 0.4 < Re_p < 500 \quad (3.3.25)$$

$$U_t = \left[\frac{3.1g_c(\rho_s - \rho_f)D_p}{\rho_f} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{สำหรับ } 500 < Re_p < 200,000 \quad (3.3.26)$$

ข้อควรระวังสำหรับการทำงานในฟลูอิดไดซ์เบดคือ การใช้ความเร็วของของไหลที่ผ่านเข้าไปในเบดไม่ควรให้มีความเร็วเกินกว่าความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็ง แต่ถ้าต้องการจะนำส่งเม็ดของแข็งจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งจึงควรใช้ความเร็วสูงกว่า U_t

Pinchbeck and Popper [28] ได้พยายามสร้างสมการของอัตราส่วน U_t/U_{mf} ของเม็ดทรงกลมกับเทอม $C_d Re_t^2$ โดยถ้าเราใช้ค่า U_{mf} ที่คำนวณได้จากสมการ (3.3.12) และ (3.3.13) จะสร้างความสัมพันธ์ได้ดังนี้

สำหรับเม็ดของแข็งมีขนาดเล็กคือ มีค่า $Re_p < 20$

$$U_{mf} = \frac{D_p^2(\rho_s - \rho_f)g_c}{1650\mu}$$

สำหรับเม็ดของแข็งมีขนาดใหญ่คือ มีค่า $Re_p > 100$

$$U_{mf}^2 = \frac{D_p(\rho_s - \rho_f)g_c}{24.5\rho_f}$$

เราจะพบว่าค่าของ U_t/U_{mf} นั้นขึ้นอยู่กับขนาดของเม็ดของแข็งคือ

สำหรับเม็ดของแข็งขนาดเล็ก ($Re_p < 0.4$)

$$\frac{U_t}{U_{mf}} = \frac{(U_t \text{ จากสมการ 3.3.24})}{(U_{mf} \text{ จากสมการ 3.3.12})} \quad (3.3.27)$$

$$= 91.6$$

และสำหรับเม็ดของแข็งขนาดใหญ่ ($Re_p < 1000$)

$$\frac{U_t}{U_{mf}} = \frac{(U_t \text{ จากสมการ 3.3.24})}{(U_{mf} \text{ จากสมการ 3.3.13})} \quad (3.3.28)$$

$$= 8.72$$

3.3.8 ความเร็วที่ใช้ในการฟลูอิดไดซ์ (U_f)

โดยปกติแล้วค่าความเร็วที่ใช้ในการฟลูอิดไดซ์ จะมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 2-5 เท่าของความเร็วต่ำสุดของของไหลที่ทำให้เกิดการฟลูอิดไดซ์ขึ้น ซึ่งความเร็วดังกล่าวมีผลทำให้เกิดลักษณะของการผสมกันที่ดีของเบดโดยจะทำให้เบดมีลักษณะเป็นเบดแบบปั่นป่วน (Turbulent Bed)

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4 การเผาไหม้ในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด [4]

3.4.1 หลักการและรายละเอียดของการเผาไหม้ในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด

การเผาไหม้ในเตาฟลูอิดไดซ์เบดเกิดขึ้นโดยเชื้อเพลิงจะถูกพองให้ลอยตัวด้วยก๊าซหรืออากาศที่เข้าสู่เตาโดยผ่านแผ่นกระจายลม เชื้อเพลิงจะมีสภาพคล้ายของไหล ภายในเตาเผาจะมีเบดที่ร้อนเช่น ทรายหรือเถ้าที่เกิดจากการเผาไหม้ เพื่อช่วยทำให้เกิดการผสมผสานของเชื้อเพลิงกับออกซิเจนได้ดี และช่วยทำให้เถ้าที่เกาะกับผิวเชื้อเพลิงนั้นหลุด ผิวของเชื้อเพลิงจึงสามารถสัมผัสกับออกซิเจนได้ตลอดเวลาทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ดี ซึ่งจะต่างจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งทั่วไป ซึ่งจะเกิดการเผาไหม้ที่ผิวของเชื้อเพลิงก่อน จากนั้นบริเวณของการเกิดปฏิกิริยาก็จะค่อยๆ เคลื่อนเข้าไปข้างในโดยส่วนที่เหลือที่เกิดจากการเผาไหม้คือ เถ้าซึ่งเป็นสารเฉื่อยทำให้เชื้อเพลิงมีโอกาสสัมผัสกับออกซิเจนลดลง ดังนั้นเมื่อเวลาผ่านไปอัตราการเผาไหม้จะค่อยๆ ลดลงจนเผาไหม้หมดทั้งก้อน

ระบบการเผาไหม้โดยใช้เตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด เป็นเทคนิคที่น่าสนใจ เนื่องจากเผาไหม้เชื้อเพลิงคุณภาพต่ำได้ดี ให้ประสิทธิภาพในการเผาไหม้ดี สามารถควบคุมปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ให้อยู่ในเกณฑ์ที่ไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม

3.4.2 กระบวนการเผาไหม้ กากตะกอน ในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด

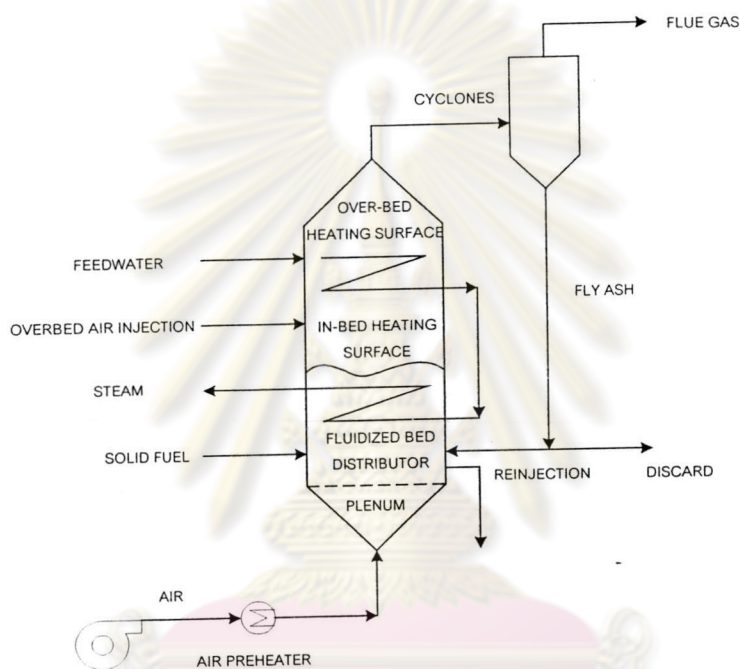
สำหรับกระบวนการเผาไหม้ กากตะกอน ในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด มีขั้นตอนดังนี้

- 3.4.2.1 Drying เป็นการกำจัดความชื้นในอนุภาคกากตะกอนขณะเริ่มต้นรับความร้อนในเตาเผา
- 3.4.2.2 Devolatilization เป็นขั้นตอนการสลายตัวของกากตะกอนเกิดเป็นสารระเหย
- 3.4.2.3 Ignition of Volatile เป็นขบวนการกระทำให้เกิดการจุดประกายของสารระเหยที่ถูกปล่อยออกมาและอยู่ล้อมรอบอนุภาคของ กากตะกอน
- 3.4.2.4 Combustion of Volatile เป็นขบวนการเผาไหม้สารระเหย ทำให้เกิดเปลวไฟขึ้นรอบอนุภาคกากตะกอน
- 3.4.2.5 Ignition of Char Particle เป็นขบวนการการจุดประกายบนผิวหน้าของถ่านที่เหลือ โดยเริ่มจากเป็นจุดเล็กๆ ที่ผิวด้านนอกแล้วค่อยๆ ขยายออกไปจนเกิดทั่วทั้งอนุภาค

3.4.2.6 Combustion of Residual Char Particle เป็นขบวนการเผาไหม้อนุภาคถ่านที่เหลือหลังจากที่สารระเหย ระเหยออกจากอนุภาค Sludge บางส่วนหรือหมดแล้ว เมื่อเผาไหม้หมดจะเหลือขี้เถ้า

3.4.3 ส่วนประกอบของระบบการเผาไหม้ฟลูอิดไดซ์เบด

รูปร่างลักษณะของเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดนั้นคล้ายกับเตาเผาทั่วไปที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันจะประกอบด้วย ห้องเผาไหม้และระบบสนับสนุนต่างๆ ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.4.1



รูปที่ 3.4.1 ส่วนประกอบของเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดขั้นพื้นฐาน

สำหรับระบบการเผาไหม้ฟลูอิดไดซ์เบด สามารถแบ่งออกเป็นระบบย่อยได้คือ ห้องเผาไหม้ ระบบป้อนเชื้อเพลิง ระบบควบคุม ระบบถ่ายเทความร้อน ระบบจุดเตา ระบบกำจัดฝุ่นละออง และระบบระบายเถ้า โดยรายละเอียดของระบบต่างๆมีดังนี้

3.4.3.1 ห้องเผาไหม้

โดยทั่วไปเป็นบริเวณที่เชื้อเพลิงเกิดการสันดาปแต่สิ่งหนึ่งที่ทำให้ห้องเผาไหม้ในระบบนี้แตกต่างไปจากห้องเผาไหม้ทั่วไปก็คือ ที่ส่วนล่างของห้องเผาไหม้มีแผ่นกระจายอากาศติดตั้งอยู่ แผ่นกระจายอากาศนี้ทำหน้าที่สำคัญ 2 ประการคือ รองรับมวลสารทั้งหมดที่ประกอบกันเป็นเบด และกระจายอากาศที่ช่วยในการสันดาปและทำให้เกิดสภาพฟลูอิดไดซ์เบดให้สม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดของห้องเผาไหม้ แผ่นกระจายอากาศนี้ต้องสามารถทนต่อการใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ ปัญหาในการออกแบบแผ่นกระจายอากาศก็คือ ปัญหาการโก่งงอและปัญหาการเปลี่ยนรูปร่างเนื่องจากความร้อน อีกทั้งระบบแผ่นกระจายอากาศเกิดการอุดตัน

3.4.3.2 ระบบป้อนเชื้อเพลิง

มีหลายวิธีด้วยกันที่สามารถป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ได้เช่น อาจจะใช้ป้อนด้วยสกรู (Screw Feeder) สโตก-สเปรดเดอร์ (Stoke-Spreader) และการป้อนด้วยอากาศ (Pneumatic Feed) เชื้อเพลิงแข็งอาจป้อนเข้าสู่เตาเผาได้ที่ตำแหน่งต่าง ๆ กัน เช่น ป้อนที่ด้านข้างของผนังเตาเหนือเบด และได้เบดหรือติดตั้งหัวฉีดเชื้อเพลิงในเบด

3.4.3.3 ระบบควบคุม

การควบคุมการเผาไหม้ในระบบนี้อาจทำได้โดยปรับความสูงของเบดปรับอัตราส่วนของเชื้อเพลิง/อากาศ หรืออาจทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์เบดเป็นส่วนๆในห้องเผาไหม้

3.4.3.4 ระบบถ่ายเทความร้อน

เอกลักษณ์อันหนึ่งของระบบการเผาไหม้นี้ก็คือ สามารถจัดวางท่อถ่ายเทความร้อนไว้ภายในเบด ส่วนพื้นที่รับความร้อนอื่นๆก็คล้ายคลึงกันกับระบบทั่วไปคือจัดวางตามผนังห้องเผาไหม้ และในฟรีบอร์ด (Free Board) เหนือเบด

3.4.3.5 ระบบจุดเตา

การจุดเตาสามารถกระทำได้หลายวิธี เช่น อาจใช้หัวเผาให้ความร้อนหรือผสมอากาศกับก๊าซหุงต้มแล้วจุดเหนือแผ่นกระจายอากาศหรืออาจใช้อากาศร้อนป้อนผ่านแผ่นกระจายอากาศให้ความร้อนแก่เบตหรือด้วยวิธีการใดๆ ที่สามารถทำให้เบตมีอุณหภูมิสูงถึงระดับที่ต้องการ

3.4.3.6 ระบบกำจัดฝุ่นละออง

โดยทั่วไปนิยมใช้ไซโคลน (Cyclone) แยกอนุภาคเล็กๆ ที่ปลิวมากับก๊าซร้อน และป้อนกลับสู่เตาเผาอีก อาจใช้ Bag Filter House หรือ Electrostatic Precipitator เพื่อกำจัดฝุ่นและอนุภาคที่เล็กลงมากซึ่งไซโคลนไม่สามารถกำจัดได้ และสำหรับเถ้าภายในเตาสามารถระบายออกจากเตาโดยท่อระบาย (Bed Drain Pipe) ซึ่งติดตั้งอยู่ภายในเบต เนื่องจากเถ้าภายในเตาอยู่ในสภาพฟลูอิดไดซ์เบตด้วย ดังนั้นจึงเป็นการสะดวกที่จะระบายเถ้าออกจากเตาเผาผ่านท่อระบายซึ่งสะดวกมาก

3.4.4 อิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้และการถ่ายเทความร้อนในระบบการเผาไหม้ฟลูอิดไดซ์เบต

3.4.4.1 ขนาดของเชื้อเพลิง

เป็นที่ยอมรับกันว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในเบตเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของอนุภาคในเบต โดยพบว่าเมื่อลดขนาดอนุภาคลงต่ำกว่า 60 เมช สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มขึ้นน้อยมาก แต่ในทางตรงข้ามสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อขนาดของอนุภาคใหญ่กว่า 10 เมช และยังพบอีกด้วยว่าที่อุณหภูมิภายในเบตประมาณ 750-800°C การลดขนาดของเชื้อเพลิงจาก 3.2-0.85 mm. ลงเหลือ 0.8-0.5 mm. สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะสูงขึ้นจาก 225-285 Watt/(m²-°C) เป็น 320 Watt/(m²-°C)

3.4.4.2 ความเร็วของอากาศที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์เบด

Leon [24] พบว่าประสิทธิภาพการเผาไหม้ลดลงเมื่อความเร็วของอากาศที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์เบดเพิ่มขึ้น สาเหตุสำคัญก็คือเมื่อความเร็วของอากาศสูงขึ้นปริมาณของอนุภาคเชื้อเพลิงที่หลุดลอยออกจากเตาก็เพิ่มขึ้น

Frass [20] ทำการทดลองหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในเบดที่อุณหภูมิ 700 °C ที่ความเร็วของอากาศ 25-65 cm/s โดยมีอนุภาคขนาด 460 μm เป็นเบดพบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากเบดไปยังท่ออากาศเพิ่มขึ้นจาก 227 $\text{Watt}/(\text{m}^2\text{-}^\circ\text{C})$ ที่ความเร็ว 25 cm/s เป็น 483 $\text{Watt}/(\text{m}^2\text{-}^\circ\text{C})$ ที่ความเร็ว 50 cm/s หลังจากความเร็วนี้แล้วสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะลดลง

3.4.4.3 อุณหภูมิการเผาไหม้

โดยทั่วไปแล้วเป็นที่ยอมรับกันว่าผลของอุณหภูมิภายในเบดที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนนั้นส่วนใหญ่เป็นการแผ่รังสี Keating and Wright [22] ได้ทำการคำนวณจากข้อมูลการทดลองที่ได้จากสถาบัน B.C.U.R.A พบว่าที่อุณหภูมิ 800 °C อนุภาคในเบดมีขนาด 3.25-0.5 mm. ส่วนของการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีสูงถึง 30% Kharchonko [23] พบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นมีลักษณะเป็นเส้นตรงในช่วงอุณหภูมิของเบดระหว่าง 300-1,000 °C

3.4.5 การจำแนกประเภทระบบการเผาไหม้ฟลูอิดไดซ์เบด

การจำแนกประเภทระบบการเผาไหม้ฟลูอิดไดซ์เบด สามารถจำแนกได้จากความดันในเตาเผาไหม้และความเร็วของอากาศที่ใช้ทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์เบด นอกจากนี้แล้วยังสามารถจำแนกได้จาก ความลึกของเบด ลักษณะการใช้งาน ชนิดของแผ่นกระจายอากาศ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4.5.1 การจำแนกจากความดันในเตาเผาไหม้

ระบบการเผาไหม้ฟลูอิดไดซ์เบดที่ความดันบรรยากาศ (Atmospheric Fluidized-Bed Combustion) ซึ่งระบบนี้ความดันในเตาเผาจะสูงกว่าความดันบรรยากาศเล็กน้อย เนื่องจากอากาศที่อัดผ่านแผ่นกระจายอากาศต้องมีความดันสูงพอเพียงที่ทำให้เกิดสภาพฟลูอิดไดซ์เบดขึ้น

ระบบการเผาไหม้ฟลูอิดไดซ์เบดที่สถานะความดันมีค่าสูง (Pressurized Fluidized-Bed Combustion) ความดันในเตาเผาจะสูงกว่าความดันบรรยากาศประมาณ 10-15 เท่า ข้อดีของระบบนี้ก็คือลักษณะการเกิดฟลูอิดไดซ์ดีขึ้น และก๊าซร้อนจากการเผาไหม้สามารถนำมาใช้กับเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์โบไน์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบให้สูงขึ้นอย่างไรก็ตามการเผาไหม้ระบบนี้ยังอยู่ในขั้นพัฒนาเท่านั้น

3.4.5.2 การจำแนกความเร็วของอากาศที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์เบด

ระบบการเผาไหม้ฟลูอิดไดซ์เบดธรรมดา (Classical Fluidized-Bed Combustion) ระบบนี้ความเร็วสัมพันธ์ของอากาศกับเม็ดเชื้อเพลิงค่อนข้างต่ำ เบดมักมีลักษณะเป็น Bubbling-Bed การหลุดลอยของเม็ดเชื้อเพลิงตามกระแสการไหลของอากาศน้อย

ระบบการเผาไหม้ฟลูอิดไดซ์เบดหมุนเวียน (Circulating หรือเรียกว่า Fast Fluidized-Bed Combustion) ความเร็วสัมพันธ์ของอากาศกับเม็ดเชื้อเพลิงในระบบนี้ค่อนข้างสูงทำให้เชื้อเพลิงลอยไปตามกระแสการไหลของอากาศไม่สามารถบ่งบอกระดับของเบดที่แน่นอนได้ประเภทนี้จำเป็นต้องมีการป้อนเชื้อเพลิงที่หลุดลอยไปกลับเข้าสู่เตาเผาอีก

3.4.6 ข้อดีของระบบการเผาไหม้ฟลูอิดไดซ์เบด

สำหรับข้อดีของระบบการเผาไหม้ฟลูอิดไดซ์เบดมีดังนี้

3.4.6.1 อุณหภูมิการเผาไหม้สม่ำเสมอโดยทั่วกันตลอดทั้งเบด ไม่เกิดจุดร้อน (Hot Spot) ภายในเตา

3.4.6.2 สามารถกำจัด ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ให้อยู่ในปริมาณที่ไม่ทำให้เกิดปัญหามลพิษ และกระบวนการกำจัดนี้เกิดขึ้นในระหว่างการเผาไหม้เชื้อเพลิง ไม่จำเป็นต้องอาศัยอุปกรณ์ภายนอกเพิ่มเติม

3.4.6.3 อุณหภูมิการเผาไหม้ค่อนข้างต่ำ โดยปกติจะอยู่ระหว่าง 750-900 °C ซึ่งอุณหภูมินี้ต่ำกว่าอุณหภูมิการหลอมละลายของเถ้า จึงไม่ก่อให้เกิดสแลค (Slag) ภายในเตาเผา และปัญหาการระเหยของสารประกอบอัลคาไลด์ที่จับตัวบนผนังเตา หรือบนท่อน้ำยังลดลงอีกด้วย

3.4.6.4 ไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) ที่เกิดขึ้นน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการเผาไหม้ระบบอื่น

3.4.6.5 สามารถจัดวางท่อน้ำภายในเบดได้ จากการทดลองพบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในเบดสูงกว่าในช่วงฟริบอर्ड ประมาณ 5 เท่า ซึ่งเป็นผลให้ลดพื้นที่ถ่ายเทความร้อนลงได้มาก

3.4.6.6 สามารถเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีคุณภาพต่ำ ซึ่งได้แก่เชื้อเพลิงที่มีปริมาณของธาตุซัลเฟอร์ ความชื้นและเถ้า รวมเป็นองค์ประกอบอยู่สูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้เพราะการสันดาปในเบดเป็นไปอย่างช้าๆ (Slow Combustion) จึงมีโอกาสเผาคาร์บอนในเม็ดเชื้อเพลิงได้หมดกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับลักษณะการเผาไหม้แบบฟัลเวอร์ไรซ์



ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย