



บทที่ 2

## วารสารปริทรรศน์

### 2.1 ความเป็นมาของการเผาไหม้ในฟลูอิดไคซ์เบด (1,2,3,4,5)

หลังสงครามโลกครั้งที่ 2 ได้เกิดวิกฤติการณ์ทางพลังงานขึ้น ประเทศต่าง ๆ ได้ศึกษาค้นคว้าหาเทคนิคที่ใช้ในการเผาไหม้ถ่านหินเพื่อให้ได้ผลดีที่สุด แทนเทคนิคการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่เป็นผงแบบพ่น (Pulverised fuel combustion) ซึ่งใช้ในสมัยนั้น เช่น ทางอังกฤษได้หันมาสนใจค้นคว้าเทคนิคการเผาไหม้แบบฟลูอิดไคซ์ (fluidized combustion) เพื่อใช้ในการผลิตไฟฟ้ามากขึ้น

งานค้นคว้าและปรับปรุงการเผาไหม้โดยใช้ฟลูอิดไคซ์นั้นได้เริ่มในประเทศอังกฤษ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2506 ภายใต้หน่วยงานต่าง ๆ ดังนี้คือ NCB (National Coal Board), CEGB (Central Electricity Generating Board) และ BCURA (British Coal Utilization Research Association) ในขณะเดียวกัน bureau of mines ในสหรัฐอเมริกาและออสเตรเลีย ก็ได้สนใจในการใช้ฟลูอิดไคซ์ในการเผาไหม้เช่นกัน

สรุปได้ว่าในระหว่างปี พ.ศ. 2493-2503 ได้มีการสร้างขบวนการเผาไหม้โดยใช้เทคนิคทางฟลูอิดไคซ์ขึ้นขึ้นในประเทศที่มีถ่านหิน วัตถุประสงค์ส่วนใหญ่ก็เพื่อที่จะนำเอาเทคนิคทางฟลูอิดไคซ์มาเผาไหม้ถ่านหินพวกที่มีเกรดต่ำและเป็นผง นอกจากนั้นได้มีผู้ทดลองหาคณะสมบัติของการถ่ายเทความร้อนของฟลูอิดไคซ์เบดโดยเอาท่อสำหรับทำไอน้ำใส่เข้าไปภายในเบด

ในตอนต้นของปี พ.ศ. 2493 ได้มีการอธิบายถึงขบวนการเผาไหม้ต่าง ๆ และศึกษาค้นคว้าให้ก้าวหน้าขึ้น การค้นคว้าส่วนใหญ่ก็เพื่อหาข้อดีในการนำความร้อนที่สูงของฟลูอิดไคซ์เบด มาใช้ประโยชน์นั่นเอง

ในตอนแรก CEGB, BCUR กับ coal research establishment, national coal board ได้สร้างเตาเผา (combustor) ขึ้นมาเพื่อศึกษา จลศาสตร์ของการเผาไหม้ ลักษณะของฟลูอิดไอเซชัน (fluidization characteristic) ปริมาณซัลเฟอร์ที่มียึด (sulphur retention) และการถ่ายเทความร้อนระบบการป้อน และเอาพวกเตาออกนำเอาอนุภาคเล็ก ๆ กลับเข้าไปในเตาใหม่รวมทั้งการออกแบบตัวกระจายที่เหมาะสม การวางท่อภายในเตากับลักษณะของฟลูอิดไอซ์เบด

ในปี พ.ศ. 2512 BCURA ได้สร้างหม้อน้ำ (boiler) โดยใช้เทคนิคทางฟลูอิดไอเซชัน ซึ่งสามารถผลิตไอน้ำได้ 3,600 กิโลกรัม/ชั่วโมง<sup>(1)</sup>

NCB ได้สร้างเครื่องมือสำหรับการเผาไหม้โดยใช้เทคนิคทางฟลูอิดไอเซชันผลิตไฟฟ้า 1 เมกกะวัตต์ เพื่อศึกษาถึงการถ่ายเทความร้อนโดยใช้ท่อขนาดต่าง ๆ ภายในเบด และตัวกระจาย (distributor) ต่าง ๆ กัน มีการศึกษาเกี่ยวกับการอุดตันและสึกกร่อน (fouling corrosion and erosion) ของเครื่องมือที่ทำจากเหล็กที่แตกต่างกัน ต่อมาก็ได้มีการสร้างให้ขนาดของเครื่องมือใหญ่ขึ้นเรื่อย ๆ

ในประเทศสหรัฐอเมริกาได้มีการค้นคว้าและวิจัยการเผาถ่านหินคุณภาพต่ำ เพื่อใช้ ในโรงงานขนาดใหญ่โครงการทดลองเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าจากเตาฟลูอิดไอซ์เบด ขนาด 30 เมกกะวัตต์ ที่ Rivesille<sup>(6)</sup> ซึ่งได้เริ่มโครงการตั้งแต่ปี พ.ศ. 2520 ได้แสดงให้เห็นว่าเตาฟลูอิดไอซ์เบดขนาดใหญ่นั้นสามารถใช้งานได้เป็นอย่างดี โครงการผลิตไอน้ำเพื่อใช้ในเครื่องทำความร้อนที่มหาวิทยาลัย Georgetown ซึ่งเริ่มโครงการมาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2521 สามารถผลิตไอน้ำได้ถึงจำนวน 45360 กิโลกรัม/ชั่วโมง นอกจากนี้ T.V.A. (Tennessee Valley Authority) ซึ่งเป็นองค์การที่ผลิตและจำหน่ายไฟฟ้าที่ใหญ่ที่สุดทางภาคใต้ของ ประเทศสหรัฐอเมริกา ได้มีโครงการสร้างโรงไฟฟ้าขนาด 300 เมกกะวัตต์ โดยใช้เทคนิคทางฟลูอิดไอเซชันในการเผาไหม้ (Fluidized bed Combustion)

สำหรับประเทศไทยเริ่มมีการปรับปรุงเผาไหม้ประสิทธิภาพที่ตีมาหลายปีแล้ว โดยที่เชื้อเพลิงส่วนใหญ่จะเป็นไม้หรือถ่าน ส่วนกรณีเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพต่ำเช่น แกลบ หรือขาน้อย นั้นก็ใช้เป็นเชื้อเพลิงบ้างแต่ไม่แพร่หลาย ปัจจุบันนี้ไม้หรือถ่านเป็นเชื้อเพลิงที่หายากขึ้นทุกที และ แกลบก็เป็นวัสดุเหลือใช้ซึ่งควรจะนำมาใช้ให้เป็นประโยชน์ ก็ได้มีการนำเอาวิธีการเผาไหม้ใน ฟลูอิดไชเบรคมาใช้ในการเผาไหม้พวกเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพต่ำเหล่านี้ วิธีการนี้จะทำให้ประสิทธิภาพ ที่ดีกว่าการเผาไหม้แกลบในเตาเผาแบบเปิดธรรมดา นอกจากนั้นยังทำให้สภาพของอากาศ ที่ออกจากปล่องไฟเป็นพิษน้อยที่สุดด้วย

## 2.2 แกลบ

### 2.2.1 ผลผลิต (7)

แกลบเป็นผลผลิตพลอยได้จากการสีข้าวเปลือก ดังนั้นปริมาณของแกลบจึงเป็น สัดส่วนโดยตรงกับปริมาณข้าวเปลือกที่ผลิตได้ ในปี พ.ศ. 2522-2523 ปริมาณผลผลิตข้าวทั้งประเทศ มี 14.65 ล้านตัน ซึ่งเป็นผลผลิตจากภาคตะวันออกเฉียงเหนือสูงถึงร้อยละ 38.48 รองลงมาคือ ภาคเหนือร้อยละ 29.12 ภาคกลางร้อยละ 24.98 และภาคใต้น้อยที่สุดเพียงร้อยละ 7.42 ดังแสดงในตารางที่ 2-1

โดยทั่วไปปริมาณแกลบที่ได้จากการสีข้าวจะประมาณร้อยละ 22.5-25.2 ปริมาณข้าวเปลือกโดยน้ำหนัก ดังนั้นถ้าใช้ค่าเฉลี่ยอัตราการผลิตแกลบร้อยละ 23.85 จะคำนวณได้ว่า ในปี พ.ศ. 2522-2523 แกลบทั้งประเทศมีปริมาณมากถึง 3.45 ล้านตัน ซึ่งถ้าสามารถนำมาเป็น เชื้อเพลิงในการเผาไหม้ได้ ก็จะสามารถใช้พลังงานทดแทนน้ำมันดิบได้ เป็นปริมาณมาก

ตารางที่ 2-1 เนื้อที่เพาะปลูกข้าวและปริมาณผลิต

ปีเพาะปลูก	ภาคเหนือ			ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ			ภาคกลาง			ภาคใต้			รวมทั้งประเทศ		
	เนื้อที่ เพาะปลูก (10 <sup>6</sup> ไร่)	ปริมาณผลิต		เนื้อที่ เพาะปลูก (10 <sup>6</sup> ไร่)	ปริมาณผลิต		เนื้อที่ เพาะปลูก (10 <sup>6</sup> ไร่)	ปริมาณผลิต		เนื้อที่ เพาะปลูก (10 <sup>6</sup> ไร่)	ปริมาณผลิต		เนื้อที่ เพาะปลูก (10 <sup>6</sup> ไร่)	ปริมาณผลิต	
		(10 <sup>6</sup> ตัน)	(%)		(10 <sup>6</sup> ตัน)	(%)		(10 <sup>6</sup> ตัน)	(%)		(10 <sup>6</sup> ตัน)	(%)		(10 <sup>6</sup> ตัน)	(%)
2514/15	9.20	3.56	25.88	21.47	5.43	39.54	13.17	3.90	28.34	3.20	0.86	6.24	47.04	13.74	100.0
2515/16	9.38	2.67	22.84	18.22	4.19	35.90	13.20	3.81	32.63	3.81	1.01	8.63	44.62	11.67	100.0
2516/17	11.32	3.90	28.06	22.14	4.61	33.20	13.77	4.59	33.04	3.01	0.79	5.68	50.23	13.89	100.0
2517/18	10.16	3.78	30.37	20.64	3.77	30.31	13.24	4.03	32.37	3.77	0.87	6.95	47.82	12.45	100.0
2518/19	11.65	4.13	29.27	24.99	5.32	37.76	13.16	3.66	26.00	3.45	0.98	6.97	53.24	14.09	100.0
2519/20	10.55	3.97	29.05	23.74	4.67	34.16	12.90	3.96	28.95	3.66	1.07	7.84	50.86	13.67	100.0
2520/21	11.66	3.55	28.76	24.75	3.54	28.66	12.82	4.01	32.53	4.24	1.23	10.01	53.47	12.34	100.0
2521/22	12.64	4.77	31.38	27.82	5.26	34.60	13.81	4.13	27.17	3.96	1.04	6.85	58.23	15.21	100.0
2522/23	13.23	4.27	29.12	29.09	5.64	38.48	11.93	3.66	24.98	3.62	1.09	7.42	56.87	14.65	100.0

\* สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์

### 2.2.2 คุณสมบัติทางกายภาพ (8, 9)

แกลบมีคุณสมบัติในการใช้เป็นเชื้อเพลิงโคคี่พอสมควร แต่จะมีข้อเสียเมื่อทำการเผาไหม้แล้ว คือ แกลบให้ปริมาณเถ้าสูงประมาณร้อยละ 15.7-21.3 นอกจากนี้แกลบมีความหนาแน่น (density) 0.735 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ปริมาณความชื้นประมาณร้อยละ 2.4-11.0 และคุณค่าทางความร้อนของแกลบประมาณ 3,300 ถึง 3,600 แคลอรี/กรัม

### 2.2.3 การใช้ประโยชน์

การใช้ประโยชน์จากแกลบนั้น ปัจจุบันส่วนมากใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับโรงสีขนาดกลางและขนาดใหญ่ที่ใช้เครื่องจักรไอน้ำ และใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงงานอุตสาหกรรมอื่น ๆ เช่น โรงงานเผาอิฐ เป็นต้น แต่การใช้ยังมีปริมาณค่อนข้างน้อย อาจจะเป็นเนื่องจากว่าเทคนิคที่ใช้ในการเผาไหม้นั้นให้คุณค่าทางความร้อนออกมาน้อย นอกจากนี้แกลบยังมีประโยชน์ในค้ำเป็นวัตถุดิบทางอุตสาหกรรมและทางเกษตร เช่น ทำอิฐ ถ่านฟอกสี ผงซัก - วัสดุฉนวนในอุตสาหกรรมเหล็ก และอาหารสัตว์ เป็นต้น

### 2.2.4 ราคา

แกลบเป็นเชื้อเพลิงที่มีราคาซื้อขายค่อนข้างต่ำและไม่แน่นอน ทั้งนี้เพราะการใช้เป็นเชื้อเพลิงต้องใช้เป็นปริมาณมากทำให้เสียค่าขนส่งแพง จึงทำให้การใช้งานจำกัดเฉพาะในโรงสีและบริเวณใกล้เคียงเท่านั้น

## 2.3 ทฤษฎีของการเผาไหม้ (10, 11, 12, 13, 14)

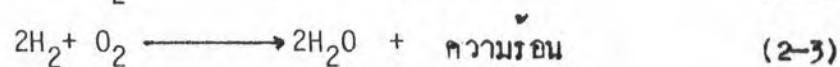
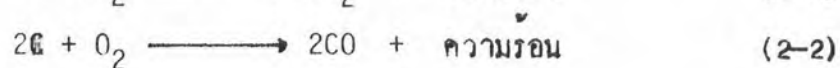
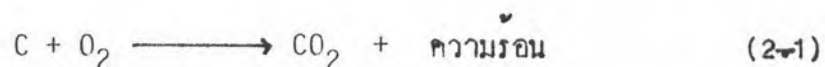
### 2.3.1 การเผาไหม้

การเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาการรวมตัวกันของเชื้อเพลิงกับออกซิเจนอย่างรวดเร็ว พร้อมกับเกิดการลุกไหม้และการคายความร้อน

ในการเผาไหม้ส่วนใหญ่จะไม่ใช้ออกซิเจนล้วน ๆ เพราะสิ้นเปลือง จะใช้ อากาศซึ่งสามารถหาได้ในราคาถูกแทน ในอากาศมีออกซิเจนและไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบหลัก ส่วนก๊าซอื่น ๆ มีปะปนอยู่น้อยมากจนไม่มีความสำคัญ ออกซิเจนมีอยู่ในอากาศประมาณร้อยละ 21 และไนโตรเจนประมาณร้อยละ 79 โดยปริมาตรหรือมีออกซิเจนประมาณร้อยละ 23 และไนโตรเจนประมาณร้อยละ 77 โดยน้ำหนัก

### 2.3.2 ปฏิกิริยาเคมี

เนื่องจากเชื้อเพลิงส่วนใหญ่ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และปริมาณ ชาติอื่น ๆ ปะปนอยู่บ้างเช่น กำมะถัน เมื่อนำไปเผาไหม้จะเกิดปฏิกิริยาเคมีแสดงได้ด้วยสมการ ดังต่อไปนี้



การเผาไหม้เพื่อให้ได้ผลอย่างสมบูรณ์นั้นจะต้องมีสัดส่วนที่พอดีกันระหว่างปริมาณเชื้อเพลิงกับปริมาณออกซิเจน ดังสมการ (2-1) หรือมีปริมาณออกซิเจนมากกว่าปริมาณเชื้อเพลิง



แตกไม่ควรจะให้มากเกินไป เพราะจะทำให้สูญเสียความร้อนไปกับก๊าซโดยเปล่าประโยชน์ นอกจากนั้นยังต้องมีการผสมหรือสัมผัสกันระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงที่ดีด้วย

ฉะนั้นขบวนการเผาไหม้ที่ดีควรจะประกอบด้วย

1. อัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิเจนหรืออากาศ
2. การผสมหรือสัมผัสกันอย่างทั่วถึงระหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิเจนหรืออากาศ
3. การลุกไหม้ของของผสม

### 2.3.3 การผสม

การรวมตัวที่กระหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิเจน ก็คือการที่อนุภาคของเชื้อเพลิงสัมผัสกับโมเลกุลของออกซิเจนได้อย่างทั่วถึง ในกรณีที่เชื้อเพลิงเป็นก๊าซ การผสมกันนั้นจะเป็นไปได้ง่าย แต่ถ้าเชื้อเพลิงเป็นของแข็งหรือของเหลว การผสมกันนั้นก็จะยุ่งยากขึ้น

ในกรณีที่เชื้อเพลิงเป็นของเหลว ส่วนใหญ่ก็จะมีทำให้เป็นอนุภาคเล็ก ๆ ก่อน แล้วจึงจะทำการเผาไหม้ซึ่งจะทำให้รวมตัวได้ง่ายกับอากาศและเกิดการลุกไหม้ได้ดี เหมือนเชื้อเพลิงที่เป็นก๊าซ

ส่วนเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งนั้น แต่ละโมเลกุลของออกซิเจนจะสัมผัสกับพื้นผิวของเชื้อเพลิงเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ให้ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ จากนั้นออกซิเจนจะเข้าไปผสมกับคาร์บอนมอนนอกไซด์ ทำให้เกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์คือ เกิดคาร์บอนไดออกไซด์ในที่สุด

ฉะนั้นขบวนการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งนั้นจะประกอบด้วยพฤติกรรม

4 ข้อ ดังนี้คือ

1. เริ่มต้นด้วยออกซิเจนสัมผัสกับพื้นผิวของคาร์บอน
2. เกิดก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ออกมา

3. มีการปล่อยก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้ออกมาจากผิว
4. มีการรวมกัน (ทำปฏิกิริยาเคมีกัน) ระหว่างคาร์บอนมอนนอกไซด์กับออกซิเจน

ดังนั้นจะกล่าวได้ว่า อัตราการเผาไหม้นั้นขึ้นอยู่กับสาเหตุที่กล่าวมาแล้ว และสามารถเร่งปฏิกิริยาการเกิดได้โดยการบดเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งให้เป็นผงซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการสัมผัสให้มากขึ้น

#### 2.3.4 การติดไฟหรือการลุกไหม้

การลุกไหม้ของเชื้อเพลิงหรืออัตราการรวมตัวกันทางเคมีของเชื้อเพลิงกับอากาศนั้นขึ้นโดยตรงกับอุณหภูมิ การเผาไหม้จะเกิดขึ้นในตอนแรก ๆ และเกิดต่อไปเรื่อย ๆ ความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ก็จะไปเพิ่มอุณหภูมิของเชื้อเพลิงและอากาศให้มากขึ้น ทำให้อัตราการเผาไหม้เพิ่มขึ้นด้วย ฉะนั้นสิ่งที่ต้องการสำหรับการเผาแบบเกิดขึ้นได้เอง (spontaneous combustion) นั้นต้องมี

1. บริเวณที่จำกัดสำหรับสะสมความร้อน
2. สารเชื้อเพลิง
3. อากาศ

การลุกไหม้นั้นไม่ได้เป็นขบวนการที่เกิดขึ้นได้เองส่วนใหญ่จะใช้ปริมาณความร้อนจากภายนอกช่วยเร่งปฏิกิริยาการเผาไหม้ และให้ปริมาณความร้อนออกมามากขึ้น นอกจากนั้นสิ่งที่สำคัญสำหรับการเผาไหม้แบบต่อเนื่องก็คือ อุณหภูมิ ซึ่งถ้าอุณหภูมิต่ำเกินไปก็ทำให้เชื้อเพลิงไม่สามารถลุกไหม้แบบต่อเนื่องได้ แต่ถ้าอุณหภูมิของการเผาไหม้สูง การลุกไหม้ก็จะเกิดต่อไปได้เรื่อย ๆ

ดังนั้นการติดไฟหรือลุกไหม้นั้นขึ้นอยู่กับหลายสิ่ง เช่น ชนิดของเชื้อเพลิง สถานะของเชื้อเพลิง และอัตราส่วนของเชื้อเพลิงกับอากาศ



### 2.3.5 การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็ง

ในกรณีที่เชื้อเพลิงเป็นของเหลวหรือก๊าซซึ่งทราบส่วนประกอบสามารถนำมาพิจารณาการเกิดของปฏิกิริยาการเผาไหม้ได้ แต่เชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งซึ่งเกิดขึ้นตามธรรมชาติมักจะมีส่วนประกอบที่ไม่แน่นอน จึงทำให้เกิดปัญหา ดังนี้คือ

ก. เป็นการยากที่จะหาค่าค่าสุกสำหรับใช้เปรียบเทียบการเกิดของการเผาไหม้ เช่น อัตราส่วนของอากาศ อุณหภูมิของการเผาไหม้ และอัตราการเกิดปฏิกิริยาทั้งหมด

ข. การเผาไหม้ไม่ได้เกิดเป็นแบบผสมเป็นเนื้อเดียวกัน เช่น ของเหลวหรือก๊าซที่ปริมาณออกซิเจนเข้าไปมากกว่าปริมาณที่คงการให้เกิดปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงทั้งหมดเพียงเล็กน้อย แต่จะเกิดแบบไม่ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน (heterogeneous) ซึ่งจะมีพื้นผิวของเชื้อเพลิงในการสัมผัสกับออกซิเจนจำกัดคือ จะเกิดปฏิกิริยาที่ผิวของเชื้อเพลิงเข้าไปเรื่อย ๆ ฉะนั้น แม้ว่าจะให้ออกซิเจนมากเกินพอ ปริมาณออกซิเจนก็สามารถเกิดปฏิกิริยาเฉพาะที่พื้นผิวของเชื้อเพลิงที่มีอยู่เท่านั้น

จากปัญหา 2 ข้อของการเผาไหม้ของ ๆ ฉะนั้น จะเห็นว่าการออกแบบระบบของการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งนี้ควรคำนึงถึงเหตุผลต่าง ๆ ดังนี้

- ก. ควรจะให้พื้นผิวสำหรับปฏิกิริยามากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ซึ่งทำได้โดย
- 1) บดเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งให้เป็นอนุภาคที่เล็กเท่าที่จะเล็กได้ เพราะเมื่อขนาดของอนุภาคเล็กลง พื้นผิวหน้าจะมากขึ้น (10)
  - 2) มีการทำให้ก๊าซในเตาเกิดการเคลื่อนไหวอย่างรุนแรง เพื่อที่จะกวาดให้พื้นผิวของ ๆ ฉะนั้นปราศจากสารประกอบที่เกิดจากปฏิกิริยาหรือเถ้า เช่น ใช้เทคนิคทางฟลูอิดไรซัน หรือ Spouted bed

ข. อัตราเร็วของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนั้นขึ้นอยู่กับอัตราเร็วที่พื้นผิวของเชื้อเพลิงสัมผัสหรือเกิดปฏิกิริยา ดังนั้นจะต้องมีเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้อย่างพอเพียงเพื่อให้เชื้อเพลิงถูกเผาไหม้หมด

ค. ระหว่างการเผาไหม้ อุณหภูมิในการเผาไหม้ต้องสูงพอที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ต่อเนื่องกัน

จากสาเหตุทั้ง 3 ข้อนี้ นักวิชาการมักจะนำมาพิจารณาในรูปของที 3 ตัว คือ Time (เวลา) Turbulence (การปั่นป่วน) และ Temperature (อุณหภูมิ) โดยนักออกแบบเครื่องมือของการเผาไหม้ (combustion equipment) นั้นจะนำสาเหตุทั้ง 3 ข้อมาพิจารณาในการหาแบบที่เหมาะสม ซึ่งสาเหตุแต่ละข้อนั้นจะเกี่ยวพันกัน

#### 2.3.6 อุณหภูมิ

ปกติแล้วในการเผาไหม้นั้นย่อมต้องการให้มีอุณหภูมิสูงเท่าที่จะเป็นไปได้ แต่การที่จะให้มีอุณหภูมิสูงได้มากน้อยแค่ไหนนั้นมิใช่ปัจจัยที่สำคัญคือ ชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้ซึ่งสามารถให้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน ในกรณีที่มีอุณหภูมิสูงเกินไปก็ทำให้เกิดการรวมตัวกันเป็นสารที่ไม่ต้องการได้ เช่น สารประกอบของออกไซด์ของไนโตรเจน ( $\text{NO}_x$ ) และอาจทำให้เกิดข้อเสียได้ เช่น ทำให้เถ้ากลายเป็นซิลิเกต (Slag) เกาะติดอยู่ตามผนังที่เป็นเหล็กซึ่งทำหน้าที่ในการถ่ายเทความร้อนทำให้เกิดการกัดกร่อนได้

#### 2.3.7 การปั่นป่วน (Turbulence)

จุดประสงค์ของการทำให้เกิดการปั่นป่วนขึ้นก็เพื่อที่จะทำให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างอากาศและพื้นผิวของเชื้อเพลิง ทำให้เกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วและทำให้เกิดบริเวณของพื้นผิวที่จะเกิดปฏิกิริยาขึ้นใหม่

วิธีการหนึ่งที่สามารถทำให้เกิดการปั่นป่วนได้ก็คือ ใตทิศทางการเคลื่อนที่ของตัวปฏิกิริยา (reactant) ที่ผ่านเท่านั้นวงเวียน แต่ก็มีข้อจำกัดคือ ทิศของการติดตั้งและการบำรุงรักษาแผ่นกัน (baffles) ที่สามารถทนต่อความร้อนสูงและทนต่อการกัดกร่อนนั้นสูง

นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของค่าความแตกต่างของความดัน (pressure drop) เนื่องจากผนังนั้นเป็นข้อที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้น ปัญหาที่เกิดกับเบดนิ่ง (fixed-bed) หรือเบดเคลื่อนที่ (moving-bed stokers) ก็คือการเกิดเป็นช่องว่างระหว่างอนุภาคของเชื้อเพลิงเมื่อมีอัตราการไหลของอากาศที่ผ่านเบดนี้สูง ฉะนั้นข้อจำกัดของอัตราเร็วของอากาศก็ขึ้นอยู่กับความเร็วของเบด

การรวมตัวกันระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงเนื่องด้วยการปั่นป่วนโดยธรรมชาติของเตาเผาแบบฟลูอิไดซ์เบด (fluidized-bed combustor) นั้นเหมาะสม ทำให้เกิดการสัมผัสกันได้ดีระหว่างอนุภาคของ ๆ หนึ่งกับอากาศ นอกจากนี้ยังทำให้เถ้าที่เกิดจากการเผาไหม้ซึ่งมีอนุภาคเล็ก ๆ สามารถหลุดลอยออกจากเตาได้ด้วย

### 2.3.8 เวลา

เมื่อมีอุณหภูมิและการปั่นป่วนที่เหมาะสมแล้ว สิ่งที่จะต้องนำมาพิจารณาอีกอย่างก็คือเวลา นั่นก็คือเวลาที่ให้เชื้อเพลิงอยู่ในเตาเผาสมควรแน่ใจว่าทำให้เชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้ได้มากที่สุด แต่การที่ต้องการให้ผลสมบูรณ์คือ เชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้จนหมดจนยอมเป็นไปได้อย่างเพราะต้องใช้เวลาที่นานมากและทำให้ค่าใช้จ่ายสูงมากด้วย

## 2.4 ฟลูอิไดซ์เบด (fluidized-bed) (15, 16, 17)

### 2.4.1 ลักษณะโดยทั่วไปของฟลูอิไดซ์เบด

เมื่อปล่อยของไหลให้ไหลผ่านกลุ่มอนุภาคของแข็ง (bed) ซึ่งบรรจุอยู่ในคอลัมน์ด้วยความเร็วต่ำ ๆ อนุภาคของแข็งจะไม่ขยับตัวเลย ลักษณะของเบดเช่นนี้เรียกว่าเบดนิ่ง (fixed-bed) ดังรูปที่ 2-1 เมื่อค่อย ๆ เพิ่มความเร็วของ ๆ ไหลให้มากขึ้นทีละน้อยจนถึงความเร็วระดับหนึ่ง อนุภาคของแข็งจะเริ่มขยับตัวและจัดตัวอย่างเป็นระเบียบ เมื่อความเร็วของของไหลเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย อนุภาคของแข็งจะแยกออกจากกันลอยตัวเป็นอิสระ ลักษณะนี้เรียกว่า



จุดเริ่มฟลูอิดิซ (Minimum fluidizing point) หลังจากจุดนี้แล้วความเร็วของ  
ของไหลที่เพิ่มขึ้นไปทำให้เบคขยายตัวตามความเร็วของของไหล อนุภาคของแข็งยังอยู่ติดกัน  
เสมือนว่าอนุภาคของแข็งเหล่านั้นจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนซึ่งเรียกลักษณะเบคนี้ว่า ฟลูอิดิซเบคแบบ  
หนาแน่น (dense-phase fluidizing bed) ถ้าความเร็วของของไหลมากขึ้น  
อีกจนเกือบจะพาเอาอนุภาคของแข็งออกจากคอลัมน์อยู่แล้วนั้นจะเรียกลักษณะเบคว่า ฟลูอิดิซ  
เบคแบบเจือจาง (diluted-phase fluidizing bed) หลังจากเพิ่มความเร็ว  
ของของไหลอีกเล็กน้อย อนุภาคของแข็งจะหลุดลอยออกจากคอลัมน์ไป ซึ่งลักษณะนี้เป็นการ  
ขนส่งของแข็งจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง เรียก Pneumatic transportation

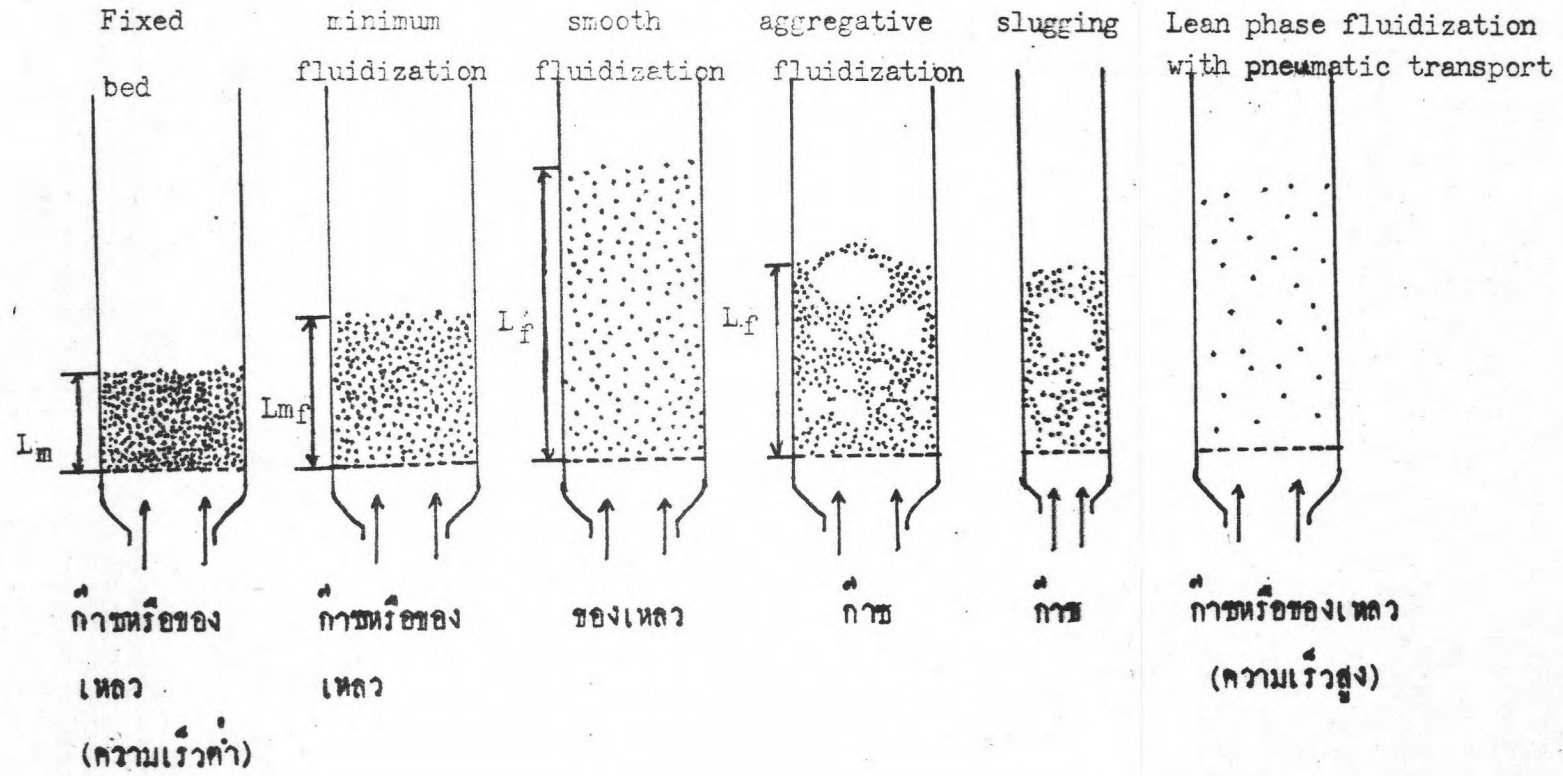
กรณีที่ฟลูอิดิซเบคมีของไหลเป็นก๊าซนั้นลักษณะของเบคจะต่างจากของไหลที่เป็นของ  
เหลวมาก เพราะว่าเมื่อความเร็วของก๊าซสูงกว่าความเร็วที่ทำให้เกิดฟลูอิดิซเบคแล้วนั้น  
ก๊าซส่วนหนึ่งยังคงทำหน้าที่ให้เกิดการลอยตัวของอนุภาคของแข็งเหมือนเดิม แต่อีกส่วนหนึ่ง  
จะรวมตัวกันเกิดเป็นฟองก๊าซขึ้น ฟองก๊าซจะแทรกตัวขึ้นไปยังผิวหน้าของเบคและแตกตัวใน  
ที่สุด ในขณะที่ฟองก๊าซลอยตัวขึ้นนั้น จะทำให้อนุภาคของแข็งไหลจากด้านบนของฟองก๊าซลงมา  
ยังด้านล่าง พร้อมกันนั้นยังมีบางส่วนของอนุภาคของแข็งที่ลอยติดตามฟองก๊าซนั้นขึ้นไปด้วย ซึ่ง  
ทำให้การเคลื่อนที่ภายในเบคเป็นไปอย่างซุกมุ่นวุ่นวายเบคชนิดนี้เรียกว่า aggregated bed  
ดังแสดงในรูปที่ 2-1

#### 2.4.2 การคำนวณหาความเร็วต่ำสุดของของไหลที่ทำให้เบคเกิดฟลูอิดิซ (15)

ในขณะที่อนุภาคของแข็งเริ่มลอยตัวเป็นอิสระอยู่ อนุภาคของแข็งอยู่ในสภาวะ  
ของแรง 2 แรงที่เกิดขึ้นบนอนุภาคของแข็งสมดุลกันคือ แรงที่เกิดจากน้ำหนักของตัวของอนุภาค  
ของแข็งเองกับแรงพยุงจากของไหลหรือเกิดจากแรงเสียดทานกับแรงต้านของของไหล

011258

1 177ND0701



รูปที่ 2-1 ลักษณะต่าง ๆ ของฟลูอิดไรเซชัน



$$\text{แรงพุง (แรงเสียดทาน + แรงต้าน)} = \text{น้ำหนักของอนุภาคของแข็ง} \quad (2.7)$$

หรือ

$$\begin{aligned} & (\text{ความแตกต่างของความดันในพื้นที่ภาคตัดขวางของเบด}) \times (\text{พื้นที่ภาคตัดขวางของคอลัมน์}) = \\ & (\text{ปริมาตรของเบด}) \times (\text{ส่วนของแข็งในเบด}) \times (\text{ความถ่วงจำเพาะของของแข็ง}) \end{aligned}$$

ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\Delta P \cdot A_c = W = (A_c \cdot L_{mf}) (1 - \epsilon_{mf}) \left[ (\rho_s - \rho_g) \frac{g}{g_c} \right] \dots\dots(2-8)$$

จัดระเบียบใหม่เป็นดังนี้

$$\frac{\Delta P}{L_{mf}} = (1 - \epsilon_{mf}) (\rho_s - \rho_g) \frac{g}{g_c} \dots\dots(2-9)$$

และ Ergun (15) ได้แสดงถึงความแตกต่างของความดัน (pressure drop) ที่เกิดขึ้น เนื่องจากการไหลผ่านเบดไว้ดังนี้คือ

$$\frac{\Delta P}{L_m} \cdot g_c = \frac{150 (1 - \epsilon_m)^2}{\epsilon_m^3} \frac{\mu U_o}{(\rho_s d_p)^2} + \frac{1.75 (1 - \epsilon_m)}{\epsilon_m^3} \cdot \frac{\rho_g \cdot U_o^2}{\rho_s d_p} \dots(2-10)$$

จากสมการ (2-9) และสมการ (2-10) นำมารวมกันจะได้

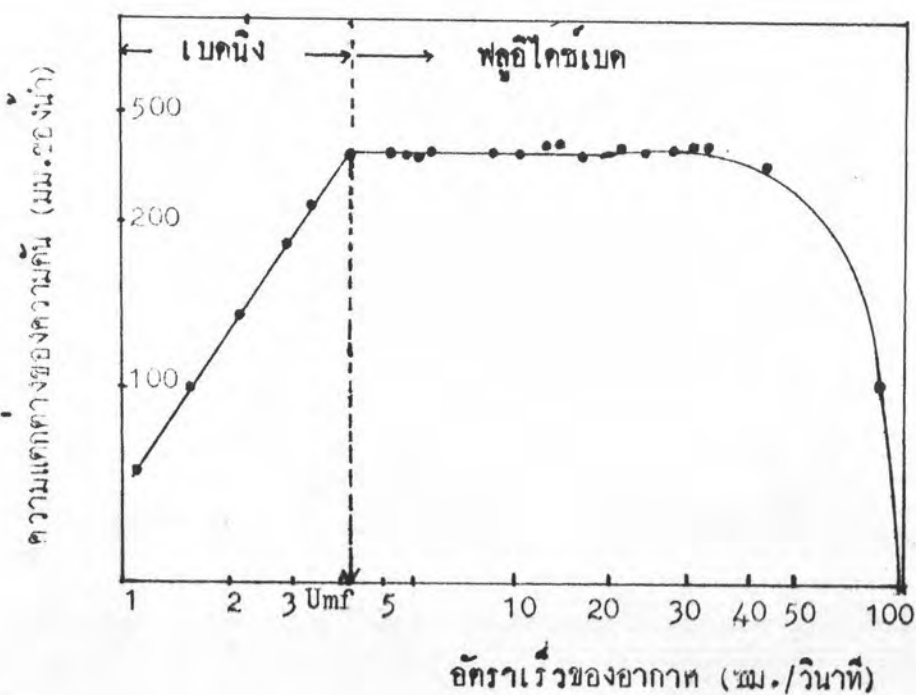
$$\frac{1.75}{\rho_s \epsilon_{mf}^3} \left( \frac{d_p \cdot U_{mf} \rho_g}{\mu} \right)^2 + \frac{150 (1 - U_{mf})}{\rho_s^2 \epsilon_{mf}^3} \left( \frac{d_p \cdot U_{mf} \rho_g}{\mu} \right) = \frac{d_p^2 \rho_g (\rho_s - \rho_g) \cdot g}{\mu^2} \dots(2-11)$$

จากสมการ (2-11) สามารถหาความเร็วค่าสุดท้ายที่ทำให้เกิดฟลูอิไลเซชัน ( $U_{mf}$ ) ได้ ถ้าทราบคุณสมบัติทางกายภาพอื่น ๆ ของของแข็งและของไหลที่ไหลผ่าน



### 2.4.3 ความแตกต่างของความดันของฟลูอิดซ์เบด

รูปที่ 2-2 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของของไหลที่ไหลผ่านเบดที่เป็นของแข็ง และความแตกต่างของความดันของเบด โดยพบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วของของไหล ความแตกต่างของความดันจะเพิ่มขึ้นตามไปควบเป็นสัดส่วนกัน จนถึงจุดหนึ่งที่มีค่าของความแตกต่างของความดันสูงสุด หลังจากนั้นถ้าหากเพิ่มความเร็วของกรไหลมากขึ้น เบดซึ่งแต่เดิมอยู่กับที่ (fixed bed) ก็เริ่มขยับตัว ความเร็วของของไหลตอนนี้เรียกว่า ความเร็วค่าสุดของฟลูอิดเซชัน และสัดส่วนของว่างของเบดจะเริ่มสูงขึ้นจาก  $\epsilon_m$  เป็น  $\epsilon_{mf}$  เมื่อความเร็วของของไหลเพิ่มขึ้นไปเรื่อย ๆ สัดส่วนของว่างจะเปลี่ยนไปเรื่อย ๆ ค่าของความแตกต่างของความดันจะคงที่อยู่เสมอ และจะลดค่าลงเมื่อของแข็งเริ่มถูกของไหลพาออกจากคอลัมน์ไป ซึ่งจุดนั้นเราเรียกว่าความเร็วสุดท้ายของฟลูอิดเซชัน (Terminal velocity)



รูปที่ 2-2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของความดันกับความดันกับอัตราเร็วของอากาศ

#### 2.4.4 ข้อดีและข้อเสียของฟลูอิดเซชัน

ข้อเปรียบเทียบระหว่างข้อดีและข้อเสียของการใช้เทคนิคฟลูอิดเซชันกับเทคนิคอื่น ๆ ก็มีรายละเอียดสรุปไว้ดังต่อไปนี้

##### 2.4.4.1 ข้อดี

1. จากการที่มีคุณสมบัติทางกายภาพคล้ายกับของไหล ดังนั้นจึงสามารถทำงานแบบต่อเนื่อง (continuous) ได้ และควบคุมการทำงานแบบอัตโนมัติได้
2. เนื่องจากมีการผสมกันอย่างดีของของแข็งภายในฟลูอิดเซ็กซ์เบค จึงทำให้มีอุณหภูมิภายในเบคคองที่ตลอด ซึ่งจะต่างจากเบคนิ่งที่มีอุณหภูมิไม่เท่ากันตลอดทั้งหมด
3. อัตราการถ่ายเทมวลสารและความร้อนของเบคสูง โดยเฉพาะระหว่างก๊าซกับของแข็งเมื่อเปรียบเทียบกับชนิดอื่น เพราะพื้นที่สัมผัสระหว่างของแข็งกับก๊าซมีมากกว่า
4. เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อนของเบคสูงมาก จึงเหมาะสมกับขบวนการที่มีปฏิกิริยาที่คายความร้อนหรือดูดความร้อนจำนวนมาก ๆ
5. การทำงานของฟลูอิดเซ็กซ์เบคจะเสียพลังงานน้อยกว่าของเบคนิ่งเพราะแรงเสียดทานและความแตกต่างของความดันของเบคน้อยกว่าแบบเบคนิ่งมาก
6. สามารถใช้ในการขนส่งของแข็งจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งได้

##### 2.4.4.2 ข้อเสีย

1. เนื่องจากการผสมกันอย่างรวดเร็ว ดังนั้นระยะเวลาที่ของแข็งสัมผัสกับของไหลที่ไหลผ่านในบางครั้งไม่สม่ำเสมอหรือสั้นมาก จึงต้องใช้เบคสูง ๆ หรือเบคหลายชั้น ทำให้เปลืองเงินลงทุนมาก

2. กรณีที่มีตัวกระจายไม่เหมาะสมกับเบคที่ใช้นั้น การเกิดของ  
ขบวนการฟลูอิดเซชันจะเป็นไปแบบไม่สม่ำเสมอ ทำให้เกิดช่องหรือแนวช่องที่มีแคของไหล  
เพียงอย่างเดียวไหลผ่าน (channeling) ซึ่งทำให้การสัมผัสกันระหว่างของแข็งและ  
ของไหลลดลง กรณีนี้จะเกิดกับของไหลที่เป็นก๊าซฟลูอิดซ์เบคที่มีความเร็วของก๊าซสูง ๆ  
ฉะนั้นควรที่จะเลือกตัวกระจายที่เหมาะสมกับเบคนั้น ๆ มากที่สุด

3. การทำงานมีข้อจำกัด เพราะถ้าให้ความเร็วของของไหล  
สูงเกินไปของแข็งก็จะออกจากเบคไปพร้อมกับของไหล จึงต้องใช้ความเร็วที่น้อยลงอาจทำให้ได้  
ผลิตภัณฑ์ที่น้อยลง

4. อาจเกิดการสึกหรอของภาชนะเนื่องจากการขัดสีระหว่าง  
ของแข็งกับผนังของภาชนะ