

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การเผาไหม้

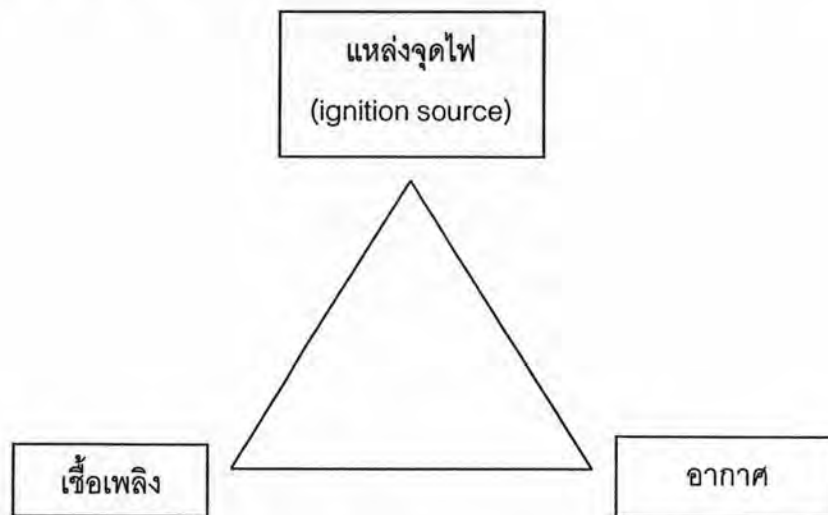
นิยาม (สำเร็จ จักรใจ, 2547)

การเผาไหม้เป็นกระบวนการออกซิเดชันของโมเลกุล โดยปกติทั่วไปหมายถึงโมเลกุลของคาร์บอน ไฮโดรเจน หรือขององค์ประกอบไฮโดรคาร์บอนซึ่งเกิดขึ้นเร็วมากภายใต้อุณหภูมิสูง พร้อมทั้งปลดปล่อยพลังงานออกมาหรือเป็นกระบวนการคายความร้อนนั่นเอง ถ้าพลังงานที่ปลดปล่อยออกมามีค่ามากเพียงพอก็จะทำให้กระบวนการเผาไหม้ดำเนินต่อไปได้ด้วยตัวเองอย่างต่อเนื่องพร้อมทั้งปลดปล่อยพลังงานในรูปของความร้อนและแสงสว่างออกมาเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ได้ การเผาไหม้อาจมองได้ในอีกลักษณะหนึ่งว่าเป็นเรื่องเกี่ยวกับจลน์ทางเคมีซึ่งเกี่ยวข้องกับความเร็วและกลไกของปฏิกิริยาเคมีของสารขณะที่กำลังสลายตัวไปเป็นสารใหม่ พร้อมกับมีการเปลี่ยนรูปของพลังงานระหว่างพลังงานทางเคมีและพลังงานความร้อนอย่างรวดเร็ว การเผาไหม้จะเกิดขึ้นได้ต้องมีภาวะที่เหมาะสม เช่น ส่วนประกอบของสารที่ทำปฏิกิริยา (ส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิไดเซอร์ เช่น ออกซิเจน หรือ อากาศ เป็นต้น) อุณหภูมิ และ ความดัน เป็นต้น การเผาไหม้จะต้องปลดปล่อยความร้อน และ/หรือ แสงสว่าง การเผาไหม้จะต้องมีเปลวไฟหรือ บริเวณบางๆ ที่ซึ่งปฏิกิริยาคายความร้อนเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เช่น เปลวไฟของตะเกียงเบนเซน และเปลวไฟของเทียนไข เป็นต้น การเผาไหม้เกิดขึ้นในอัตราเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับ หลายปัจจัย เช่น พื้นที่ผิวสัมผัสของเชื้อเพลิง (เช่น ถ่านหินบดละเอียด และสเปรย์ละอองของน้ำมันเชื้อเพลิง เป็นต้น) และ อุณหภูมิ เป็นต้น การเผาไหม้ทำให้เกิดการระเบิดได้ ถ้าอัตราการปลดปล่อยความร้อนสูงกว่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนออกไป ระบบจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อยๆ อัตราการเกิดปฏิกิริยายิ่งสูง ทำให้อัตราการปลดปล่อยความร้อนยิ่งสูงอย่างรวดเร็วจนเกิดการระเบิด การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแข็ง เชื้อเพลิงเหลว และเชื้อเพลิงแก๊ส มีขั้นตอนต่างกัน การเผาไหม้ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม ที่สำคัญ คือ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ที่ทำให้โลกร้อนขึ้น ซึ่งก่อนปฏิวัติอุตสาหกรรมในอังกฤษตอนปลายศตวรรษที่ 18 จนถึงปลายศตวรรษที่ 20 ปี 1996 คาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มจาก 280 ส่วนในล้านส่วน เป็น 362 ส่วนในล้านส่วน ดังนั้นการเผาไหม้ที่ดีต้องเป็นระบบที่ปลดปล่อยมลพิษต่ำ เข้าได้กับสิ่งแวดล้อม ต้นทุนต่ำแต่มีประสิทธิภาพสูง

2.1.1 ภาวะที่จำเป็นในการเริ่มเกิดปฏิกิริยา (กัญจนา บุญยเกียรติ, 2544)

ปฏิกิริยาการเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ ไม่ใช่ปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลโดยตรง แต่จะเริ่มต้นด้วยการแตกตัวของโมเลกุลของเชื้อเพลิงเป็นอนุมูลอิสระที่ว่องไวจำนวนมาก เป็นขั้นตอนการเริ่มต้นของลูกโซ่ อนุมูลอิสระที่ว่องไวจะทำปฏิกิริยากับโมเลกุลอื่น ได้ทั้งอนุมูลอิสระใหม่และอนุมูลชั้นกลางอื่นๆ ซึ่งก็จะทำปฏิกิริยาต่อลูกโซ่ ทั้งที่เกิดขึ้นพร้อมกันและที่เกิดเป็นลำดับก่อนหลังกันหลายรูปแบบ ทำให้เกิดทั้งผลผลิต และอนุมูลอื่นๆ อีกมาก สุดท้ายคือปฏิกิริยาที่ให้ผลผลิตสุดท้ายและอนุมูลที่ไม่ว่องไว ตามด้วยการสิ้นสุดของปฏิกิริยาลูกโซ่

ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีตัวทำปฏิกิริยาและภาวะที่เหมาะสม ปฏิกิริยาการเผาไหม้คือปฏิกิริยาการออกซิไดซ์เชื้อเพลิงให้กลายเป็นออกไซด์ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดต่อเนื่องจนสมบูรณ์ในการเผาไหม้โดยทั่วไป ตัวทำปฏิกิริยา คือ เชื้อเพลิง (ส่วนใหญ่เป็นไฮโดรคาร์บอน) และอากาศ ซึ่งจะเริ่มเกิดปฏิกิริยาได้ต่อเมื่อมีภาวะที่เหมาะสม ซึ่งก็คือ แหล่งให้ความร้อนเพื่อจุดไฟ ดังนั้นอาจแสดงองค์ประกอบทั้ง สามได้ในกราฟสามเหลี่ยมดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 องค์ประกอบที่จำเป็นในการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ (กัญจนา บุญยเกียรติ, 2544)

การเริ่มต้นปฏิกิริยาการเผาไหม้ซึ่งเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ เริ่มต้นด้วยการแตกตัวของโมเลกุลของเชื้อเพลิงเป็นอนุมูลอิสระก่อน แหล่งจุดไฟจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง เพราะจะให้พลังงานส่วนแรกแก่ส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงและออกซิเจนจนทำให้เชื้อเพลิงเกิดการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระจำนวนมากพอที่จะไปทำให้เริ่มเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ของการเผาไหม้ เมื่อเริ่มเกิดการเผาไหม้แล้ว แหล่งจุดไฟจะไม่จำเป็นอีกต่อไป เพราะพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ส่วนต้นมากเกินพอที่จะไปทำให้เชื้อเพลิงส่วนที่เหลืออยู่เกิดการแตกตัวและเผาไหม้ต่อเนื่องกันไปได้อย่างสมบูรณ์ พลังงานส่วนแรกที่ต้องให้เพื่อเริ่มต้นเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่นี้ เรียกว่า พลังงานการจุดไฟ ซึ่งอาจไม่ใช่

วิธีวัดโดยตรง แต่มักจะวัดอุณหภูมิการจุดไฟ ซึ่งเป็นอุณหภูมิของส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศที่ต่ำที่สุดที่จะจุดติดไฟได้เอง อุณหภูมิการจุดจึงเป็นเครื่องบ่งชี้ระดับพลังงานที่ต้องให้แก่ส่วนผสมของเชื้อเพลิงแต่ละชนิด ซึ่งมีค่าแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 อุณหภูมิการจุดไฟของเชื้อเพลิงบางชนิดผสมอากาศ ที่ความดัน 1 บรรยากาศ (กัญจนา บุญเกียรติ, 2544)

Combustible	Formula	Temperature	
		°F	°C
Sulfur	S	470	245
Charcoal	C	650	345
Fixed carbon (bituminous coal)	C	765	405
Fixed carbon (semibituminous coal)	C	870	465
Fixed carbon (anthracite)	C	840 - 1115	450 - 600
Acetylene	C ₂ H ₂	580 - 825	305 - 440
Ethane	C ₂ H ₆	880 - 1165	470 - 630
Ethylene	C ₂ H ₄	900 - 1020	480 - 550
Hydrogen	H ₂	1065 - 1095	575 - 590
Methane	CH ₄	1170 - 1380	630 - 765
Carbon monoxide	CO	1130 - 1215	610 - 665
Kerosene	-	490 - 560	255 - 295
Gasoline	-	500 - 800	260 - 425

แต่ดังที่กล่าวมาแล้ว ปฏิบัติการเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ ดังนั้นเราสามารถทำให้ส่วนผสมติดไฟได้ โดยให้พลังงานการจุดไฟในบริเวณเล็กๆ เพียงบริเวณเดียวก็เพียงพอแล้ว ยกตัวอย่างเช่น การใช้ไม้ขีดไฟจุดหัวเตาแก๊สหุงต้ม หรือการใช้ประกายไฟจากหัวเทียนจุดระเบิดส่วนผสมในกระบอกสูบของเครื่องยนต์ อุณหภูมิการจุดไฟแสดงถึงความยากง่ายที่เชื้อเพลิงจะเกิดการเผาไหม้ ซึ่งหมายถึงความปลอดภัยในการใช้งานด้วย

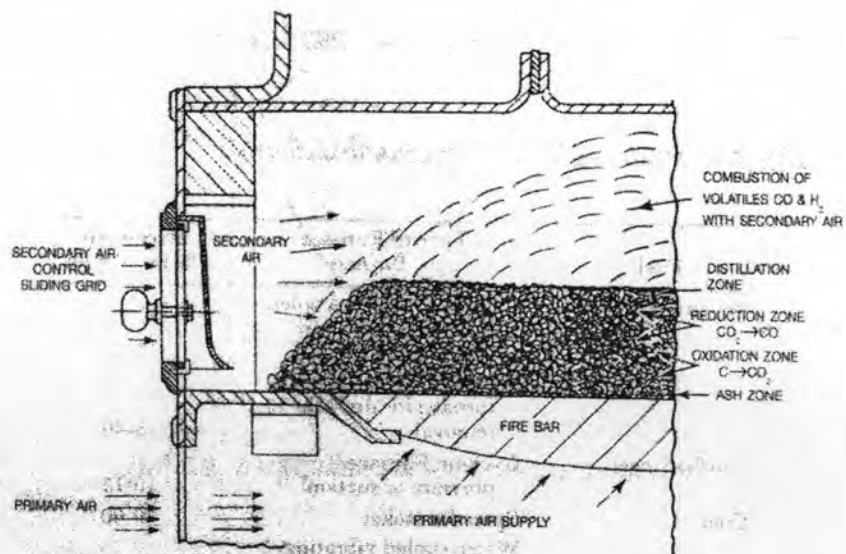
เชื้อเพลิงแข็งมีส่วนประกอบที่เป็นสารระเหยและคาร์บอนคงตัว ในช่วงแรกจะเป็นการเผาไหม้ของสารระเหยซึ่งจะเกิดขึ้นในวัฏภาคแก๊ส เป็นปฏิกิริยาระหว่างแก๊สกับแก๊ส ในช่วงหลังเป็นการเผาไหม้ของกากของแข็งที่เหลืออยู่คือคาร์บอนทำปฏิกิริยากับแก๊ส การควบคุมปฏิกิริยาในแต่ละช่วงจึงแตกต่างกันและสมบัติด้านการเผาไหม้ก็แตกต่างกันด้วย ซึ่งการทำให้เชื้อเพลิงและออกซิเจน (อากาศ) สัมผัสกันได้อย่างทั่วถึงภายใต้ภาวะที่เหมาะสมต้อง

1. จัดให้มีปริมาณอากาศที่เพียงพอที่ตำแหน่งที่ถูกต้องโดยตลอดบริเวณที่มีเชื้อเพลิง
2. ให้ความเร็วและจัดให้มีการปั่นป่วนเพียงพอ และที่อุณหภูมิสูงพอที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ภายในปริมาตรห้องเผาไหม้ที่มีอยู่ ข้อนี้นิยมเรียกว่ากฎ 3T's (time, turbulence and temperature)

กฎ 3T's (time, turbulence and temperature) (กัญจนา บุญเกียรติ, 2544)

ถ้าอากาศไหลผ่านแต่มีเวลาไม่เพียงพอที่จะผสมกับเชื้อเพลิง ไม่มีการปั่นป่วนเพื่อให้มวลของเชื้อเพลิงและอากาศสัมผัสกัน และมีบางบริเวณที่อุณหภูมิไม่สูงพอ การเผาไหม้ที่สมบูรณ์ก็ไม่อาจเกิดขึ้นได้ การจัดให้มีองค์ประกอบที่เหมาะสมทั้ง 3 ประการขึ้นอยู่กับการป้อนอากาศและปริมาณอากาศ

การป้อนอากาศแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ อากาศส่วนแรก (อากาศปฐมภูมิ) และอากาศส่วนที่สอง (อากาศทุติยภูมิ) อากาศส่วนแรกคือส่วนที่ป้อนเข้ามาพร้อมกับเชื้อเพลิงหรือส่วนที่สัมผัสกับเชื้อเพลิงก่อน อากาศส่วนที่สองคือส่วนที่ป้อนเข้ามาสัมผัสกับเชื้อเพลิงหรือผลผลิตจากการไพโรไลต์หรือการเผาไหม้เชื้อเพลิงในระยะถัดไป ตัวอย่างเช่น การเผาไหม้บนตะแกรงเตา อากาศที่ป้อนผ่านตะแกรงเตาขึ้นมาคืออากาศส่วนแรก อากาศส่วนที่ป้อนเข้ามาเหนือตะแกรงเตาเพื่อทำปฏิกิริยากับสารระเหยที่ได้และควันที่เกิดขึ้นคืออากาศส่วนที่ 2 ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การป้อนอากาศส่วนแรกและอากาศส่วนที่สองสู่ตะแกรงเตาแบบป้อนถ่านหินเหนือตะแกรง
(กัญจนา บุญเกียรติ, 2544)

สัดส่วนและปริมาณการป้อนอากาศส่วนแรกและอากาศส่วนที่สองมีความสำคัญมากและมีผลเป็นอย่างมากต่อการเกิดควันและความสมบูรณ์ของปฏิกิริยา ซึ่งขึ้นอยู่กับศักดิ์และร้อยละของสารระเหย ขนาดและการกระจายขนาดของถ่านหิน อัตราการเผาไหม้ระบบการเผาไหม้ที่ใช้ และรูปแบบการไหลของแก๊สผ่านระบบด้วย

อากาศเกินพอ (กัญญา บุญเกียรติ, 2544)

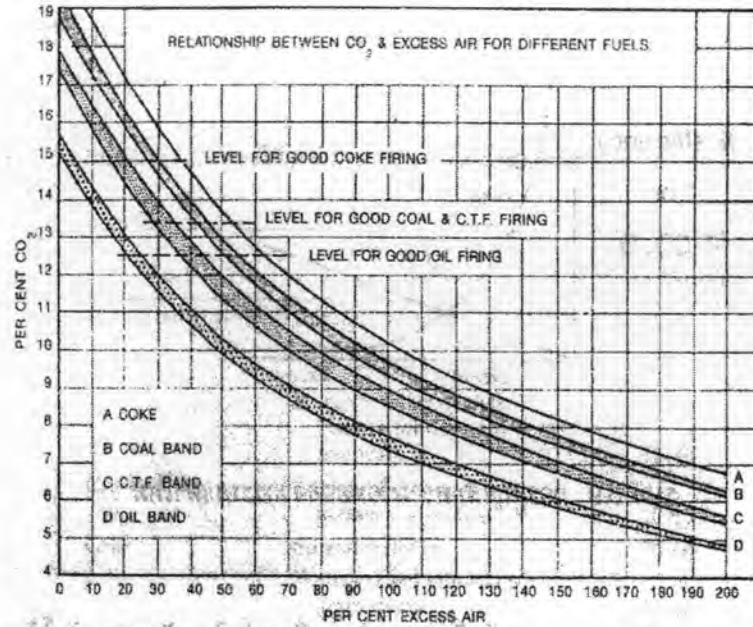
ระบบการเผาไหม้ทั่วไปจะใช้อากาศเผาไหม้เกินพอเพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ในกรณีของแก๊สเชื้อเพลิง มวลของแก๊สและอากาศผสมเป็นเนื้อเดียวกันอยู่แล้ว จึงไม่ต้องใช้อากาศเกินพอ หรือใช้เพียงเล็กน้อย (ระหว่าง 0 – 10 เปอร์เซ็นต์) ในกรณีของเชื้อเพลิงเหลว หยดน้ำมันเกิดการระเหยเป็นไอพร้อมๆกับการเผาไหม้ จำเป็นต้องใช้อากาศเกินพอสูงกว่าในกรณีของแก๊สเชื้อเพลิงเพื่อให้ทันกับการระเหย (ระหว่าง 5 – 20 เปอร์เซ็นต์) ในกรณีเชื้อเพลิงแข็ง นอกจากต้องการแบ่งอากาศเป็นสองส่วนแล้ว ยังต้องใช้อากาศเกินพอสูงมาก (ระหว่าง 15 – 60 เปอร์เซ็นต์) ทั้งอากาศส่วนแรกเพื่อทำปฏิกิริยากับสารระเหยที่ถูกไล่ออกจากพื้นผิวเชื้อเพลิงแข็งอย่างรวดเร็ว และอากาศส่วนที่สองเพื่อทำปฏิกิริยากับคาร์บอนในกากของแข็ง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระบบและอุปกรณ์ด้วย ปริมาณอากาศเกินพอในระบบการเผาไหม้เชื้อเพลิง แสดงได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ปริมาณอากาศเกินพอที่มักใช้กับระบบการเผาไหม้เชื้อเพลิง (กัญญา บุญเกียรติ, 2544)

Fuel	Type of Furnace or Burners	Excess Air (% by Weight)
Pulverized coal	Completely 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-frame	20 - 20
Wood	Dutch oven (10-23% through grates) and Hoff-type	20 - 25
Bagasse	All Furnaces	25 - 35

ปริมาณอากาศเกินพอที่เหมาะสมนั้นนอกจากจะหมายถึงการเผาไหม้ที่สมบูรณ์แล้ว ยังมีผลให้การสูญเสียความร้อนที่ต่ำที่สุดด้วย ทั้งนี้เนื่องจากถ้าใช้อากาศไม่พอ จนเกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์จะทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนในรูปขององค์ประกอบแก๊ส และของแข็งที่ยังเผาไหม้ได้ออกไปจากระบบ เรียกว่า การสูญเสียศักยภาพทางความร้อน เช่น แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ไฮโดรเจน (H_2) หรือ คาร์บอน (C) เป็นต้น โดยเฉพาะแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งมักจะพบเสมอ แต่ถ้าใช้อากาศมากเกินไป ปริมาตรอากาศส่วนที่เกินพอที่เข้ามาจะออกไปจากระบบโดยที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยา ทำให้ปริมาตรรวมของฟลูแก๊สเพิ่มขึ้น ความร้อนสูญเสียสัมผัสที่ออกไปจากระบบนี้ เรียกว่า การสูญเสียความร้อนสัมผัส ดังนั้นต้องมีจุดที่เหมาะสมที่ทำให้การสูญเสียความร้อนต่ำที่สุด

ถ้าคำนวณดุลมวลของระบบเผาไหม้จะพบว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และ เปอร์เซ็นต์ออกซิเจน (O_2) คือถ้าอากาศเกินพอน้อย ฟลูแก๊สมีความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์สูง และออกซิเจนต่ำ ตรงกันข้าม ถ้ามีอากาศเกินพอมาก ฟลูแก๊สจะถูกเจือจางด้วยไนโตรเจน (N_2) และออกซิเจน (O_2) เกินพอจากอากาศ จึงมีความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำ และออกซิเจนสูง ในการควบคุมอากาศเกินพอจึงอาจใช้เครื่องมือวัดความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ หรือออกซิเจน เพียงชนิดเดียวก็ได้ ในหลักการวัดความเข้มข้นของแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ ในฟลูแก๊สให้ผลถูกต้องมากกว่าเพราะไม่มีผลจากการรั่วของอากาศเข้าสู่อุปกรณ์การวัด จึงเป็นที่นิยมมากกว่า โดยความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์คาร์บอนไดออกไซด์และเปอร์เซ็นต์อากาศเกินพอ แสดงได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง เปอร์เซนต์คาร์บอนไดออกไซด์ และเปอร์เซนต์อากาศเกินพอ
(กัญจนา บุญเกียรติ, 2544)

2.1.2 ข้อเด่นของการเผาไหม้ (สำเร็จ จักรใจ, 2547)

การเผาไหม้ คือ ปฏิกริยาเคมีของสารอินทรีย์อย่างแรกสุดที่มนุษย์นำมาใช้ประโยชน์ และอาจกล่าวได้ว่าเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดที่ทำให้อารยธรรมของมนุษย์เจริญสูงขึ้นตามลำดับเหมือนเช่นที่เป็นอยู่ในปัจจุบันนี้และต่อไปในอนาคต ความสำคัญของการเผาไหม้สามารถตระหนักให้เห็นได้อย่างชัดเจนจาก พลังงานมากกว่า 90 เปอร์เซนต์ ที่ใช้อยู่ทั้งหมดในโลกปัจจุบันนี้ (ทั้งที่เป็นเชื้อเพลิงฟอสซิล และไม่ใช่ เช่น ชีวมวล) อาศัยกระบวนการเผาไหม้เป็นหลักในการแปรรูปเป็นความร้อนหรืองานเพื่อใช้ประโยชน์ แม้ว่าในอนาคตโลกจะเปลี่ยนมาใช้เชื้อเพลิงหมุนเวียน (เช่น ไบโอบีโกลที่บ่มเพาะขึ้นมาโดยอาศัยแบคทีเรียช่วยเร่งในการหมัก เป็นต้น) เพิ่มมากขึ้นเพื่อทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลด้วยเหตุผลเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อม ก็ยังเชื่อได้ว่าการเผาไหม้ยังคงต้องมีบทบาทสำคัญต่อไปเหมือนเดิมในการเผาไหม้เชื้อเพลิงหมุนเวียนเหล่านั้นเพื่อนำพลังงานมาใช้ประโยชน์

ข้อดีของการเปลี่ยนรูปพลังงานโดยอาศัยกระบวนการเผาไหม้เมื่อเทียบกับวิธีอื่นๆเช่น ปฏิกริยานิวเคลียร์ เป็นต้น มีหลายประการ เช่น

1. ง่ายแก่การแปรรูปพลังงานและไม่อันตรายจากการแผ่กัมมันตภาพรังสีเหมือนปฏิกริยานิวเคลียร์ เราสามารถพบพลังงานมหาศาลหลายล้านจูลในกระเปาะเล็กในรูปของไฟแช็กที่ใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิงขนาดเล็กกระทัดรัดและพร้อมที่จะนำออกมาเผาไหม้เพื่อนำความร้อนไปใช้ประโยชน์ด้วยวิธีง่ายๆเพียงแค่ใช้มือข้างเดียวติดไฟแช็กเท่านั้น

2. แหล่งพลังงานเพื่อการเผาไหม้ ได้แก่ น้ำมัน แก๊สธรรมชาติ ถ่านหิน และพลังงานชีวมวล ยังมีอีกมาก
3. มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงานสูงมากขึ้นถ้านำไปใช้ในกระบวนการร่วม เช่น วัฏจักรร่วมระหว่างวัฏจักรกังหันไอน้ำและวัฏจักรกังหันแก๊สมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนรวมสูงเกือบ 60 เปอร์เซ็นต์
4. มีความคุ้มทางเศรษฐศาสตร์ที่ดีเพราะต้นทุนการก่อสร้างระบบเตาเผาไหม้ต่ำ
5. เข้าได้กับสิ่งแวดล้อมโดยมีเงื่อนไขว่าต้องเป็นเชื้อเพลิงสะอาด ในกรณีที่เชื้อเพลิงสกปรกและสารมลพิษก็สามารถใช้เทคนิคการเผาไหม้ขั้นสูงที่ได้รับการพิสูจน์แล้วเพื่อควบคุมให้การปลดปล่อยมลพิษอยู่ในระดับที่ยอมรับได้
6. ปลอดภัยและมีความเชื่อถือได้สูง ต้นทุนการบำรุงรักษาต่ำ
7. มีความยืดหยุ่นของเชื้อเพลิงสูง โดยเฉพาะในเรื่องเชื้อเพลิงที่จะนำมาเผาไหม้ ระบบการเผาไหม้ที่ดีจะต้องเผาไหม้เชื้อเพลิงได้หลายรูปแบบโดยมีการดัดแปลงระบบน้อยที่สุดหรือไม่มีเลย

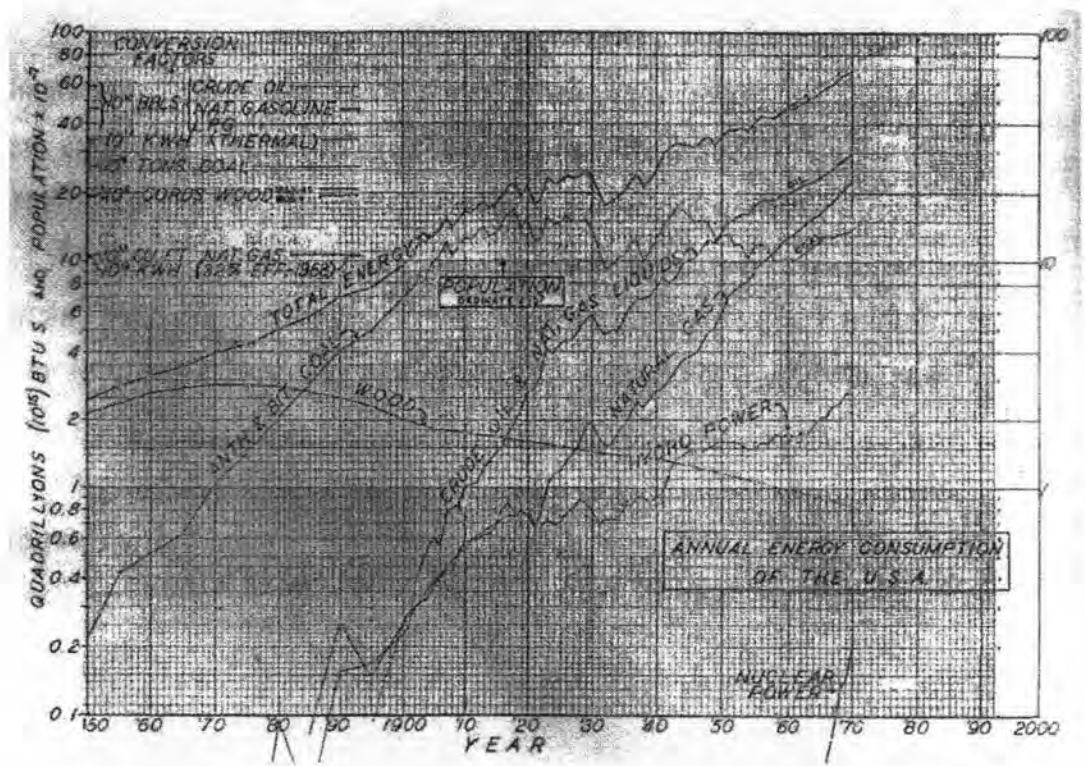
การใช้ประโยชน์จากการเผาไหม้สามารถจำแนกตามชนิดของพลังงานที่เปลี่ยนรูปจากการเผาไหม้ได้ดังนี้

1. เพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยการเผาไหม้ถ่านหินบดละเอียดในหม้อไอน้ำขนาดใหญ่ และโดยการเผาไหม้แก๊สธรรมชาติในเครื่องยนต์กังหันแก๊ส เป็นต้น ไฟฟ้าจะถูกแปรรูปต่อไปเป็น แสงสว่าง ความร้อน และ งานทางกล
2. เพื่อผลิตงานทางกลโดยตรงเพื่อกิจการด้านขนส่ง และคมนาคม เช่น การเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลวเพื่อขับเคลื่อนรถไฟ รถยนต์ เรือเดินสมุทร และ เครื่องบิน การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งและเชื้อเพลิงเหลวเพื่อขับเคลื่อนจรวด เพื่อกิจการทางทหารและการสำรวจอวกาศ เป็นต้น
3. เพื่อผลิตความร้อนในกระบวนการทางอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมผลิตวัสดุต่างๆ (เหล็ก แก้ว เซรามิก ปูนซีเมนต์ ฯลฯ) อุตสาหกรรมเคมี (ผงคาร์บอน เม็ดพลาสติก การกลั่นน้ำมัน ฯลฯ) เป็นต้น
4. เพื่อผลิตความร้อนเพื่อการอยู่อาศัยของมนุษย์ เช่น การหุงต้ม และ การให้ความอบอุ่นในครัวเรือนและอาคาร เป็นต้น

2.2 อุปสงค์และอุปทานของพลังงาน (สำเริง จักรใจ, 2547)

อุปสงค์พลังงานของโลกเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องนับตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันตามการเพิ่มขึ้นของประชากรโลกที่ไม่สามารถควบคุมได้ มาตรฐานการดำรงชีวิตของมนุษย์ยิ่งสูงขึ้น ยิ่ง

ต้องการสิ่งอำนวยความสะดวกมากขึ้น ยิ่งต้องใช้พลังงานมากยิ่งขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งประเทศสหรัฐอเมริกาเพียงประเทศเดียวมีความต้องการใช้พลังงานมากเกือบเท่ากับครึ่งหนึ่งของพลังงานที่ทุกประเทศในโลกใช้รวมกัน ทั้งนี้เพราะสหรัฐอเมริกาเป็นประเทศที่มีการพัฒนาทางด้านอุตสาหกรรมสูงที่สุดของโลก มีประชากรมากและมีมาตรฐานการดำรงชีวิตค่อนข้างสูงเพราะมีการใช้พลังงานไปกับทั้งอุตสาหกรรมและธุรกิจบริการที่มาก ประกอบกับประเทศต่างๆ ก็กำลังเจริญรอยตามสหรัฐอเมริกาไปอย่างไม่รู้ตัว ดังนั้นจึงสามารถใช้สถานภาพพลังงานของสหรัฐอเมริกาเป็นกรณีศึกษาและเพื่อเป็นตัวแทนของสถานภาพพลังงานของโลกก็อาจจะไม่เป็นการผิดมากนัก



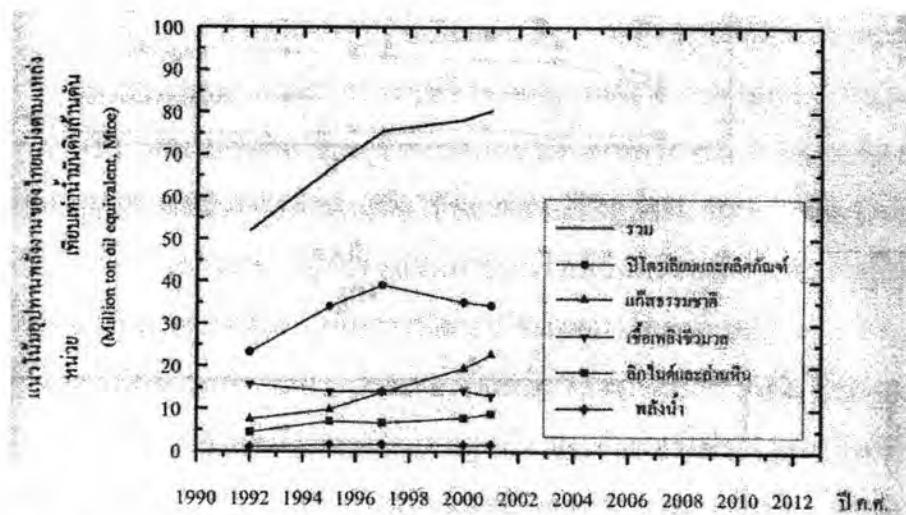
รูปที่ 2.4 ตัวอย่างบันทึกอุปทานพลังงานรายปีในช่วง 120 ปี (ค.ศ. 1850 – 1970) ของประเทศสหรัฐอเมริกา (สำเร็จ จักรใจ, 2547)

รูปที่ 2.4 แสดงตัวอย่างบันทึกอุปทานพลังงานหรือการบริโภคพลังงานรายปีในช่วง 120 ปี นับตั้งแต่ปี ค.ศ. 1850 – 1970 ของประเทศสหรัฐอเมริกา แหล่งพลังงานที่ใช้ได้แก่ ไม้ (wood) ถ่านหิน (anthracite & bituminous) น้ำมันดิบรวมทั้งแก๊สธรรมชาติเหลวหรือคอนเดนเสท (crude oil & natural gas liquids or condensate) แก๊สธรรมชาติ (natural gas) พลังน้ำ (hydro power) พลังงานนิวเคลียร์ (nuclear power) และยังได้แสดงผลรวมของพลังงานทั้งหมด (total energy) ไว้

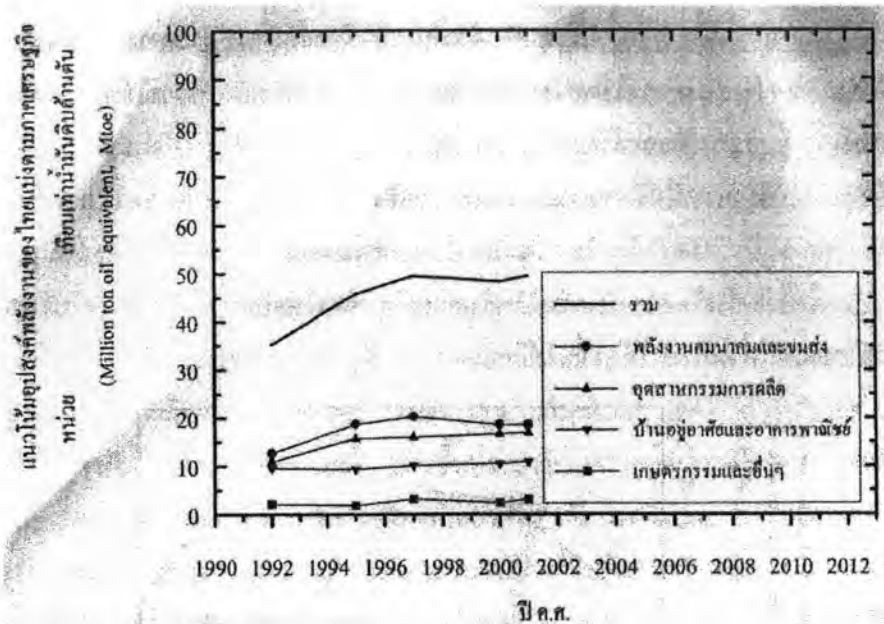
ด้วย แม้ว่าข้อมูลดังกล่าวค่อนข้างจะเก่าแต่ก็ให้แนวโน้มที่น่าสนใจควรค่าแก่การศึกษาจนทำให้ช่วงเวลาที่ผ่านมา นับจากปี 1970 จนถึงปัจจุบัน ไม่น่าจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของแนวโน้มดังกล่าวของกราฟมากนัก เพราะจำนวนประชากรของโลกยังคงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง แกนตั้งของกราฟแสดงถึงปริมาณพลังงานและจำนวนประชากร (population) บนสเกลล็อก เมื่อพิจารณาการเติบโตของอุปทานพลังงานแบ่งตามแหล่งเชื้อเพลิงแต่ละชนิดตลอดช่วงเวลา 120 ปี ดังกล่าว พบว่าปริมาณการใช้เชื้อเพลิงดั้งเดิมคือฟืนมีแนวโน้มลดลงในขณะที่ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงแบบใหม่ ได้แก่ ถ่านหิน น้ำมันรวมทั้งแก๊สธรรมชาติเหลว และแก๊สธรรมชาติ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด และเริ่มมีการใช้พลังงานนิวเคลียร์เชิงสันติเพื่อผลิตไฟฟ้าราวช่วงปี ค.ศ. 1960 - 1970 เป็นต้นมา ซึ่งได้เน้นย้ำให้เห็นถึงความสำคัญของการเผาไหม้อีกครั้งหนึ่งในอดีตที่ผ่านมาจนถึงปี ค.ศ. 1970 สหรัฐอเมริกาหรือทุกประเทศในโลกนี้ได้พึ่งพา “กระบวนการเผาไหม้” เป็นหลักเพื่อเปลี่ยนรูปพลังงานมาโดยตลอด จากเหตุการณ์ดังกล่าวได้แสดงให้เห็นถึงวิวัฒนาการของการค้นพบและการใช้ประโยชน์จากปิโตรเลียมตามยุคสมัยตลอดจนความก้าวหน้าทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตาม สิ่งที่สำคัญที่สุดที่เห็นได้จากกราฟคือ เส้นแนวโน้มการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องของปริมาณพลังงานรวม (กราฟเส้นบนสุด) โดยมีอัตราการเพิ่มขึ้นเฉลี่ยต่อปีเกือบคงที่ประมาณ 3.67 เปอร์เซ็นต์ สำหรับในช่วง 40 ปี ย้อนหลัง โดยนับจากปี ค.ศ. 1970 และมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 4.5 เปอร์เซ็นต์ ถ้านับย้อนหลังไป 9 ปี จากปี ค.ศ. 1970 เช่นเดียวกัน ตัวเลขอัตราการเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 4.5 เปอร์เซ็นต์ต่อปีนี้มีค่าใกล้เคียงกับอัตราการเพิ่มขึ้นเฉลี่ยของปริมาณพลังงานรวมโลกในยุคปัจจุบัน (ค.ศ. 2003) ซึ่งอยู่ที่ประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ แม้เวลาได้ล่วงเลยผ่านไปถึง 33 ปี แล้วก็ตาม ทำให้เกิดคำถามตามมาว่า ถ้าปริมาณพลังงานรวมของโลกที่บริโภคยังคงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นนี้ต่อไป มนุษย์จะสามารถสร้างอุปทานพลังงานมาสนองต่อความต้องการได้อย่างเพียงพอหรือไม่จึงเป็นคำถามที่ตอบได้ยากมาก อย่างไรก็ตาม ได้เคยมีการทำนายเกี่ยวกับเรื่องนี้ไว้อย่างน่าฟังว่า กราฟอุปทานพลังงานรวมที่พุ่งขึ้นอย่างต่อเนื่องทุกปี จนเป็นเส้นตรงบนกราฟเขมิล็อกนั้นไม่อาจเกิดขึ้นตลอดไปได้และจะต้องโค้งลงในที่สุดเพราะโลกมีขนาดที่จำกัดแต่ก็มีคำถามตามมาอย่างไม่สิ้นสุดเช่นกันว่าจะเริ่มโค้งเมื่อไร อาจเป็น 15 ปี 20 ปี หรือก่อนปี ค.ศ. 2020 ก็ไม่มีใครสามารถตอบได้ ดังนั้นจึงไม่ประหลาดใจที่มนุษย์ได้หาทางออกเกี่ยวกับเรื่องนี้ไว้แต่เนิ่นๆ คือเร่งสำรวจหาแหล่งพลังงานใหม่เพิ่มเติมมากขึ้นเพื่อให้มั่นใจได้ว่ามีพลังงานสำรองใช้ไปได้อีกนานพร้อมทั้งหาทางปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานให้สูงขึ้นควบคู่กันไปเพื่อยืดเวลาการหมดลงของพลังงานออกไปให้ได้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้

อุปทานและอุปสงค์พลังงานของไทยก็ได้มีรายงานออกมาให้ทราบเช่นกันดังแสดงในรูปที่ 2.5 และ 2.6 ตามลำดับ ซึ่งการบันทึกอาจไม่ยาวนานนับเป็นร้อยปีเหมือนของประเทศสหรัฐอเมริกา แต่ก็ทำให้ทราบถึงแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของทั้งอุปทานและอุปสงค์พลังงานในช่วง

ย้อนหลัง 9 ปีที่ผ่านมาของประเทศได้อย่างชัดเจน พลังงานส่วนใหญ่ประมาณ 95 เปอร์เซ็นต์ ถูกนำไปใช้ในภาคเศรษฐกิจ 3 ประเภทเป็นหลักเรียงตามลำดับการใช้พลังงานจากมากไปหาน้อยคือ คมนาคมและการขนส่ง อุตสาหกรรม และ บ้านและอาคารพาณิชย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ภาคคมนาคมและการขนส่งนั้นใช้พลังงานสูงสุดมาโดยตลอดและสูงถึงประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ภาคคมนาคมและการขนส่งยังใช้พลังงานในรูปผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมมากกว่า 60 เปอร์เซ็นต์ ของความต้องการทั้งประเทศอีกด้วย นับเป็นโจทย์ที่สำคัญประการหนึ่งของประเทศที่จะต้องหาทางแก้ไขเพื่อให้การใช้พลังงานในภาคคมนาคมและการขนส่งลดต่ำลง เพื่อให้การใช้พลังงานในภาคอุตสาหกรรมสูงขึ้นจนสามารถสร้างมูลค่าเพิ่มจากสินค้าได้มาก ทำให้อัตราการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจสูงกว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของอุปสงค์พลังงานซึ่งเป็นสิ่งที่ต้องการได้ ดังนั้นการปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานให้สูงขึ้นกว่าเดิม ทั้งในภาคคมนาคมและการขนส่ง และภาคอุตสาหกรรม จึงเป็นสิ่งที่จำเป็นต้องดำเนินการอย่างรีบด่วนของไทย อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มขีดความสามารถการแข่งขันทางการค้าให้สูงขึ้นอีกด้วย



รูปที่ 2.5 แนวโน้มอุปทานพลังงานของไทยแบ่งตามแหล่งเชื้อเพลิง หน่วยคิดเทียบเท่าน้ำมันดิบล้านตัน (สำเร็จ จักรใจ, 2547)



รูปที่ 2.6 แนวโน้มอุปสงค์พลังงานของไทยแบ่งตามภาคเศรษฐกิจ หน่วยคิดเทียบเท่าน้ำมันดิบ
ล้านตัน (สำเนา จักรใจ, 2547)

จากรูปที่ 2.5 แสดงแนวโน้มของอุปทานพลังงานที่แบ่งตามแหล่งเชื้อเพลิงในช่วงเวลา 9 ปีที่ผ่านมาของไทย (ค.ศ. 1992 – ค.ศ. 2001) เป็นที่ชัดเจนว่าอุปทานพลังงานรวม (กราฟเส้นบนสุด) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง แม้ว่าการเติบโตทางเศรษฐกิจของประเทศจะเริ่มชะลอตัวนับตั้งแต่ปี ค.ศ. 1997 เป็นต้นมา ซึ่งมีผลเพียงแค่ว่าทำให้ความลาดชันของกราฟในช่วงปี ค.ศ. 1997 ถึง ค.ศ. 2001 มีค่าน้อยลงเล็กน้อยเท่านั้น ในปีล่าสุด (ค.ศ. 2001) ประเทศไทยมีอุปทานพลังงานรวมทุกแหล่งเชื้อเพลิงทั้งที่ผลิตได้เองในประเทศและต้องนำเข้าจากต่างประเทศรวมประมาณ 80.3 ล้านตันน้ำมันดิบเทียบเท่า ในขณะที่อุปสงค์พลังงานในปีเดียวกันมีค่าประมาณ 49.5 ล้านตันน้ำมันดิบเทียบเท่า (ดูรูปที่ 2.6 ประกอบ) ทำให้มีส่วนต่างเท่ากับ 30.8 ล้านตันน้ำมันดิบเทียบเท่า ซึ่งหมายถึงการสูญเสียเนื่องจากการแปรรูปพลังงานระหว่างอุปทานและอุปสงค์พลังงาน เมื่อพิจารณารูปที่ 2.5 พบว่าในปีเดียวกันนี้ ประมาณ 98 เปอร์เซ็นต์ของอุปทานพลังงานทั้งหมด (ยกเว้นพลังงานน้ำ) ต้องอาศัยกระบวนการเผาไหม้ทั้งนั้นในการแปรรูปพลังงานเพื่อใช้ประโยชน์ในรูปงาน (เช่น ไฟฟ้า) และความร้อน เป็นการตอกย้ำให้เห็นถึงความสำคัญของกระบวนการเผาไหม้อีกครั้งหนึ่งที่ประเทศไทยได้ใช้เป็นกระบวนการหลักในการแปรรูปพลังงานเพื่อการพัฒนาประเทศ

เมื่อจำแนกอุปทานพลังงานตามประเภทเชื้อเพลิง (ฟอสซิลหรือหมุนเวียน) พบว่าอุปทานพลังงานส่วนใหญ่มาจากเชื้อเพลิงฟอสซิลโดยสูงถึง 81.8 เปอร์เซ็นต์ และในจำนวนนี้เป็นปิโตรเลียมและผลิตภัณฑ์ 42.6 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งต้องนำเข้ามาประมาณ 18 เปอร์เซ็นต์ของอุปทาน

พลังงานทั้งหมด หรือ 42 เปอร์เซ็นต์ของปิโตรเลียมและผลิตภัณฑ์ การนำเข้าก๊าซธรรมชาติและปิโตรเลียมที่มีในประเทศมาใช้มากขึ้นสามารถลดการนำเข้าปิโตรเลียมส่วนที่ขาดไปได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ หากส่งเสริมให้มีการใช้พลังงานชีวมวลอย่างมีประสิทธิภาพสูงให้มากยิ่งขึ้น (แทนที่จะมีปริมาณการใช้เหลือแค่ 16 เปอร์เซ็นต์เหมือนที่ปรากฏ) ก็จะช่วยลดการพึ่งพาการนำเข้าปิโตรเลียม (ซึ่งมีราคาแพงและไม่แน่นอนเพราะขึ้นกับสถานการณ์การเมืองระหว่างประเทศ) ได้มากยิ่งขึ้น

หากจำแนกอุปทานพลังงานตามการได้มา (นำเข้าจากต่างประเทศหรือมีภายในประเทศ) พบว่าอุปทานพลังงานส่วนใหญ่มาจากภายในประเทศ ได้แก่ ก๊าซธรรมชาติ พลังงานน้ำ ลิกไนต์ และ ชีวมวล โดยมีสัดส่วนรวมมากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ของอุปทานพลังงานทั้งหมด (ยังไม่รวมพลังงานจากแสงอาทิตย์และลมเพราะการประเมินการนำมาใช้ประโยชน์ยังไม่แน่นอน) แสดงให้ทราบว่าประเทศไทยสามารถยืนอยู่ได้ด้วยพึ่งพาพลังงานจากแหล่งภายในประเทศได้สูงในระดับหนึ่ง

จากที่ได้กล่าวมา ถึงแม้ว่าอุปทานพลังงานยังมีสำรองอยู่อีกมากแต่แนวโน้มความต้องการพลังงานยังเพิ่มขึ้นอยู่ทุกวันและเชื่อว่ายังต้องพึ่งกระบวนการเผาไหม้เป็นหลักอีกต่อไปแต่จำเป็นต้องกระทำอย่างมีประสิทธิภาพ

2.3 ถ่านหิน (สำเร็จ จักรใจ, 2547)

ถ่านหินเกิดจากไม้และชีวมวลชนิดอื่นๆ ที่ทับถมกันและอัดแน่นเป็นเวลานานหลายแสนปี จนกระทั่งกลายเป็นหิน โดยเริ่มจากพืชในบริเวณที่ชื้นแฉะและอับอากาศแล้วเกิดการสลายตัวทางเคมีชีวภาพพร้อมกับการทับถมกันของพืชชนิดต่างๆ เพิ่มเติมเข้ามาจนมีความลึกมากขึ้นเรื่อยๆ ทำให้พืชมีความชื้น ความพรุน ปริมาณสารระเหย พร้อมกับปริมาณของออกซิเจนและไฮโดรเจนลดลงในขณะที่ปริมาณคาร์บอนเพิ่มมากขึ้น พืชจะเปลี่ยนเป็นถ่านหินที่มีศักดิ์สูงขึ้นตามลำดับ (มีปริมาณคาร์บอนคงตัวมากขึ้น) คือ ลิกไนต์ บิทูมินัส และแอนทราไซต์ในที่สุด เรียกกระบวนการเปลี่ยนแปลงนี้ว่าการเกิดถ่านหิน ถ่านหินมีองค์ประกอบหลักคือ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน กำมะถัน และสารอนินทรีย์อื่นๆ (ในปริมาณเล็กน้อย) ที่จะกลายเป็นถ่านหลังการเผาไหม้ เช่น อลูมิเนียม เหล็ก แคลเซียม แมกนีเซียม โพแทสเซียม แมงกานีส ฟอสฟอรัส และออกไซด์ของซิลิกอน (เช่น แร่ไพไรต์ แร่แคลไซต์ และแร่แคลิไนต์ เป็นต้น) โดยสมบัติของถ่านหินเปรียบเทียบกับไม้และพืช แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สมบัติของถ่านหิน เปรียบเทียบกับไม้และพีต (กัญจนา บุญเกียรติ, 2544)

ชนิด	ร้อยละความชื้น (ตามสภาพ)	ร้อยละความชื้น (ผึ่งแห้งในอากาศ)	ร้อยละ, แห้งและปราศจากเถ้า		
			คาร์บอน	ไฮโดรเจน	ออกซิเจน
ไม้	30-60	10-15	50	6.0	43
พีต	+90	20-25	55-65	5.5	32
ลิกไนต์	20-40	15-25	65-73	4.5	21
ซับบิทูมินัส	10-20	10-20	73-78	6.0	16
บิทูมินัส	13-1	13-1	78-92	5.3	8
แอนทราไซต์	2-3.5	2-3.5	92-96	2.5	4

2.4 พลังงานหมุนเวียนและพลังงานจากชีวมวล

พลังงานหมุนเวียนในโลกนี้ สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทหลัก ดังนี้

- (1) พลังงานหมุนเวียนที่มาจากแสงอาทิตย์โดยตรง คือ พลังงานแสงอาทิตย์
- (2) พลังงานหมุนเวียนที่มาจากแสงอาทิตย์โดยอ้อม เช่น พลังงานลม, คลื่น และ ชีวมวล
- (3) พลังงานหมุนเวียนที่ไม่เกี่ยวข้องกันกับแสงอาทิตย์ เช่น พลังงานใต้พิภพ, น้ำขึ้น-น้ำลง

พลังงานทั้งสามประเภท ต่างมีศักยภาพที่แตกต่างกันออกไปตามลักษณะภูมิประเทศและภูมิอากาศ สำหรับในประเทศไทยนั้น นอกเหนือจากพลังงานจากแสงอาทิตย์แล้ว พลังงานชีวมวลจัดได้ว่าเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ และที่สำคัญคือ มีศักยภาพสูงมากอีกด้วย

เชื้อเพลิงชีวมวล (biomass)

ชีวมวล (biomass) หมายถึง ผลผลิตจากพืชและสัตว์ (โดยที่ไม่นับการเป็นเชื้อเพลิงฟอสซิลไปแล้ว) ที่เป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่สำคัญของโลก และถูกจัดเป็นพลังงานทดแทนพลังงานจากฟอสซิลซึ่งมีอยู่อย่างจำกัดและอาจหมดลงได้ แบ่งชีวมวลตามแหล่งที่มาได้ดังนี้

1. พืชผลทางการเกษตร (agricultural crops) เช่น อ้อย มันสำปะหลัง ข้าวโพด ข้าวฟ่าง ที่เป็นแหล่งของคาร์โบไฮเดรต แป้งและน้ำตาล รวมถึงพืชน้ำมันต่างๆ ที่สามารถนำน้ำมันมาใช้เป็นพลังงานได้

2. เศษวัสดุเหลือทิ้งการเกษตร (agricultural residues) เช่น ฟางข้าว เศษลำต้นข้าวโพด ชังข้าวโพด เหง้ามันสำปะหลัง

3. ไม้และเศษไม้ (wood and wood residues) เช่น ไม้โตเร็ว ยูคาลิปตัส กระถินณรงค์ เศษไม้จากโรงงานผลิตเครื่องเรือน และโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ เป็นต้น

4. ของเหลือจากจากอุตสาหกรรมและชุมชน (waste streams) เช่น กากน้ำตาล และขานอ้อยจากโรงงานน้ำตาล แกลบ ชี้อ้อย เส้นใยปาล์ม และกะลาปาล์ม

พลังงานชีวมวล (bio-energy) หมายถึง พลังงานที่ได้จากชีวมวลชนิดต่างๆ ดังที่กล่าวแล้วข้างต้น โดยกระบวนการแปรรูปชีวมวลไปเป็นพลังงานรูปแบบต่างๆ มีดังนี้คือ

1. การเผาไหม้โดยตรง (combustion) เมื่อนำชีวมวลมาเผา จะได้รับความร้อนออกมาตามค่าความร้อนของชนิดชีวมวล ความร้อนที่ได้จากการเผาสามารถนำไปใช้ในการผลิตไอน้ำที่มีอุณหภูมิ และความดันสูง ไอน้ำนี้จะถูกนำไปขับเคลื่อนกังหันไอน้ำเพื่อผลิตไฟฟ้าต่อไป ตัวอย่างชีวมวลประเภทนี้คือ เศษวัสดุทางการเกษตร และเศษไม้

2. การผลิตก๊าซ (gasification) เป็นกระบวนการเปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็งหรือชีวมวลให้เป็นแก๊สเชื้อเพลิง เรียกว่าแก๊สชีวภาพ (biogas) มีองค์ประกอบของแก๊สมีเทน แก๊สไฮโดรเจน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ สามารถนำไปใช้สำหรับกังหันแก๊ส (gas turbine)

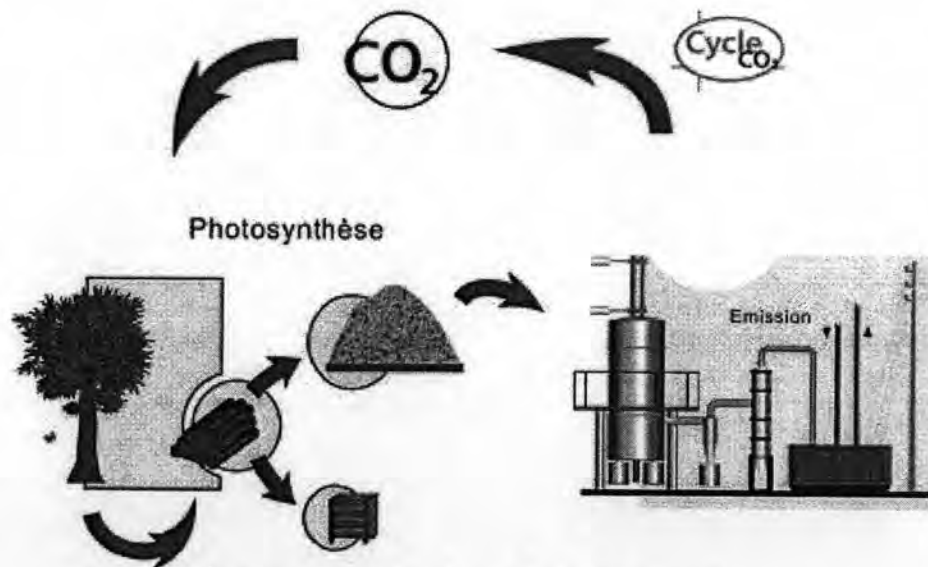
3. การหมัก (fermentation) เป็นการนำชีวมวลมาหมักด้วยแบคทีเรียในภาวะไร้อากาศ ชีวมวลจะถูกย่อยสลายและแตกตัว เกิดแก๊สชีวภาพ (biogas) ที่มีองค์ประกอบของแก๊สมีเทนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทนใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์สำหรับผลิตไฟฟ้า นอกจากนี้สามารถใช้ขยะอินทรีย์ชุมชน มูลสัตว์ น้ำเสียจากชุมชนหรืออุตสาหกรรมเกษตร เป็นแหล่งวัตถุดิบชีวมวลได้

4. การผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากพืช มีกระบวนการที่ใช้ผลิตดังนี้

- กระบวนการทางชีวภาพ ทำการย่อยสลายแป้ง น้ำตาล และเซลลูโลสจากพืชทางการเกษตร เช่น อ้อย มันสำปะหลัง ข้าวโพด ข้าวฟ่างหวาน กากน้ำตาล และเศษลำต้นอ้อย ให้เป็นเอทานอล เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงเหลวในเครื่องยนต์เบนซิน
- กระบวนการทางฟิสิกส์และเคมี โดยสกัดน้ำมันออกจากพืชน้ำมัน จากนั้นนำน้ำมันที่ได้ไปผ่านกระบวนการทรานส์เอสเตอร์ฟิเคชัน (trans-esterification) เพื่อผลิตเป็นไบโอดีเซล
- กระบวนการใช้ความร้อนสูง เช่นกระบวนการไพโรไลซิส เมื่อวัสดุทางการเกษตรได้รับความร้อนสูงในสภาพไร้ออกซิเจน จะเกิดการสลายตัวเกิดเป็นเชื้อเพลิงในรูปของเหลวและแก๊สผสมกัน

พลังงานเชื้อเพลิงเหลวจากชีวมวลได้แก่ เอทานอล และไบโอดีเซล ชีวมวลเป็นพลังงานที่มาจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่ไม่มีวันหมดไป เพราะวงจรการผลิตชีวมวลคือวงจรของพืชที่มีระยะเวลาดสั้น ต่างจากน้ำมันหรือถ่านหินที่ต้องอาศัยการทับถมกันเป็นเวลาหลายล้านปี นอกจากนี้ ชีวมวลสามารถผลิตได้ภายในประเทศ เกษตรกรจะมีรายได้เพิ่มขึ้นจากการจำหน่ายชีวมวลสู่ผู้ใช้ และยังช่วยลดการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศได้อีกด้วย

ข้อดีที่สำคัญทางสิ่งแวดล้อมคือ การใช้ชีวมวลในการผลิตความร้อนหรือไฟฟ้าจะไม่เพิ่มปริมาณสุทธิของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศโลก ในกรณีที่เรามีการผลิตชีวมวลขึ้นมาเพื่อทดแทนชีวมวลที่ได้ใช้ไป เพราะจะทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ถูกหมุนเวียนมาใช้ในชีวมวลที่ผลิตใหม่ เท่ากับปริมาณก๊าซที่ถูกผลิตจากการเผาไหม้ชีวมวลนั้นๆ เนื่องจากพืชต้องหายใจเพื่อเอาแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปใช้ในการเจริญเติบโต ในขณะที่การเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลนั้น จะปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่อากาศอย่างรวดเร็ว อีกทั้งชีวมวลยังมีปริมาณกำมะถันต่ำกว่าเชื้อเพลิงฟอสซิลมากนัก หมายถึง การใช้ชีวมวล จะลดโอกาสในการเกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก (greenhouse effect) ซึ่งตรงข้ามกับการใช้น้ำมันในภาคขนส่ง หรือถ่านหินในโรงไฟฟ้า



รูปที่ 2.7 วงจรคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂ cycle)

(ที่มา www.xylowatt.com/resEN.htm วันที่ 16 เมษายน พ.ศ.2551)

แต่เมื่อมีข้อดี ชีวมวลก็ย่อมมีข้อเสีย ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า ชีวมวลมีการเก็บรักษาและการขนส่งที่ยาก และมีความเสี่ยงสูงในการจัดหาหรือรวบรวมปริมาณชีวมวลที่ต้องการใช้ให้คงที่ตลอดปี เพราะชีวมวลบางประเภทเช่นกากอ้อยมีจำกัดเพียงบางเดือน

อีกทั้งชีวมวลทุกประเภท ต่างต้องการพื้นที่ในการเก็บรักษาขนาดใหญ่กว่าเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น หากต้องการปริมาณความร้อนที่เท่ากัน จะต้องใช้แกลบในปริมาณที่มากกว่าน้ำมันเตา เป็นต้น ดังนั้นการพัฒนาระบบวิธีการจัดเก็บและขนส่งจึงสำคัญและจำเป็นอย่างมาก

แกลบเป็นพลังงานชีวมวลประเภทหนึ่ง ซึ่งประเทศไทยสามารถผลิตได้เป็นจำนวนมหาศาลในแต่ละปีในฐานะที่ประเทศไทยเป็นผู้ผลิตและส่งออกข้าวรายใหญ่ของโลก แกลบเป็นผลพลอยได้จากการสีข้าว โดยเมื่อนำข้าวเปลือก 1 ตัน มาผ่านกระบวนการแปรรูปต่างๆแล้ว จะใช้พลังงานทั้งสิ้น 30-60 กิโลวัตต์ชั่วโมง เพื่อให้ได้ข้าวประมาณ 650-700 กิโลกรัม และจะมีวัสดุที่เหลือจากกระบวนการผลิตหรือ แกลบประมาณ 220 กิโลกรัม หรือเทียบเท่าพลังงานไฟฟ้าได้ 90-125 กิโลวัตต์ชั่วโมง (ที่มา www.charcoal.snmcenter.com วันที่ 16 เมษายน พ.ศ. 2551)

2.5 การวิเคราะห์และทดสอบเชื้อเพลิงแข็ง (ลำเจิง จักรใจ, 2547)

การวิเคราะห์และทดสอบเชื้อเพลิงแข็งสามารถทำได้โดยใช้วิธีตามมาตรฐาน ASTM ซึ่งในที่นี้จะขอกกล่าวถึงแต่เฉพาะที่เห็นว่าสำคัญๆ เช่น การวิเคราะห์โดยประมาณ (proximate analysis) การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis) และค่าความร้อน

การวิเคราะห์โดยประมาณ (proximate analysis) ตามมาตรฐาน ASTM D3172 จะระบุปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหยที่เผาไหม้ได้ ปริมาณคาร์บอนคงตัว และ ปริมาณเถ้า ในการทดสอบตามมาตรฐานดังกล่าว ถ่านหินจะถูกบดเป็นผงขนาดเล็กกว่า 250 ไมโครเมตร และนำถ่านหินใส่ภาชนะเปิดประมาณ 1 กรัม ไปอบให้แห้งในเตาอบภายใต้อุณหภูมิประมาณ 104 – 110 องศาเซลเซียส จนได้น้ำหนักคงที่ (1 ชั่วโมง) น้ำหนักส่วนที่หายไปเมื่อเทียบกับน้ำหนักเดิม คือ ปริมาณความชื้น จากนั้นนำถ่านหินที่แห้งแล้วไปถูกทำให้ร้อนในภาชนะปิด (เพื่อป้องกันการเกิดออกซิเดชัน) ภายใต้อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เพื่อไล่สารระเหยที่เผาไหม้ได้จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ (7 นาที) น้ำหนักส่วนที่หายไปคือสารระเหยที่เผาไหม้ได้นั่นเอง จากนั้นนำถ่านหินที่เหลือจากการหาสารระเหยที่เผาไหม้ได้ไปอบในภาชนะเปิดภายใต้อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เพื่อให้เกิดการเผาไหม้จนได้น้ำหนักเหลือคงที่ (2 ชั่วโมง) น้ำหนักที่เหลือจะเป็นน้ำหนักของเถ้า ส่วนน้ำหนักที่หายไปคือปริมาณคาร์บอนคงตัวนั่นเอง

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis) ตามมาตรฐาน ASTM D3176 เป็นการวิเคราะห์ที่ให้ผลระบุถึงปริมาณธาตุต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของเชื้อเพลิงนั้นโดยระบุในลักษณะหลักอ้างอิงแห้งและไม่คิดเถ้า ปริมาณคาร์บอนและปริมาณไฮโดรเจนทั้งหมดที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงถูก

กำหนดโดยการเผาเชื้อเพลิงตัวอย่างในภาชนะปิดที่บรรจุออกซิเจนไว้อย่างเพียงพอแล้ววัดองค์ประกอบของไอเสียเพื่อคำนวณย้อนกลับไปหาปริมาณคาร์บอนและปริมาณไฮโดรเจนที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงนั้น ไนโตรเจนและกำมะถันจะถูกกำหนดโดยอาศัยวิธีทางเคมี ในขณะที่ออกซิเจนจะถูกระบุโดยค่า 100 ลบด้วยปริมาณของธาตุ C H N และ S

การกำหนดค่าความร้อนของเชื้อเพลิง ASTM D2015 ทำได้โดยใช้บอมบ์แคลอรีมิเตอร์

2.6 ฟลูอิดไอเซชัน

2.6.1 นิยาม (สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ, 2528)

คำว่า ฟลูอิดไอเซชัน เป็นนิยามที่ใช้อธิบายกระบวนการหรือวิธีการที่ทำให้ของแข็งซึ่งมีรูปร่างลักษณะเป็นเม็ดหรือชิ้น เมื่อสัมผัสกับของไหลแล้วเม็ดของแข็งเหล่านั้นจะมีสมบัติคล้ายของไหล ดังนั้น เมื่อนำเม็ดของแข็งกลุ่มหนึ่งมาวางไว้บนตะแกรงในหอคอดลองแล้วให้ของไหล (แก๊สของเหลว) ไหลผ่านจากด้านล่างของตะแกรงที่รองรับเม็ดของแข็งเหล่านั้น ของไหลก็จะผ่านชั้นของเม็ดของแข็งและไหลออกทางส่วนบนของหอคอดลอง เมื่อเพิ่มความเร็วของไหลขึ้นเรื่อยๆ ในที่สุดจะเห็นเม็ดของแข็งขยับตัวและลอยตัวขึ้นเป็นอิสระไม่เกาะติดกัน ของแข็งที่อยู่ในลักษณะนี้จะมีสมบัติคล้ายของไหล เรียกของแข็งที่ประพฤติตัวในลักษณะนี้ว่า ฟลูอิดไอเซชัน และเรียกปรากฏการณ์ดังกล่าวว่าฟลูอิดไอเซชัน

2.6.2 ประเภทของฟลูอิดไอเซชัน

งานของฟลูอิดไอเซชัน ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงปัจจุบันพอที่จะสรุปประเภทของงานได้เป็น 2 ประเภทด้วยกัน คือ ฟลูอิดไอเซชันสองสถานะและฟลูอิดไอเซชันสามสถานะ

1. ฟลูอิดไอเซชันสองสถานะ (two-phase fluidization) หมายความว่าในหอคอดลองหรือในเบดที่ใช้งานประกอบด้วยสองสถานะ คือ ของแข็งกับของไหล โดยที่ของไหลจะเป็นแก๊สหรือของเหลวอย่างใดอย่างหนึ่ง ดังนั้นฟลูอิดไอเซชัน 2 สถานะจึงแบ่งย่อยได้เป็น แก๊สฟลูอิดไอเซชัน (gas fluidization) และฟลูอิดไอเซชันของเหลว (liquid fluidization)

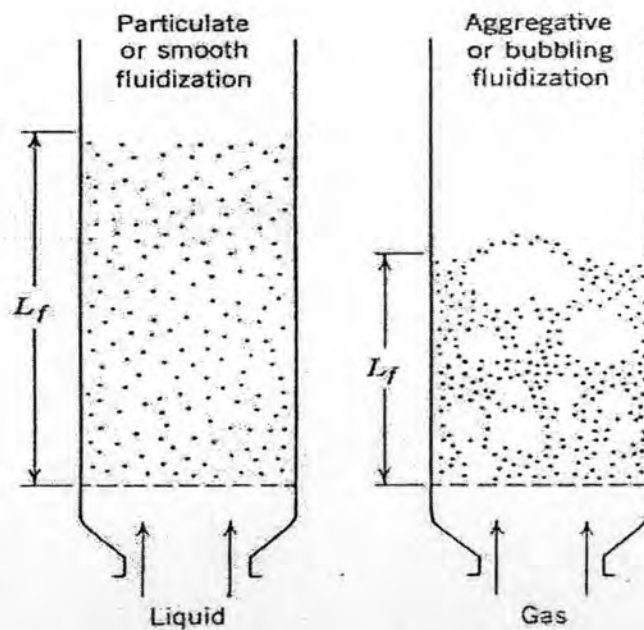
2. ฟลูอิดไอเซชันสามสถานะ (three-phase fluidization) หมายความว่าในหอคอดลองหรือในเบดจะประกอบด้วยของสามสถานะอยู่พร้อม คือ ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส

สำหรับฟลูอิดไอเซชันสามสถานะนั้นเป็นกระบวนการที่พัฒนาไปจากฟลูอิดไอเซชันสองสถานะ หอคอดลองที่เป็นฟอง (bubble column) และหอคอดลองที่บรรจุด้วยของแข็ง (packed bed) ดังนั้นจึงมีกลไกที่ซับซ้อนมากกว่า การคำนวณต้องใช้หลักคณิตศาสตร์ขั้นสูง

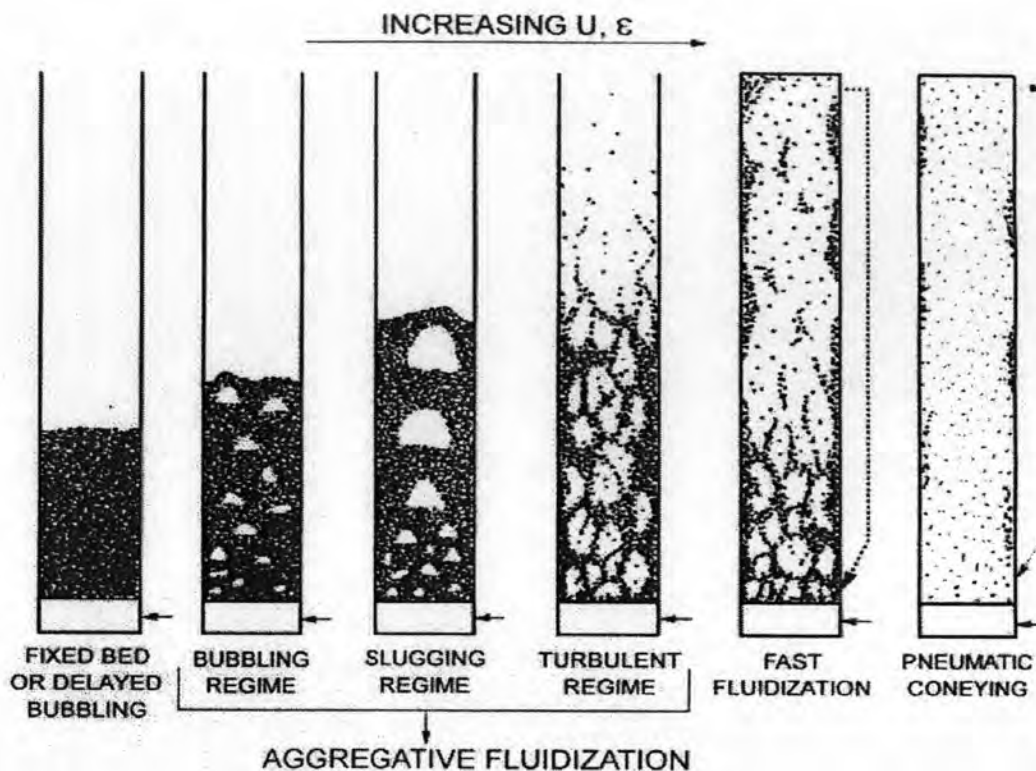
2.6.3 ลักษณะของฟลูอิดไรซ์เบด

คำว่า เบด (bed) หมายถึง อาณาเขตในหอการทดลองที่มีปริมาณเม็ดของแข็งบรรจุอยู่ไม่ ว่าของแข็งนั้นจะอยู่นิ่งหรือเคลื่อนไหวด้วยของไหลในหอทดลอง จะมีระดับตั้งแต่แผ่นโลหะที่ทำ เป็นตะแกรงรองรับหรือเป็นตัวกระจายแก๊ส (gas distributor) จนถึงระดับสูงสุดหรือผิวหน้าของ เม็ดเบด

ฟลูอิดไรซ์เบดที่เป็นของเหลวจะมีการขยายตัวของเบดอย่างสม่ำเสมอ การลอยตัวและการ หมุนรอบตัวเป็นไปอย่างช้าๆ เรียกเบดแบบนี้ว่าเบดสม่ำเสมอหรือเบดที่เป็นเนื้อเดียวกัน สำหรับ ฟลูอิดไรซ์เบดที่ของไหลเป็นแก๊ส ลักษณะเบดที่เกิดขึ้นจะแตกต่างจากที่เป็นของเหลวมากเพราะว่า เมื่อความเร็วของแก๊สสูงกว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไรซ์เบดแล้ว แก๊สส่วนหนึ่งยังทำหน้าที่ ให้เกิดการลอยตัวของเม็ดของแข็งเหมือนเดิม แต่มีอีกส่วนหนึ่งรวมตัวกันแล้วก่อตัวกันเป็นฟอง แก๊สขึ้น ฟองแก๊สก็จะแทรกตัวขึ้นมาถึงบนผิวหน้าของเบดและแตกตัวในที่สุด แต่ขณะที่ฟองแก๊ส ลอยขึ้นมาจะทำให้เม็ดของแข็งลอยติดตามฟองแก๊สขึ้นมาด้วย เม็ดของแข็งภายในเบดจึงมีการ เคลื่อนที่เป็นไปอย่างขลุมน ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ลักษณะการเกิดฟลูอิดไรซ์เซชันของเบดที่มีของไหลต่างชนิดกันไหลผ่าน
(สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ, 2528)



รูปที่ 2.9 รูปแบบการไหลสำหรับฟลูอิดไรต์เบดแก๊ส - ของแข็ง

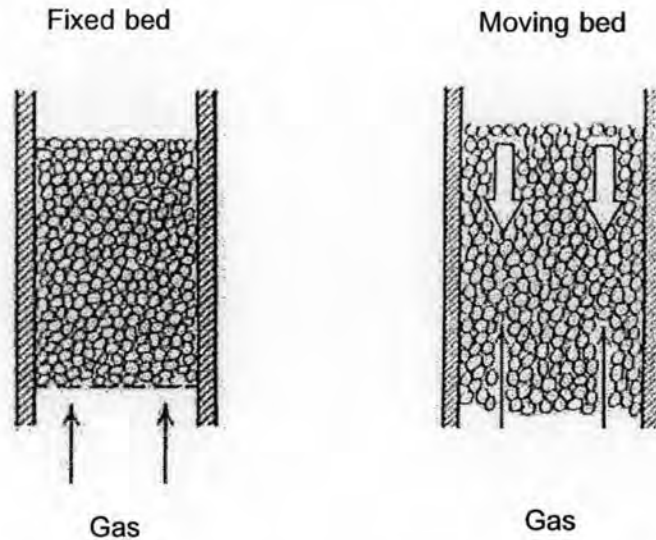
(Grace, et al., 1977)

2.6.4 แก๊สฟลูอิดเซชัน

แก๊สฟลูอิดเซชันเป็นการเกิดฟลูอิดไรต์เบดสองสถานะระหว่างของไหลที่เป็นแก๊สกับของแข็ง ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น รูปแบบของฟลูอิดไรต์เบด (regime of fluidization) สามารถแบ่งได้ดังรูปที่ 2.9 เมื่อเบดวางตัวบนตะแกรงหรือตัวกระจายแก๊ส (gas distributor) และมีแก๊สเคลื่อนที่ผ่านขึ้นมา (upward flowing) ซึ่งความเร็วที่เพิ่มขึ้น และ hydrodynamic ที่เกิดขึ้นอธิบายได้ดังนี้

- เบดนิ่ง (packed bed หรือ fixed bed)

เมื่อแก๊สไหลผ่านเบดขึ้นมาด้วยความเร็วต่ำ ของแข็งที่วางตัวอยู่บนตัวกระจายแก๊สจะวางตัวนิ่งไม่เคลื่อนไหว แก๊สจะไหลคดเคี้ยวไปตามช่องว่างที่มีอยู่ในเบด เรียกลักษณะเบดแบบนี้ว่าเบดนิ่ง หรือเบดอาจมีการเคลื่อนที่สัมผัสกับผนังแต่อนุภาคของแข็งในเบดไม่มีการเคลื่อนที่สัมผัสต่อกัน กรณีนี้เรียกว่า เบดเคลื่อนที่ (moving bed) ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ลักษณะของเบตนิ่งที่ไม่มีและมีการเคลื่อนที่สัมพันธ์กับผนัง

(Kunii, et al., 1969)

เมื่อแก๊สเคลื่อนที่ผ่านเบตนิ่งจะมีแรงเนื่องจากการไหลของของไหล กระทำต่ออนุภาคของแข็งในทิศทางกรไหล เรียกแรงนี้ว่าแรงลากเนื่องจากการไหล (drag force) ซึ่งจะก่อให้เกิดความดันลด (pressure drop) ตกคร่อมเบต ความดันตกคร่อมเบตตลอดความสูงของเบตนิ่งที่เกิดขึ้น จะเพิ่มตามความเร็วของแก๊สที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก Ergun equation ดังนี้

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{150\mu U (1-\varepsilon)^2}{(\phi d_p)^2 \varepsilon^3} + \frac{1.75\rho_g U^2 (1-\varepsilon)}{(\phi d_p)^2 \varepsilon^3} \quad (2.1)$$

- เบตแบบฟองแก๊ส (bubbling fluidized bed)

เมื่อความเร็วแก๊สที่เคลื่อนที่ผ่านเบตนิ่งเพิ่มขึ้นจนถึงความเร็วค่าหนึ่ง อนุภาคของแข็งจะเริ่มเกิดการเคลื่อนที่ขึ้น ความเร็วที่จุดนี้เรียกว่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน (minimum fluidization velocity, U_{mf}) และเรียกเบต ณ จุดนี้ว่า minimum fluidized bed ซึ่งเป็นจุดแรกที่อนุภาคของแข็งประพฤติตัวคล้ายของไหล สำหรับค่าความดันตกคร่อมเบต ณ จุดนี้มีค่าเท่ากับน้ำหนักของเบต ดังนั้น แรงเสียดทานเนื่องจากการไหล (drag force; F_D) ที่เกิดขึ้น ณ จุดนี้สามารถแสดงได้ดังนี้

$$F_D = \Delta P \cdot A = AL(1-\varepsilon)(\rho_s - \rho_g)g \quad (2.2)$$

จัดรูปสมการใหม่จะได้ภาวะต่ำสุดของฟลูอิดเซชัน (minimum fluidization condition) ดังนี้

$$\frac{\Delta P}{L_{mf}} = (1 - \varepsilon_{mf})(\rho_s - \rho_g)g \quad (2.3)$$

สำหรับความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซนชัน สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\text{- Re}_p < 20 \quad U_{mf} = \frac{(\phi d_p)^2}{150} \cdot \frac{(\rho_s - \rho_g)}{\mu} g \left(\frac{\varepsilon_{mf}^3}{1 - \varepsilon_{mf}} \right) = \frac{d_p^2 (\rho_s - \rho_g) g}{1650 \mu} \quad (2.4)$$

$$\text{- Re}_p > 1,000 \quad U_{mf} = \frac{\phi d_p}{1.75} \cdot \frac{(\rho_s - \rho_g)}{\rho_g} g \varepsilon_{mf}^3 = \frac{d_p (\rho_s - \rho_g) g}{24.5 \rho_g} \quad (2.5)$$

ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่แทรกขึ้นไป และอาจมีการรวมตัวกันผ่าน emulsion phase โดยที่อาจจะมีของแข็งบางส่วนติดไปด้านบนของฟองแก๊ส และบางส่วนวิ่งตามฟองแก๊สขึ้นมาด้วย จนกระทั่งถึงผิวบนก็จะเคลื่อนที่หลุดออกไปแล้วแตกกระจายอยู่เหนือผิว อนุภาคของแข็งที่ติดอยู่เกือบทั้งหมดจะตกกลับลงมายังเบดใหม่ โดยเรียกปรากฏการณ์ที่ของแข็งเคลื่อนที่ตามฟองแก๊สนี้ว่าการเกิด wake การเกิด wake เกิดจากความดันที่อยู่ใต้ล่างฟองแก๊สน้อยกว่าความดันบริเวณ emulsion phase ทำให้ของแข็งเคลื่อนที่จากบริเวณที่ความดันสูงมาอยู่ในบริเวณที่มีความดันต่ำ

ส่วนบริเวณที่อยู่เหนือเบดขึ้นไป ซึ่งฟองแก๊สจะเกิดการแตกตัวและของแข็งที่ติดไปกับฟองแก๊สจะตกลงมายังเบดอีกครั้งด้วยผลของแรงโน้มถ่วง เรียกว่าบริเวณอิสระ (freeboard) อย่างไรก็ตามอาจจะมีอนุภาคของแข็งบางส่วน (น้อยมาก) ซึ่งมีขนาดเล็กถูกพัดพาเคลื่อนที่ไปกับแก๊สด้วย (ไม่ตกกลับลงมา) ณ ความสูงค่าหนึ่งใน freeboard ซึ่งอนุภาคของแข็งเกือบทั้งหมดตกกลับลงมายังเบดจะเรียกความสูงนี้ว่า ความสูงหลุดลอยส่งผ่าน หรือ transport disengaged height (TDH) เหนือความสูงนี้ไปจะมีของแข็งเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งอาจหลุดไปกับแก๊สด้วยอัตราที่สม่ำเสมอ ซึ่งอัตราการเคลื่อนที่ของของแข็งในช่วงนี้จะเรียกว่า elutriation rate

- เบดแบบสลัก (slugging bed)

ดังกล่าวมาแล้วว่าขนาดของฟองแก๊สจะมีขนาดเพิ่มตามความเร็วของแก๊ส และความสูงของเบด ถ้าเบดบรรจุอยู่ในหอทดลองซึ่งมีขนาดเล็กหรือแคบและยาว ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นอาจจะมีขนาดใหญ่เกือบเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางหรือความกว้างของเบด (หอทดลอง) ในกรณีนี้จะสังเกตเห็นฟองแก๊สเคลื่อนที่ผ่านเบดและแยกอนุภาคของแข็งออกเป็นชั้นๆ เรียกว่าเกิดสลัก และที่ความเร็วของแก๊สที่ทำให้ฟองแก๊สเริ่มมีขนาดใหญ่เท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของเบดหรือหอทดลองก็คือ Minimum slugging velocity (U_{ms}) มีค่าประมาณไว้คือ

$$U_{ms} = U_{mf} + 0.07 \sqrt{gD} \quad (2.6)$$

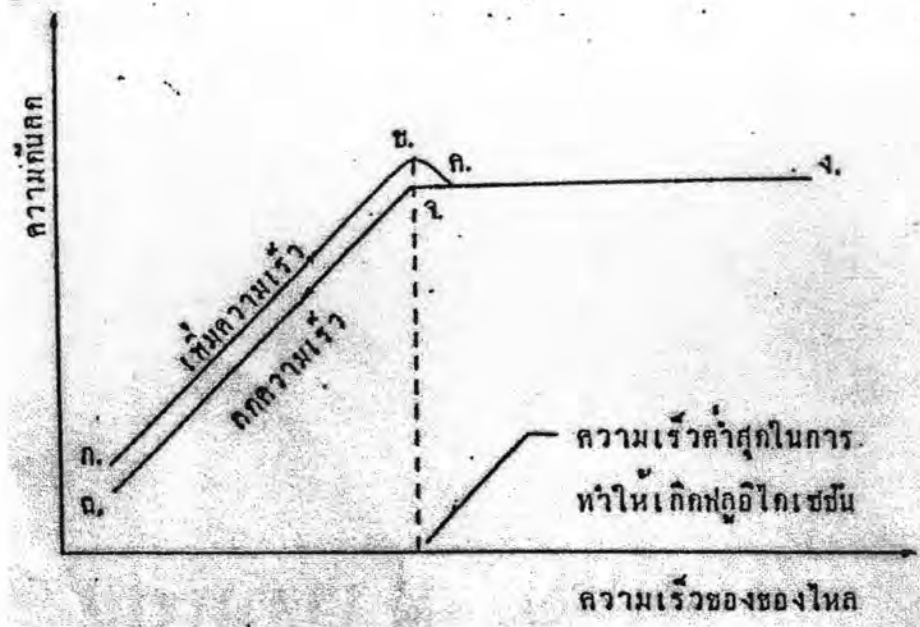
- เบริดแบบปั่นป่วน (turbulent bed)

เมื่อความเร็วของแก๊สที่เคลื่อนที่ผ่านเบริดแบบฟองแก๊สเพิ่มขึ้น จนมากกว่า U_{mf} เบริดจะเกิดการขยายตัว และเมื่อเพิ่มความเร็วขึ้นเรื่อยๆ จะเริ่มสังเกตเห็นรูปแบบการสัมผัสของอนุภาคของแข็งกับแก๊ส ซึ่งมีการขยายตัวเปลี่ยนแปลงไป ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นมีการรวมตัวและแตกกระจายออกจากกันอย่างรวดเร็ว (จนดูเหมือนไม่มีฟองแก๊ส) การเคลื่อนไหวภายในเบริดเป็นแบบปั่นป่วน ลักษณะภายในเบริดจะแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ

- Dense phase ซึ่งเป็นส่วนที่มีอนุภาคของแข็งอยู่หนาแน่น
- Dilute phase ซึ่งเป็นส่วนที่มีอนุภาคของแข็งอยู่เบาบาง

สำหรับช่วงในการเปลี่ยนแปลงภาวะจากเบริดแบบฟองแก๊สไปเป็นเบริดแบบปั่นป่วนนั้นไม่ได้เกิดขึ้นแบบทันทีทันใดที่ความเร็วค่าหนึ่ง แต่จะมีช่วงของความเร็วในการเปลี่ยนภาวะทั้งสองนี้ โดยการเปลี่ยนภาวะจากเบริดแบบฟองแก๊สไปเป็นเบริดแบบปั่นป่วนนั้นจะมีช่วงของการเปลี่ยน โดยเมื่อค่อยๆ เพิ่มความเร็วขึ้นจนถึงค่าๆ หนึ่ง เบริดซึ่งเดิมอยู่ในภาวะเบริดแบบฟองแก๊สนั้น ที่บริเวณผิวหน้าของเบริดจะเริ่มเปลี่ยนไปเป็นเบริดแบบปั่นป่วน ซึ่งเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ สามารถแสดงความสัมพันธ์ของความดันตกคร่อมเบริดที่เกิดขึ้นในช่วงการเปลี่ยนภาวะได้ดังนี้ รูปที่ 2.11

จากการทดลองหาค่าความเร็วต่ำสุดในการทำให้เกิดฟลูอิไดเซชันโดยอาศัยหลักการที่ว่า เมื่อเพิ่มความเร็วของของไหลที่ละน้อย ความดันลด (pressure drop) จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นพร้อมกับการเพิ่มขึ้นของความเร็วของของไหล จนกระทั่งถึงจุดจุดหนึ่ง ความดันลดจะมีค่าคงที่โดยไม่ขึ้นกับความเร็วของของไหล ดังนั้นในช่วงที่ความดันลดเริ่มคงที่ก็คือช่วงที่เปลี่ยนจากเบริดที่อยู่กับที่เป็นฟลูอิไดซ์เบริด ถ้าวาดกราฟระหว่างความดันลดและความเร็วของของไหล ก็จะสามารถหาความเร็วต่ำสุดในการทำให้เกิดฟลูอิไดเซชันได้ (พล สาเกทอง, 2526)



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ตกกับ ความเร็วของของไหล
(พล สาเกทอง, 2526)

ในขณะที่ค่อยๆเพิ่มความเร็วของของไหลนั้นของไหลจะค่อยๆแทรกตัวผ่านไปตามช่องว่างระหว่างอนุภาค ความถี่ตกที่เกิดขึ้นก็จะค่อยๆเพิ่มขึ้นตามความเร็วของของไหล จากรูปที่ 2.11 จะสังเกตเห็นได้ว่าเส้นกราฟ กขค. ที่แสดงการเพิ่มความเร็วของของไหลจะมีส่วนที่โค้งและลากลงมาตามแนวเส้น ขค. บริเวณดังกล่าวนี้จะต้องใช้แรงดันมากเป็นพิเศษ เพื่อที่จะกระจายหรือแยกอนุภาคให้ออกจากกันและจัดเรียงตัวกันให้เป็นระเบียบ เมื่ออนุภาคจัดเรียงตัวกันเรียบร้อยแล้วความถี่ตกจึงค่อยๆ ลดลง และจะคงที่ตลอดไปไม่ขึ้นกับความเร็วของของไหล ความถี่ตกที่เกิดขึ้นจะเดินตามเส้น คง. หลังจากนั้นถ้าค่อยๆลดความเร็วของของไหล ความถี่ตกก็จะเดินตามเส้น งคจ. ซึ่งมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับความเร็วของของไหล และถ้ายังคงลดความเร็วของของไหลลงอีกความถี่ตกที่เกิดขึ้นจะเดินตามเส้น จจ. ซึ่งขนานกับเส้นกราฟขณะเพิ่มความเร็ว กข. แต่ความถี่ตกมีค่าต่ำกว่า ทั้งนี้เพราะเบดเปลี่ยนจากฟลูอิดไอเซนเบด (เส้น งคจ.) มาเป็นเบดที่อยู่กับที่นั้น (จจ.) อนุภาคได้จัดเรียงตัวเป็นระเบียบอยู่ก่อนแล้ว จึงไม่ต้องสูญเสียพลังงานในการจัดช่องว่างให้เป็นระเบียบอีก และเมื่อได้มีการทดลองซ้ำในเบดเดิม เส้นกราฟที่แสดงการเพิ่มความเร็วใหม่นี้จะเดินตามเส้นลดความเร็วในการทดลองครั้งแรก จากกราฟจะเห็นได้ว่าที่จุด จ. ความถี่ตกจะเริ่มคงที่ไม่ว่าจะเพิ่มความเร็วของของไหลเป็นเท่าไรก็ตาม ซึ่งเป็นข้อแตกต่างจากเบดที่อยู่กับที่ความเร็วของของไหลที่จุด จ. จึงเป็นความเร็วต่ำสุดในการทำให้เกิดฟลูอิดไอเซน

ความเร็วสุดท้าย (terminal velocity) คือ ความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งในของไหล ซึ่งความเร็วนี้จะมีค่าเท่ากับความเร็วของไหลที่ทำให้เม็ดของแข็งเคลื่อนตัวหลุดออกจากหอคดลงไปได้ โดยแบ่งออกเป็น 2 กรณี ตามลักษณะของอนุภาคของแข็ง (Kunii, 1969)

กรณีที่อนุภาคของแข็งมีรูปร่างเป็นทรงกลม

$$U_t^* = \left[\frac{18}{(d_p^*)^2} + \frac{0.591}{(d_p^*)^{1/2}} \right]^{-1} \quad (2.7)$$

หรือ

$$U_{t,spherical} = \frac{g(\rho_s - \rho_g)d_p^2}{18\mu} \quad \text{เมื่อ } Re_p < 0.4 \quad (2.8)$$

$$U_{t,spherical} = \left[\frac{4}{225} \frac{(\rho_s - \rho_g)^2 g^2}{\rho_g \mu} \right]^{1/3} d_p \quad \text{เมื่อ } 0.4 < Re_p < 500 \quad (2.9)$$

$$U_{t,spherical} = \left[\frac{3.1g(\rho_s - \rho_g)d_p}{\rho_g} \right]^{1/2} \quad \text{เมื่อ } 500 < Re_p < 200,000 \quad (2.10)$$

กรณีที่อนุภาคของแข็งไม่เป็นทรงกลม

$$U_t^* = \left[\frac{18}{(d_p^*)^2} + \frac{2.335 - 1.744\phi}{(d_p^*)^{1/2}} \right]^{-1} \quad (2.11)$$

จากสมการที่ 2.7 และ 2.11 จะอยู่ในตัวแปร U_t^* และ d_p^* ซึ่งเป็นเทอมของตัวแปรไร้หน่วย โดยที่

$$d_p^* = d_p \left[\frac{\rho_g(\rho_s - \rho_g)g}{\mu^2} \right]^{1/3} \quad (2.12)$$

และ

$$U_t^* = U_t \left[\frac{\rho_g^2}{\mu(\rho_s - \rho_g)g} \right]^{1/3} \quad (2.13)$$

ดังนั้นจาก U_t^* ที่ได้จากสมการที่ 2.7 และ 2.11 นำมาหา U_t โดยอาศัยสมการที่ 2.14 ได้

$$U_t = U_t^* \left[\frac{\mu(\rho_s - \rho_g)g}{\rho_g^2} \right]^{1/3} \quad (2.14)$$

- fast fluidized bed

เมื่อความเร็วของอากาศมากขึ้นจนไม่สามารถระบุพื้นผิวด้านบนของเบดได้ จนกระทั่งอนุภาคของแข็งเคลื่อนที่ออกทางด้านบนหรือตกลงและต้องเติมอนุภาคของแข็งเข้ามาแทนที่โดยการใส่เข้ามาใกล้ๆ ส่วนล่างหรือตกลง อนุภาคของแข็งจะรวมกลุ่มและเคลื่อนที่ลงบริเวณใกล้ๆ ผังของหอคอยตกลง ขณะที่แก๊สและอนุภาคของแข็งที่กระจายตัวอยู่ด้านบนจะเคลื่อนที่ขึ้น ในขณะที่อัตราการป้อนของแข็งคงที่ที่ความเร็วแก๊สเพิ่มขึ้นจะทำให้อนุภาคของแข็งในหอคอยเจือจางมากขึ้น ที่ภาวะนี้อัตราส่วนของปริมาตรของช่องว่างต่อปริมาตรของเบดมีค่าอยู่ระหว่าง 0.8 ถึง 0.98

จากรูปที่ 2.9 ในภาวะที่เป็น fast fluidization ถ้านำเอาของแข็งที่หลุดออกจากเบดหรือหอคอยตกลงกลับเข้ามาในระบบใหม่ตรงบริเวณส่วนล่างของหอคอยตกลง ระบบแบบนี้จะเรียกว่าฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน (circulating fluidized bed, CFB)

หมายเหตุ ฟลูอิดไคซ์ที่ผ่านมาทั้งหมด ยกเว้น fast fluidized bed อาจจะเรียกรวมกันว่า captive fluidized bed เพราะว่า อนุภาคของแข็งทั้งหมดซึ่งสัมผัสกับแก๊สจะถูกจำกัดบริเวณอยู่ภายในระยะความสูงหนึ่งจากตัวกระจายแก๊สเท่านั้น หรือในบางกรณีที่มีการพัดพาเกิดขึ้นก็มีอนุภาคของแข็งเพียงเล็กน้อยเท่านั้นที่ถูกพัดพาไป

- dilute-phase transport หรือ pneumatic conveying

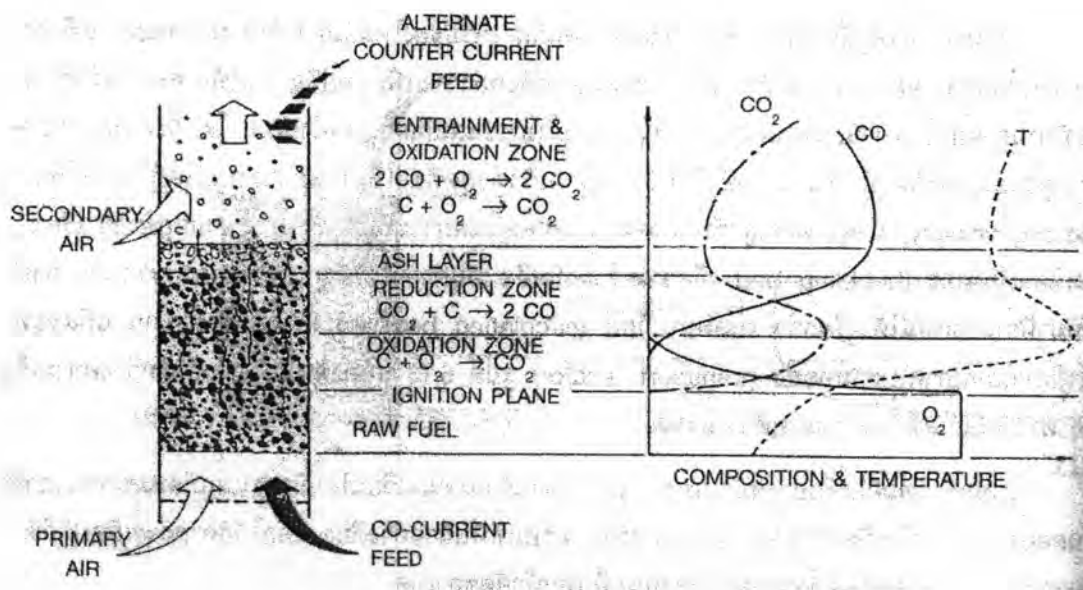
เป็นการขนถ่ายอนุภาคของแข็งด้วยแก๊ส ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของของแข็งในแนวแกนยกเว้นในส่วนล่างที่อนุภาคของแข็งมีความเร่ง และอนุภาคของแข็งบางส่วนอาจหยุดนิ่งอยู่ใกล้ๆ ผังของหอคอยตกลง ความเร็วแก๊สที่ทำให้เบดในท่อเปลี่ยนจากเบดเจือจางเป็นเบดหนาแน่นเรียกว่า ความเร็วในการเกิดช็อคกิ้ง (choking velocity, U_{ch}) ค่าความเร็วนี้สามารถหาได้จากการทำการทดลอง โดยการปรับลดความเร็วแก๊สในระบบที่เป็นเฟสเจือจางและมีปริมาณอนุภาคของแข็งในระบบคงที่ลงจนกระทั่งเบดเกิดการยุบตัวลงอย่างรวดเร็วเปลี่ยนจากเฟสเจือจางเป็นเฟสหนาแน่น ซึ่งความเร็วแก๊สที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว คือความเร็วในการเกิดช็อคกิ้งนั่นเอง ปริมาณของแข็งที่ไหลออกจากเบดภาวะนี้ คือ

$$G_{s, ch} = \rho_s (1 - \varepsilon_{ch}) (U_{ch} - U_t) \quad (2.15)$$

โดยค่า E_{ch} หรืออัตราส่วนของปริมาตรของช่องว่างต่อปริมาตรของเบตในภาวะ choking พบว่าค่านี้มีค่าอยู่ระหว่าง 0.943 ถึง 0.987

2.7 ระบบการเผาไหม้ฟลูอิดไคซ์เบต

ระบบการเผาไหม้ฟลูอิดไคซ์เบตเป็นเทคโนโลยีที่ได้รับการพัฒนามาค่อนข้างนานมาแล้ว โดยมีวัตถุประสงค์หลักคือใช้เผาไหม้ถ่านหินเกรดต่ำในเตาเผาหรือในหม้อไอน้ำขนาดใหญ่มาก นัก ระบบการเผาไหม้แบบนี้จะใช้ถ่านหินที่บดแล้วมาเผาไหม้ในชั้นฟลูอิดไคซ์เบตของวัสดุที่ไม่เกิดปฏิกิริยาหรือวัสดุเฉื่อย เช่น ททราย เป็นต้น ในชั้นฟลูอิดไคซ์เบตนี้จะมีเถ้าและหินปูนหรือโดโลไมต์ เพื่อใช้ในการกำจัดกำมะถันในถ่านหินขณะเผาไหม้ นอกจากนั้น ในชั้นฟลูอิดไคซ์เบตนี้จะมีพ่อน้ำฝังอยู่เพื่อผลิตไอน้ำ ขณะเดียวกันก็เป็นการช่วยลดอุณหภูมิของชั้นฟลูอิดไคซ์เบตให้ต่ำลงอยู่ในช่วง 770 – 900 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันไม่ให้เถ้าอ่อนตัวจนจับเป็นก้อนและเพื่อป้องกันการแยกสลายด้วยความร้อนของ $CaSO_4$ ซึ่งก็คือกำมะถันที่ถูกกำจัดออกจากการเผาไหม้ (สำเริง จักรใจ, 2547)



รูปที่ 2.12 การเผาไหม้ของถ่านหินในฟลูอิดไคซ์เบต

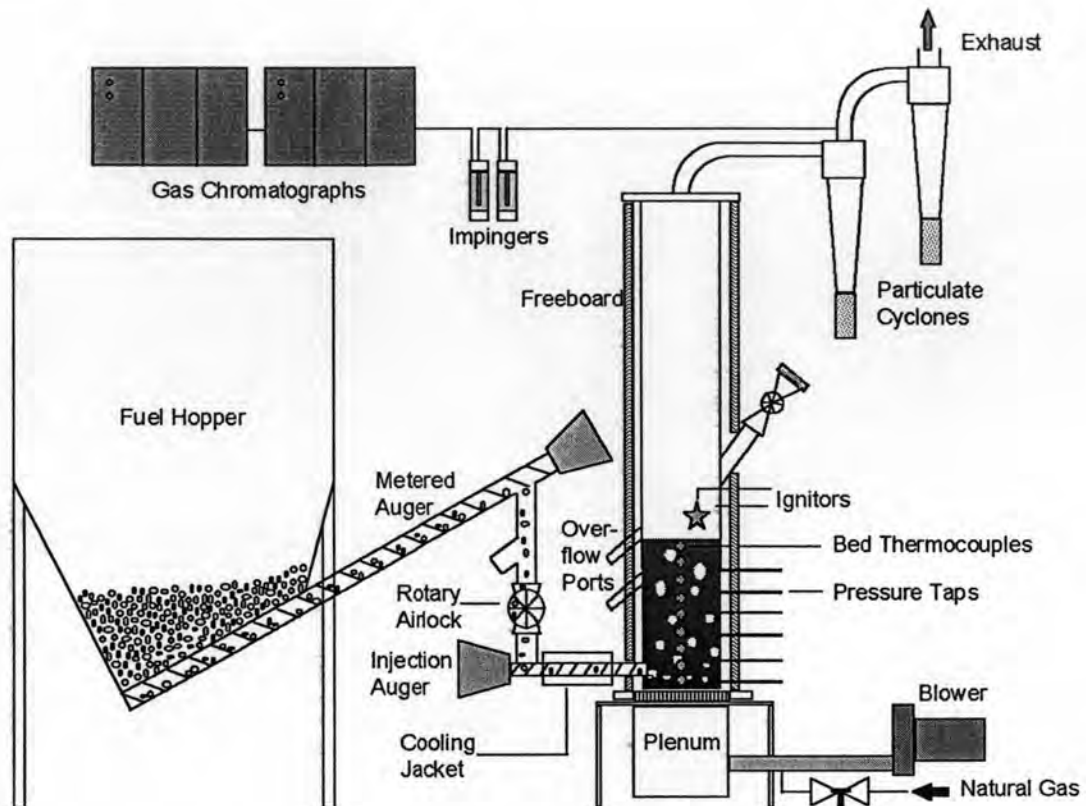
(กัญญา บุญยเกียรติ, 2544)

จากรูปที่ 2.12 ถ่านหินที่ป้อนเข้ามาใหม่จะหนักกว่าและจมอยู่ด้านล่างของเบต เกิดการไหลโรลด์และจุดติดไฟในบริเวณถัดขึ้นมา และเกิดการเผาไหม้ในโซนออกซิไดซ์ ถ่านชาร์มีขนาดเล็กลงและมีความพรุนมากขึ้นจึงลอยขึ้นมาในระดับกลาง แล้วถูกรีดิวซ์ในโซนรีดิวซ์กลายเป็นเถ้าซึ่งเบาที่สุด จึงถูกให้หมุนวนอยู่ในระดับบน ขณะที่เถ้าบางส่วนพร้อมถ่านชาร์ขนาดเล็กถูกเป่าออก

จากเบตขึ้นมาอยู่ในช่องว่างเหนือเบต (พรีบอร์ด) บางส่วนทำปฏิกิริยากับอากาศส่วนที่สอง บางส่วนออกไปกับฟลูแกส (กัญจนา บุญยเกียรติ, 2544)

ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้น ระบบการเผาไหม้แบบนี้จึงมีข้อดีคือ สามารถทำงานแบบต่อเนื่องได้ ใช้เชื้อเพลิงได้หลายชนิด ทั้งแบบเชื้อเพลิงชนิดเดียวหรือแบบผสม อุณหภูมิของเบตและอากาศผสมกันอย่างปั่นป่วนคลุกเคล้ากันอย่างดี ทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ การถ่ายโอนความร้อนจากรอบนอกถ่านหินและการแพร่ของออกซิเจนสู่ผิวถ่านหินดีตลอดจนการถ่ายโอนความร้อนสู่ผิวท่อน้ำมีประสิทธิภาพที่ดีเพราะชั้นขอบเขตโดยรอบของผิวถ่านหินหรือถ่านหินและผิวท่อน้ำถูกทำลายอยู่ตลอดเวลาอันเนื่องจากการเคลื่อนที่ของชั้นฟลูอิดเบต ทำให้ใช้ถ่านหินที่มีเกรดกว้างได้ ที่ความเร็วของอากาศสูงๆ การทำงานของฟลูอิดเบตจะเสียพลังงานน้อยกว่าเบตที่อยู่กับที่มากเพราะแรงเสียดทานและความดันลดมีค่าน้อยกว่า การควบคุมแก๊สมลพิษ SO_2 ก็ทำได้ง่ายเพราะสามารถใช้หินปูนหรือโดโลไมต์ใส่ลงในชั้นฟลูอิดเบตโดยไม่ต้องติดตั้งระบบกำจัดแก๊สไอเสีย และการปลดปล่อย NO_x ก็ต่ำเนื่องจากชั้นฟลูอิดเบตจะมีอุณหภูมิการเผาไหม้ค่อนข้างต่ำ (สำเร็จ จักรใจ, 2547)

ส่วนข้อเสียคือ ใช้เวลาเริ่มจุดเตาหรือหยุดเดินเตานาน การกักความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์และท่อน้ำค่อนข้างสูงเนื่องจากการขัดสีของฟลูอิดเบต เกิดการสูญเสียอนุภาคคาร์บอนขนาดเล็กที่ยังไม่เผาไหม้ไปในรูปของเถ้าลอยซึ่งจะถูกหอบลอยขึ้นไปพร้อมกับไอเสียในปริมาณที่สูง อนุภาคคาร์บอนขนาดเล็กเหล่านี้ เป็นผลมาจากการลดลงของขนาดถ่านคาร์บอนในชั้นฟลูอิดเบตซึ่งมีสาเหตุมาจากหลายประการเช่น จากการแตกตัวปฏิกิริยาของคาร์บอน (เช่น เกิดจากความเค้นทางความร้อนในโครงสร้างที่พูนของคาร์บอนและความเค้นจากความดันที่เพิ่มขึ้นของสารระเหยระหว่างเกิดกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนในโครงสร้างที่พูนของคาร์บอน เป็นต้น) จากการเผาไหม้ของคาร์บอนเอง จากการแตกตัวทุติยภูมิของถ่านคาร์บอนอันเนื่องมาจากการชนในชั้นฟลูอิดเบตและการขัดถูของถ่านคาร์บอน เนื่องจากว่าอุณหภูมิการเผาไหม้ของระบบฟลูอิดเบตค่อนข้างต่ำอยู่แล้ว ทำให้การเผาไหม้โดยรวมของถ่านคาร์บอนถูกควบคุมโดยอัตราการเผาไหม้ที่ผิวและในรูปพูนของถ่านคาร์บอนเป็นหลัก ยิ่งใช้ถ่านหินที่มีความว่องไวต่ำด้วยแล้ว อนุภาคของถ่านคาร์บอนขนาดเล็กๆ เหล่านี้จะยิ่งไม่มีเวลาเพียงพอเพื่อเกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ ขณะที่ถูกหอบให้ลอยออกไปจากบริเวณเหนือชั้นฟลูอิดเบตของเตาแม้ว่าจะมีเวลาอยู่ในเตานานถึง 3 วินาทีที่อุณหภูมิ 830 องศาเซลเซียส ก็ตาม นอกจากนี้ยังมีข้อเสียอีกประการหนึ่งคือ เครื่องปฏิกรณ์ต้องมีความสูงพอสมควร ไม่สามารถขยายขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ได้ง่าย ระบบการเผาไหม้ใหญ่ๆ ต้องมีการป้อนถ่านหินหลายจุด เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบตแสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบด

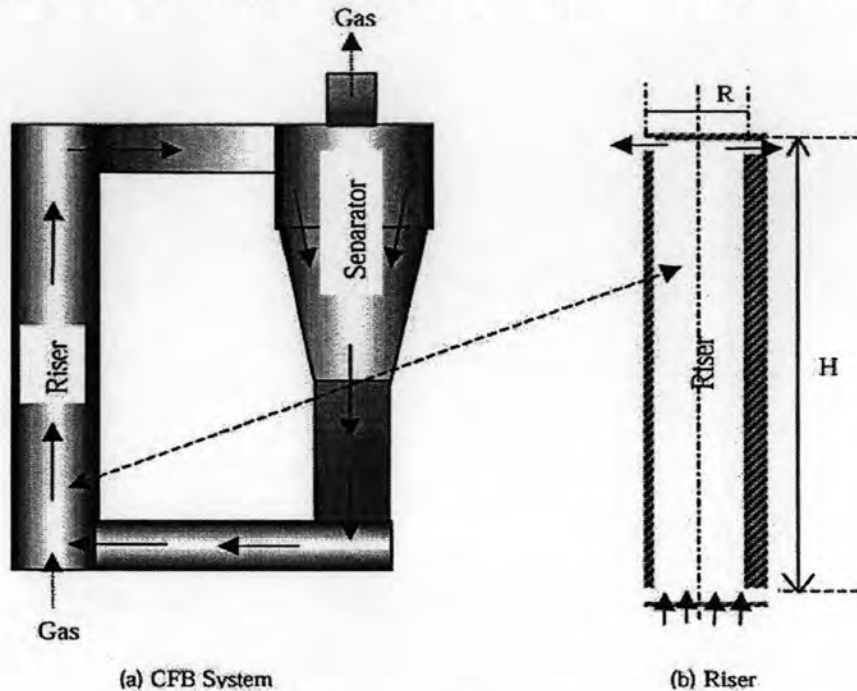
(ที่มา http://www.cvrtd.org/ResearchPapers/evaluation_paper.htm)

วันที่ 16 เมษายน พ.ศ.2551)

2.8 ระบบการเผาไหม้ฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียน (สำเร็จ จักรใจ, 2547)

ระบบการเผาไหม้ฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียนจะมีลักษณะคล้ายคลึงกับระบบการเผาไหม้ฟลูอิด์เบด แต่จะมีการปรับปรุงจากระบบการเผาไหม้ฟลูอิด์เบดให้มีการหมุนเวียนของเบด โดยจะมีเตาปฏิกรณ์ 2 ตัวต่อกัน โดยตัวแรก (riser) จะทำหน้าที่เสมือนระบบการเผาไหม้ฟลูอิด์เบด ในขณะที่เตาปฏิกรณ์อีกตัว (downcomer) จะทำหน้าที่กักเก็บและนำเบดพร้อมทั้งเชื้อเพลิงที่ยังเผาไหม้ไม่สมบูรณ์กลับเข้ามาสู่เตาปฏิกรณ์ตัวที่ 1 ใหม่อีกครั้งเพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้น มีการป้อนอากาศหรือออกซิเจนมากกว่าระบบการเผาไหม้ฟลูอิด์เบดเพื่อให้เกิดฟลูอิด์เบดอย่างรวดเร็วและหลุดออกจากเตาปฏิกรณ์ตัวที่ 1 ไป เกิดเป็นชั้นฟลูอิด์เบดตลอดเตาปฏิกรณ์ตัวที่ 1 อุณหภูมิสูงกระจายตลอดทั้งเตาและไม่สูงมากเกินไป ทั้งนี้อุณหภูมิจะไม่สูงมาก เฉพาะส่วนล่างของเตาเหมือนกับระบบการเผาไหม้ฟลูอิด์เบดอันเป็นสาเหตุของปัญหามลพิษ เนื่องจากการปล่อยแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) นอกจากนี้ พื้นที่หน้าตัดของเบดจะเล็กกว่า

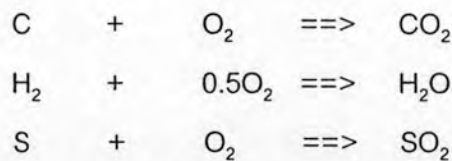
สามารถขยายขนาดของเครื่องได้ง่ายกว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดกำมะถันยังดีกว่าที่อัตราการ
ใช้หินปูนที่เท่ากันอีกด้วย เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียนแสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียน
(ที่มา <http://www.scielo.br/scielo.php> วันที่ 16 เมษายน พ.ศ.2551)

2.9 กลไกการเผาไหม้ (กัญจนา บุญเกียรติ, 2544)

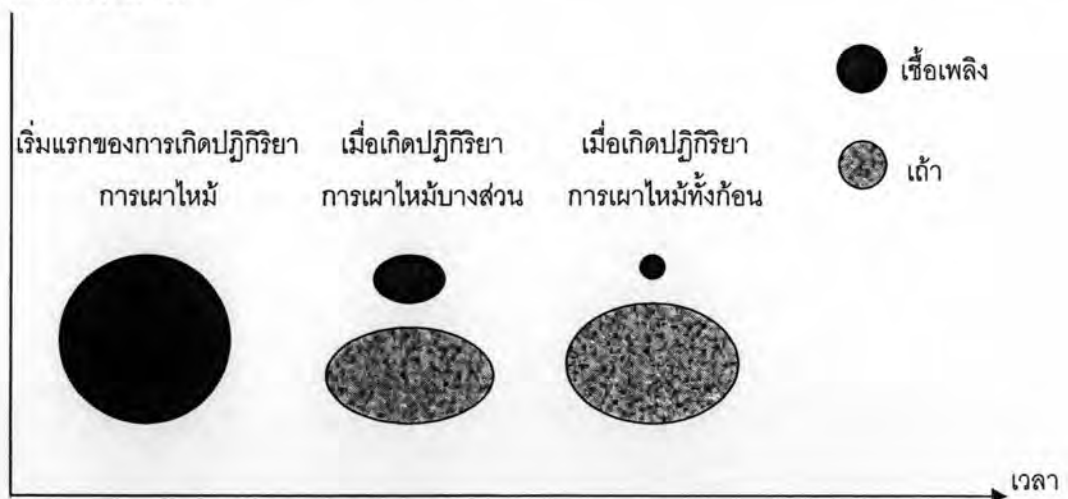
จากปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ เราสามารถคำนวณมวล หรือปริมาณของตัวทำ
ปฏิกิริยา และของผลผลิตที่ได้ โดยใช้มวลสารสัมพันธ์ของปฏิกิริยา



จากการวิเคราะห์โดยแยกธาตุของ เชื้อเพลิงแข็ง หรือ เชื้อเพลิงเหลว หรือข้อมูลการ
วิเคราะห์องค์ประกอบของ แก๊สเชื้อเพลิง สามารถนำมาคำนวณปริมาณออกซิเจน หรือปริมาณ
อากาศที่ทำปฏิกิริยาพอดีกับเชื้อเพลิง (อากาศที่ต้องการตามทฤษฎี) ได้ และนำมาคำนวณ
ปริมาณผลผลิตแต่ละชนิดที่ได้จากปฏิกิริยาได้เช่นเดียวกัน มวลสารสัมพันธ์ดังกล่าวเป็น
ความสัมพันธ์โดยโมล ดังนั้นต้องแปลงหน่วยหรือมวลจากข้อมูลการวิเคราะห์เชื้อเพลิงให้อยู่ในรูป
หน่วยของ กิโลกรัมโมลหรือหน่วยของโมลในระบบหน่วยอื่นก่อน จึงจะคำนวณปริมาณอากาศที่
ต้องการตามทฤษฎีได้ ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นที่สำคัญที่สุดในการเผาไหม้

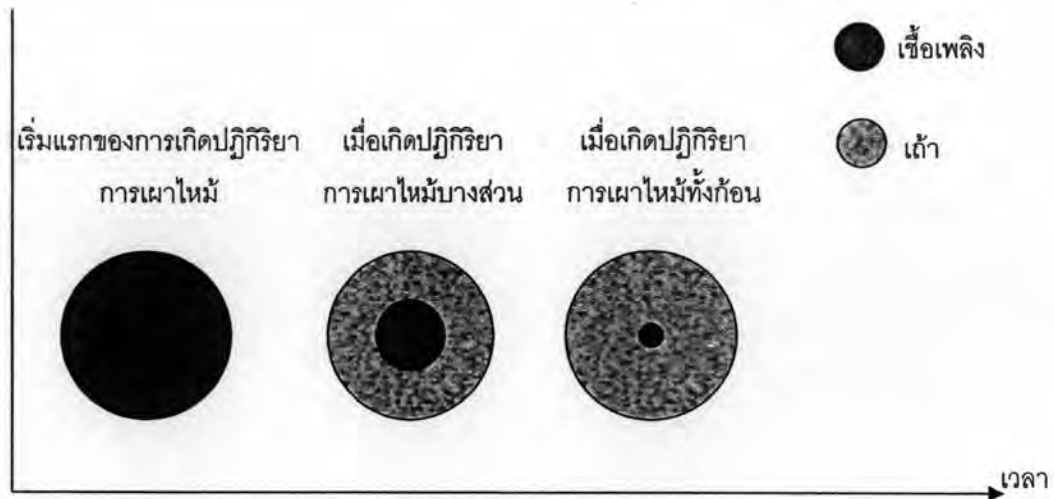
ในปฏิบัติการเผาไหม้ในอุตสาหกรรม หรือในการใช้งานทั่วไป ต้องการการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ด้วยเหตุผลหลายประการคือ ต้องการประหยัดเชื้อเพลิง ต้องการความร้อนสูงสุดจากการเผาไหม้ และไม่ต้องการมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรคาร์บอน เป็นต้น จึงต้องใช้ภาวะที่เอื้ออำนวยต่อการทำปฏิกิริยาการเผาไหม้ให้สมบูรณ์มากที่สุด ภาวะอันหนึ่งคือ การใช้ปริมาณอากาศเกินพอ เพื่อให้โมเลกุลของเชื้อเพลิงหรือโมเลกุลที่มาจากการแตกตัวของเชื้อเพลิงมีโอกาสพบกับโมเลกุลของออกซิเจนเพิ่มมากขึ้น จากมวลสารสัมพันธ์ เมื่อทราบปริมาณอากาศที่ต้องการตามทฤษฎี ก็จะสามารถคำนวณปริมาณอากาศเกินพอได้ทันที

การเผาไหม้ในฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียนเกิดขึ้นโดย เชื้อเพลิงจะถูกพองให้ลอยตัวด้วยแก๊สหรืออากาศที่เข้าสู่เตาโดยผ่านแผ่นกระจายอากาศ จนเชื้อเพลิงจะมีสภาพคล้ายของไหล โดยภายในเตาเผาจะมีเบดที่ร้อน เช่น ทราบ หรือถ่านที่เกิดจากการเผาไหม้ เพื่อช่วยทำให้เกิดการผสมผสานของเชื้อเพลิงกับออกซิเจนได้ดีและช่วยให้ถ่านที่เกาะอยู่กับเชื้อเพลิงนั้นหลุด ผิวของเชื้อเพลิงจึงสามารถสัมผัสกับออกซิเจนได้โดยตรงตลอดเวลาทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ดี ดังรูปที่ 2.15 ซึ่งจะต่างจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งในเตาเผาทั่วไป ซึ่งจะเกิดการเผาไหม้ที่ผิวของเชื้อเพลิงก่อน จากนั้นบริเวณของการเกิดปฏิกิริยาก็ค่อย ๆ เคลื่อนเข้าไปโดยผ่านส่วนที่เหลือที่เกิดจากการเผาไหม้คือ ถ่าน ซึ่งจะเป็นสารเฉื่อยทำให้เชื้อเพลิงมีโอกาสสัมผัสกับออกซิเจนลดลง ดังนั้นเมื่อเวลาผ่านไปอัตราการเผาไหม้จะค่อย ๆ ลดลงจนเผาไหม้หมดทั้งก้อน ดังรูปที่ 2.16 (ปิยะพันธ์ จะกอ, 2548)



รูปที่ 2.15 ปฏิกริยาการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแข็งในเตาฟลูอิดเบด

(ปิยะพันธ์ จะกอ, 2548)



รูปที่ 2.16 ปฏิกิริยาการเผาไหม้โดยทั่วไปของเชื้อเพลิงแข็งในเตาชนิดอื่น
(ปิยะพันธ์ จะกอ, 2548)

โดยออกซิเจนที่ใช้ในการเผาไหม้สารระเหยและก้อนของเชื้อเพลิงแข็งมาจากแก๊สที่อยู่ในฟองแก๊สถ่ายเทไปยัง particulate phase (ทราย) แล้วแพร่ผ่าน particulate phase ไปที่ผิวหน้าของเชื้อเพลิงแข็ง ส่วนอนุภาคของเชื้อเพลิงแข็งที่ยังเผาไหม้ไม่หมดเมื่อหลุดออกจากเตาเผา จะถูกดักจับโดย ไซโคลน ผ่านไปยัง downcomer แล้วกลับเข้าไปเผาไหม้ในเตาเผาอีกครั้งจนเผาไหม้หมด

2.10 การควบคุมมลพิษ (กัญจนา บุญเกียรติ, 2544)

ผลผลิตจากการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิงที่มี ไฮโดรคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักคือ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำ แต่ในทางปฏิบัติ การเผาไหม้มักเกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สกลุ่มไนโตรเจนออกไซด์ แก๊สกลุ่มซัลเฟอร์ออกไซด์ ไฮโดรคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่หมด และอนุภาคแขวนลอย ได้แก่ เขม่าและควันในแก๊สด้วย อันตรายของผลผลิตเหล่านี้ไม่น่าจะมีหากกระจายออกไปในบรรยากาศ อย่างไรก็ตาม เรามักจะมีแหล่งผลิตจำนวนมากอยู่รวมกันในบริเวณหนึ่งๆ จึงทำให้การกระจายออกถูกจำกัดโดยสภาพภูมิประเทศและภูมิอากาศ นอกจากนั้นแก๊สมลพิษและอนุภาคมลพิษหลายชนิดทำปฏิกิริยาเสริมกัน จึงเร่งให้เกิดผลทวีคูณขึ้น แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สกลุ่มไนโตรเจนออกไซด์ และไฮโดรคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่หมด จะเกิดปฏิกิริยาเมื่อมีแสงอาทิตย์ให้หมอกปนควันทางโฟโตเคมี แก๊สกลุ่มซัลเฟอร์ออกไซด์ที่รวมตัวกันอย่างเข้มข้นเฉพาะบริเวณก็ให้ผลเช่นเดียวกัน ตัวอย่างที่เป็นบทเรียนราคาแพงคือ หมอกปนควันที่เกิดขึ้นอย่างรุนแรงในนครลอสแอนเจลิส สหรัฐอเมริกา และลอนดอน สหราชอาณาจักร ในตัวอย่างแรก การเกิดหมอกปนควันถูกเร่งโดยสภาพภูมิประเทศ ทั้งภูเขาและทะเล ที่ช่วยขังมลพิษ

และอากาศที่เย็นกว่าไว้ได้ชั้นอากาศที่อุ่นกว่า ทำให้เกิดผลกระทบจากหมอกปกคลุมวันอย่างรุนแรง ในช่วงกลางวัน มีผลต่อสุขภาพมนุษย์และพืช ในตัวอย่างหลัง เกิดผลร้ายแรงเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง ทำลายสุขภาพมนุษย์และสิ่งก่อสร้าง เนื่องจากหมอกปกคลุมวันที่กักความร้อนของกรดซัลฟูริก

แม้แต่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งไม่ใช่แก๊สมลพิษ ก็มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ เช่นเดียวกัน ผิวโลกแผ่รังสีอินฟราเรดในช่วง 13 – 18 ไมโครเมตร ซึ่งคาร์บอนไดออกไซด์ดูดซับได้ดีมาก ทำให้รังสีดังกล่าวถูกกักเก็บไว้ในบรรยากาศ และอุณหภูมิของโลกเพิ่มขึ้น เกิดเป็นปรากฏการณ์เรือนกระจก (greenhouse effects) แก๊สเรือนกระจก (greenhouse gases) ส่วนใหญ่มาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงได้พิภพ โดยเฉพาะคาร์บอนไดออกไซด์ มีผลให้ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจากประมาณ 300 ส่วนในล้านส่วน ประมาณ 1 ส่วนในล้านส่วนทุกปี ถึงแม้ว่าแก๊สชนิดอื่นจะทำให้เกิดผลกระทบนี้ได้สูงกว่าเช่น มีเทน ซึ่งเกิดจากการปลูกข้าว และไนตรัสออกไซด์จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ ซึ่งไนตรัสออกไซด์จะทำให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจกได้รุนแรงกว่าคาร์บอนไดออกไซด์เป็นอย่างมาก อีกทั้งยังมีระยะเวลาในการสลายตัวยาวนานถึง 120 ปี แต่ทั้งมีเทนและไนตรัสออกไซด์นั้นเกิดในปริมาณที่น้อยกว่าคาร์บอนไดออกไซด์เป็นอย่างมาก มีการทำนายว่าถ้าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า จะมีผลให้อุณหภูมิผิวโลกเพิ่มขึ้น 2 องศาเซลเซียส ซึ่งมีผลร้ายแรงต่อการละลายของยอดภูเขาน้ำแข็งที่ขั้วโลก และส่งผลให้โลกร้อนขึ้นต่อไปได้อีก

นอกจากภาวะอากาศจะได้รับผลกระทบจากการเผาไหม้เนื่องจากแก๊สพิษแล้ว ยังได้รับผลกระทบจากอนุภาคแขวนลอย ได้แก่ เขม่าและเถ้า จากถ่านหินและน้ำมันเตา ซึ่งมีผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์และการเจริญเติบโตของพืช และยังมีส่วนร่วมในการเร่งการเกิดปฏิกิริยาการเกิดหมอกควันทางโฟโตเคมีให้ทวีคูณด้วย

ในกรณีของแก๊สเชื้อเพลิง การเผาไหม้จะเกิดได้อย่างสมบูรณ์และสะอาด ฟลูแก๊สไม่มีอนุภาคของเถ้า จึงผ่านฟลูแก๊สไปที่ปล่องควันออกสูบรรยากาศได้โดยตรง มลพิษและผลกระทบมีน้อย ในกรณีของเชื้อเพลิงเหลวก็เช่นเดียวกัน ปริมาณเถ้าในน้ำมันเตามีน้อยเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงแข็ง จึงไม่จำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์ดักฝุ่นเท่าไรนัก สิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือการควบคุมการเผาไหม้ให้สมบูรณ์เพื่อไม่ให้แก๊สที่ออกจากปล่องควันมีความเข้มข้นของควันสูงเกินไป ในกรณีของเชื้อเพลิงแข็ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ่านหิน มลพิษและผลกระทบจะเกิดมากที่สุด ทั้งในรูปของแก๊สกลุ่มซัลเฟอร์ ออกไซด์ แก๊สกลุ่มไนโตรเจนออกไซด์ อนุภาคแขวนลอย การกักความร้อนที่เกิดขึ้นในระบบเผาไหม้ และในระบบกำจัดมลพิษ

ในบรรดาแหล่งเกิดมลพิษต่างๆ แหล่งกำเนิดมลพิษจากการเผาไหม้เป็นแหล่งกำเนิดที่สำคัญที่สุด เพราะมีสารมลพิษหลายชนิดถูกปลดปล่อยออกมาในปริมาณมาก และกระจายอยู่ทุก

บริเวณทั่วโลก โดยเฉพาะในประเทศอุตสาหกรรมและในเมืองใหญ่ สารมลพิษส่วนหนึ่งสามารถควบคุมให้ปลดปล่อยออกมาในระดับต่ำได้ด้วยการควบคุมการเผาไหม้ให้สมบูรณ์ และใช้อากาศเกินพอเล็กน้อย แต่มลพิษส่วนหนึ่งมาจากการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง (สูงกว่า 1,750 องศาเซลเซียส) มีผลให้เกิดอะตอม อนุมูลอิสระ และไอออน ที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาแม้เมื่อออกจากห้องเผาไหม้แล้วก็ตาม การปลดปล่อยสารมลพิษจึงเป็นผลสืบเนื่องตามมา โดยค่ามาตรฐานของการปล่อยแก๊สพิษจากแหล่งกำเนิดอยู่กับที่ในประเทศไทย แสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 มาตรฐานของการปล่อยแก๊สพิษในประเทศไทย (ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ราชกิจจานุเบกษา 18 พฤษภาคม 2549)

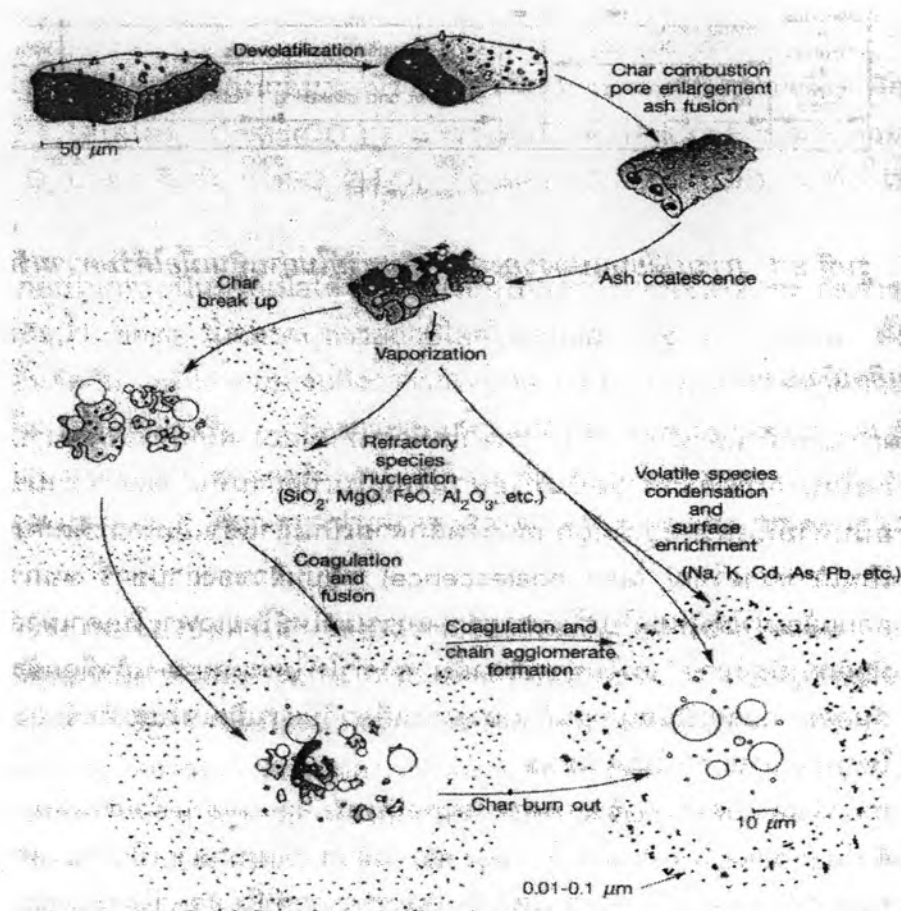
ชนิดของอากาศเสีย	แหล่งที่มาของอากาศเสีย	ค่าปริมาณของอากาศเสียที่ปล่อยทิ้งจาก	
		กระบวนการผลิตที่ไม่มี การเผาไหม้เชื้อเพลิง	กระบวนการผลิตที่มี การเผาไหม้เชื้อเพลิง
1. ฝุ่นละออง (total suspended particulate) (มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	1.1 หม้อไอน้ำ หรือแหล่งกำเนิด ความร้อนที่ใช้เชื้อเพลิง ดังนี้		
	(1) น้ำมันเตา	-	ไม่เกิน 240
	(2) ถ่านหิน	-	ไม่เกิน 320
	(3) ชีวมวล	-	ไม่เกิน 320
	(4) เชื้อเพลิงอื่นๆ	-	ไม่เกิน 320
	1.2 การถลุง หลอมหลอม รีดตีง และ/หรือผลิต อะลูมิเนียม	ไม่เกิน 300	ไม่เกิน 240
	1.3 กระบวนการผลิต	ไม่เกิน 400	ไม่เกิน 320
2. ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulfur dioxide) (ส่วนในล้านส่วน)	2.1 หม้อไอน้ำ หรือแหล่งกำเนิด ความร้อนที่ใช้เชื้อเพลิง ดังนี้		
	(1) น้ำมันเตา	-	ไม่เกิน 950
	(2) ถ่านหิน	-	ไม่เกิน 700
	(3) ชีวมวล	-	ไม่เกิน 60
	(4) เชื้อเพลิงอื่นๆ	-	ไม่เกิน 60
	2.2 กระบวนการผลิต	ไม่เกิน 500	-
3. ก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน ซึ่งคำนวณในรูปของก๊าซ ไนโตรเจนไดออกไซด์ (oxides of nitrogen as Nitrogen dioxide) (ส่วนในล้านส่วน)	หม้อไอน้ำ หรือแหล่งกำเนิดความร้อน ที่ใช้เชื้อเพลิง ดังนี้		
	(1) น้ำมันเตา	-	ไม่เกิน 200
	(2) ถ่านหิน	-	ไม่เกิน 400
	(3) ชีวมวล	-	ไม่เกิน 200
	(4) เชื้อเพลิงอื่นๆ	-	ไม่เกิน 200
4. ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide) (ส่วนในล้านส่วน)	กระบวนการผลิต	ไม่เกิน 870	ไม่เกิน 690

กระบวนการผลิตที่ไม่มี การเผาไหม้เชื้อเพลิง ให้คำนวณผลที่ความดัน 1 บรรยากาศ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ที่ภาวะแห้ง (dry basis) โดยมีปริมาตรอากาศเสียที่ออกซิเจน (ร้อยละของ O₂) ณ ภาวะจริงในขณะตรวจวัด

กระบวนการผลิตที่มีการเผาไหม้เชื้อเพลิง ให้คำนวณผลที่ความดัน 1 บรรยากาศ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ที่ภาวะแห้ง (dry basis) โดยมีปริมาตรอากาศเสียที่ออกซิเจน (ร้อยละของ O₂) ร้อยละ 7

2.10.1 การกำจัดอนุภาค (กัญจนา บุญเกียรติ, 2544)

กลไกการเกิดอนุภาคไถ่่านหินขณะเผาไหม้ แสดงได้ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 กลไกการเกิดอนุภาคไถ่่านหินขณะเผาไหม้

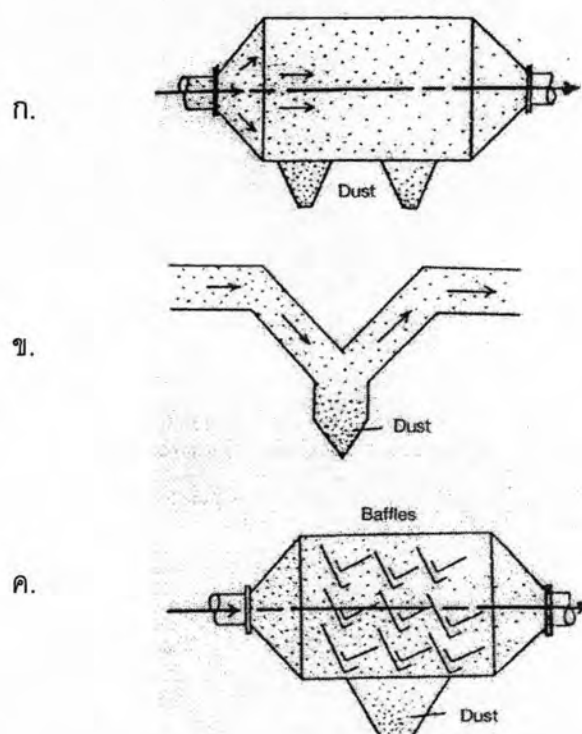
(กัญจนา บุญเกียรติ, 2544)

หลักการสำคัญในการกำจัดอนุภาค คือ

1. การแยกด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก (gravity)
2. การแยกด้วยแรงเฉื่อย (inertia)
3. การใช้ไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic)
4. การกรอง (filtration)
5. การล้าง (scrubbling)

2.10.1.1 อุปกรณ์แยกฝุ่นด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก (กัญจนา บุญเกียรติ, 2544)

อนุภาคมีความหนาแน่นมากกว่าแก๊ส เมื่อปล่อยให้เข้าไปในห้องขนาดใหญ่ ความเร็วของแก๊สจะลดลง อนุภาคจะตกลงข้างล่าง อุปกรณ์นี้เรียกว่าห้องเก็บฝุ่น (settling chamber) แสดงดังรูปที่ 2.18 ซึ่งจะเหมาะสำหรับแก๊สที่ความเร็วต่ำและมีฝุ่นขนาดใหญ่กว่า 100 ไมโครเมตร ดังรูป ก. แต่ถ้าออกแบบให้ดีอาจเก็บฝุ่นขนาดเล็กกว่า 80 ไมโครเมตรได้ นอกจากแบบ ก. แล้ว อาจออกแบบให้ทิศทางการไหลเปลี่ยนแปลง เพื่อให้ฝุ่นตกลงมาง่ายขึ้นดังรูป ข. และประสิทธิภาพจะดีมากยิ่งขึ้นถ้าติดตั้งแผ่นปะทะ เพื่อชะลอความเร็วของฝุ่นและแก๊ส ดังรูป ค.



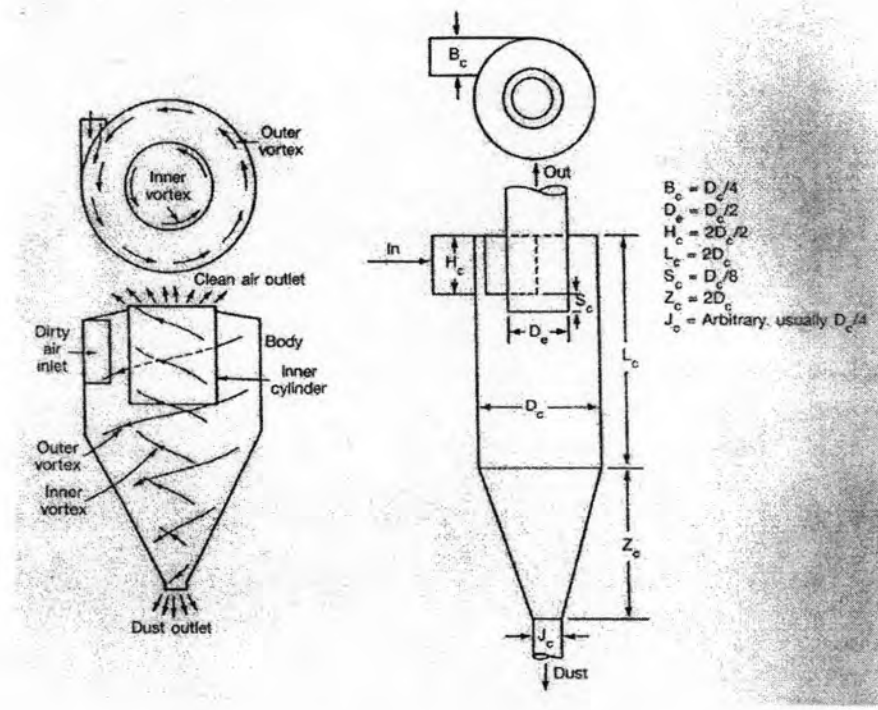
รูปที่ 2.18 อุปกรณ์แยกฝุ่นด้วยแรงโน้มถ่วงของโลกแบบต่างๆ

(กัญจนา บุญเกียรติ, 2544)

ข้อดีของวิธีนี้คือ ไม่ต้องใช้พลังงานในการปฏิบัติการ ข้อเสียคือ ประสิทธิภาพต่ำ ไม่สามารถกำจัดอนุภาคที่เป็นของเหลวได้ ใช้พื้นที่ติดตั้งมาก เทอะทะ โดยทั่วไปจึงต้องใช้ร่วมกับอุปกรณ์อื่นๆ ด้วย

2.10.1.2 อุปกรณ์แยกฝุ่นด้วยแรงเฉื่อย (กัญจนา บุญเกียรติ, 2544)

อาศัยแรงหนีศูนย์กลาง โดยให้แก๊สและอนุภาควิ่งในทางโค้ง อนุภาคจะเกิดแรงดึงออกจากโค้ง ถ้าไปปะทะกับแผ่นกันหรือผนัง ความเร็วจะลดลงและตกลงสู่ด้านล่าง อุปกรณ์ที่ใช้หลักการของแรงหนีศูนย์กลางที่รู้จักกันดีคือ ไชโคลน ซึ่งนำแก๊สสกปรกเข้ามาในแนวสัมผัสกับเส้นรอบวงของทรงกระบอกตั้งด้านบน แก๊สและอนุภาคหมุนปั่นตามแนวสัมผัสและหมุนวนเป็นวอร์เท็กซ์ลงสู่ด้านล่าง อนุภาคใหญ่ที่หนักกว่าหมุนปั่นออกจากแนวสัมผัสไปปะทะกับผนัง ความเร็วจะลดลงแล้วไหลลงตามแนวสอของกรวยลงสู่กันของไชโคลน ในขณะที่อนุภาคเล็กกว่าถูกปั่นอยู่ในกระแสวนแล้วตกลงสู่ด้านล่าง เช่นเดียวกัน ส่วนแก๊สที่สะอาดไหลย้อนขึ้นออกจากไชโคลนทางท่อด้านบน ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 หลักการและสัดส่วนของไชโคลน (กัญจนา บุญเกียรติ, 2544)

ประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นของไชโคลนสามารถคำนวณได้จากสมการ (กัญจนา บุญเกียรติ, 2544)

$$\eta = 1 - \exp \left[\frac{-(1-n)\rho_s Q_g d_p^2 \theta_1}{18\mu W (R_2^{1-n} - R_1^{1-n}) R_2^n (R_2 - R_1)} \right] \quad (2.16)$$

ρ_s =	ความหนาแน่นของอนุภาค
Q_g =	อัตราเร็วของแก๊ส
d_p =	เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค
θ_1 =	(12π) = มุมที่อนุภาคอื่นในที่สุดจะตกกระทบผนัง
R_2 =	รัศมีของเส้นโค้งการหมุนวนของแก๊สสกปรก (ทรงกระบอกไซโคลน)
R_1 =	รัศมีของเส้นโค้งการหมุนวนของแก๊สสะอาด (ทรงกระบอกท่อทางออก)
N =	ค่าคงที่ (0.5-0.7)
W =	ความกว้างของช่องทางเข้าของแก๊สสกปรก
μ =	ความหนืดของแก๊ส

ไซโคลนเหมาะสำหรับอนุภาคหรือฝุ่นที่มีขนาดตั้งแต่ 5 ไมโครเมตรขึ้นไป โดยประสิทธิภาพการทำงานขึ้นอยู่กับขนาดของไซโคลนและขนาดของอนุภาค ดังนี้

- ประสิทธิภาพของไซโคลนลดลง เมื่อขนาดของไซโคลนเพิ่มขึ้น
- ประสิทธิภาพของไซโคลนเพิ่มขึ้น เมื่อขนาดของอนุภาคเพิ่มขึ้น
- ประสิทธิภาพของไซโคลนสูงเมื่อรับภาระสูง (อัตราเร็วของแก๊สและปริมาณฝุ่นสูง)
- ไซโคลนขนาดหนึ่งๆ กำจัดอนุภาคได้ดีที่สุดในช่วงขนาดหนึ่งๆ

ดังแสดงเป็นตัวอย่าง ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ประสิทธิภาพของไซโคลนที่ขนาดของไซโคลนและขนาดของอนุภาคต่างๆ กัน (กัญจนา บุญยเกียรติ, 2544)

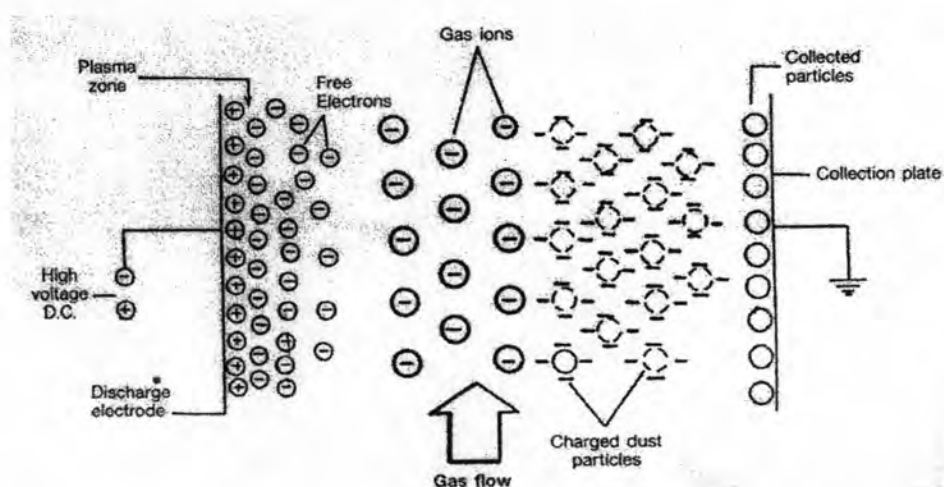
เส้นผ่านศูนย์กลาง ไซโคลน (นิ้ว)	ประสิทธิภาพรวม (เปอร์เซ็นต์)	ประสิทธิภาพ (เปอร์เซ็นต์)			
		ที่ขนาดเล็กกว่า (ไมโครเมตร)		ที่ใหญ่กว่า (ไมโครเมตร)	
6	90	-5	66	+5	98
9	83	-10	60	+10	99
24	70	-20	47	+20	98

ข้อเด่นของไซโคลนคือ ค่าบำรุงรักษาต่ำ การทำงานได้ประสิทธิภาพสูง โดยเฉพาะเมื่ออนุภาคมีขนาดใหญ่และภาระการทำงานสูง ข้อด้อยคือ ไม่สามารถกำจัดฝุ่นละเอียดได้ ประสิทธิภาพลดลงเมื่อมีฝุ่นช่วงขนาดเล็กเพิ่มขึ้น และต้องใช้พลังงานสูง

เพื่อปั่นแก๊สเข้าไซโคลน ดังนั้นในการออกแบบและการใช้งาน นิยมใช้ไซโคลนต่อกันเป็นชุดมากกว่าเดี่ยว

2.10.1.3 อุปกรณ์แยกฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตย์ (กัญจนา บุญเกียรติ, 2544)

ใช้หลักการผ่านแก๊สสกปรกเข้าไปในสนามไฟฟ้า ทำให้อนุภาคเกิดประจุขึ้น แล้วจับอนุภาคไว้ในแผ่นอิเล็กโทรดที่มีประจุตรงกันข้าม แล้วทำให้อนุภาคที่เกาะตกลงสู่ที่รองรับเป็นระยะๆ แสดงหลักการดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 หลักการแยกฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต

(กัญจนา บุญเกียรติ, 2544)

กลไกการแยกอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิต ประกอบด้วย 4 ขั้นตอนคือ

1. การไอออนไนซ์ (ionization) ใช้หลักการปล่อยกระแสไฟฟ้าตรงที่ความต่างศักย์ระหว่าง 45 – 70 กิโลโวลต์ (ปัจจุบันใช้กระแสตรงแบบพัลส์ (pulsed)) ให้แก่อิเล็กโทรดที่อัดประจุ เรียกว่า discharge electrode โมเลกุลของแก๊สบริเวณปลายอิเล็กโทรดแตกออกเป็นกระแสของกลุ่มพลาสมา คือไอออนบวกและอิเล็กตรอนอิสระ
2. การเกิดโคโรนา (corona generation) อิเล็กตรอนอิสระถูกผลักรออกไปและเคลื่อนที่ไปหาพื้นที่มีประจุบวกที่ต่อสายดินไว้ ชนกับโมเลกุลของแก๊สกลายเป็นไอออนลบ ไอออนลบมีความสามารถในการเคลื่อนที่ได้ช้าจะรวมกลุ่มกันเป็นบริเวณที่มีประจุลบ เรียกว่าโคโรนา

3. การทำให้อนุภาคเกิดประจุและการรวบรวมอนุภาค (charging and collecting dust particles) เมื่อเกิดโคโรนาแล้ว อนุภาคในแก๊สสกปรกที่เคลื่อนที่เข้ามาจะกลายเป็นประจุลบ การเกิดประจุในอนุภาคนี้เกิดทั้งอนุภาคที่เป็นของแข็งและหยดของเหลว แล้วถูกดึงไปยังอิเล็กโทรดที่มีประจุบวก เรียกว่า collective electrode ดังนั้นประจุจึงถูกสะสมและเกาะบนพื้นผิว
4. การกำจัดอนุภาค (particle removal) อนุภาคที่เกาะสะสมบนพื้นผิวอิเล็กโทรด ถูกกำจัดออกโดยวิธีแห้ง โดยเคาะพื้นผิวอิเล็กโทรดด้วยเครื่องมือกลหรือใช้ลมเป่า หรือด้วยหลักการแม่เหล็กไฟฟ้า หรือวิธีเปียกโดยใช้ของเหลวล้างลงมา

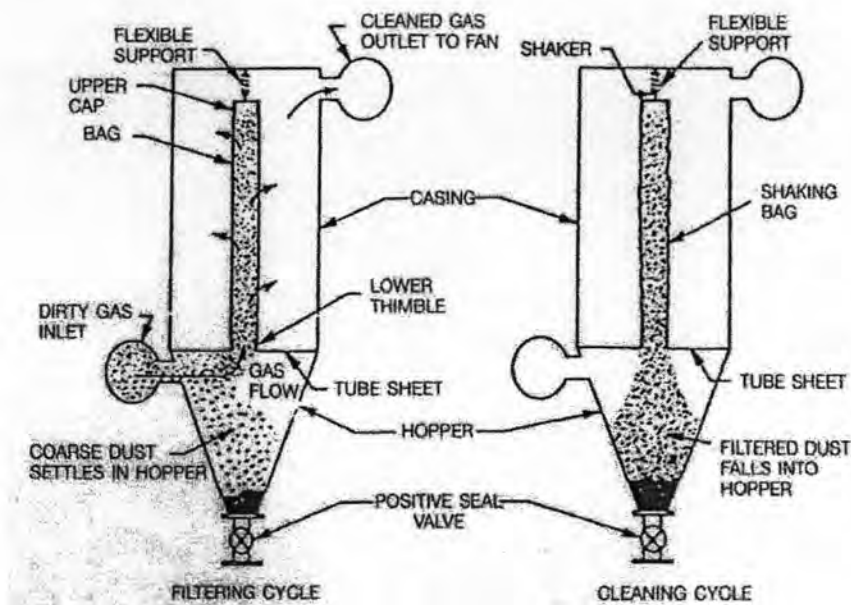
เครื่องแยกอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic precipitator) มักเรียกย่อว่า ESP ปฏิบัติงานในช่วงอุณหภูมิ 95 – 450 องศาเซลเซียส แต่สามารถออกแบบให้ปฏิบัติงานที่อุณหภูมิและความดันสูงกว่านี้ได้ ความดันแก๊สที่เข้าประมาณ 600 มิลลิเมตร น้ำ เครื่องแยกแบบ ESP นี้ สามารถรับภาระความเข้มข้นของอนุภาคในแก๊สได้สูงถึง 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ในปัจจุบันนี้ วิธีแยกอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิตเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด และสามารถแยกฝุ่นหรืออนุภาคขนาดเล็กมาก (จนถึง 0.01 ไมโครเมตร) คือขนาดของไวรัสได้ จึงเป็นที่นิยมใช้กันมาก ทั้งในขนาดเล็กที่ใช้กับรถยนต์ ไปจนถึงขนาดใหญ่ที่ใช้กับอุตสาหกรรม

ข้อดีของวิธีนี้คือ ประสิทธิภาพสูงมาก (99 -99.5 เปอร์เซ็นต์) , ใช้กับแก๊สสกปรกมาก (ปริมาณอนุภาคถึง 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร) ได้ , ปฏิบัติการง่ายและไม่มีปัญหายุ่งยาก , ความดันลดต่ำ และ กำจัดได้ทั้งอนุภาคของแข็งและหยดของเหลว และที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตรได้ดี ข้อเสียคือ ราคาแพง , ใช้พลังงานสูง , ประสิทธิภาพดีต่อเมื่อรับภาระสูง และใช้พื้นที่ติดตั้งมาก

2.10.1.4 การกรอง (กัญญา บุนยเกียรติ, 2544)

ใช้หลักการให้แก๊สสกปรกไหลผ่านเส้นใยที่สานกันไว้ ทำให้อนุภาคถูกกรองไว้และปล่อยแก๊สสะอาดออกไป วัสดุที่ใช้มี 2 แบบ คือ แบบผ่านกรองเส้นใยอัด (packed filter) ซึ่งมีเส้นใยหยาบสานกันหลวมๆแล้วอัดเป็นแผ่นหนา เช่นเดียวกับที่ใช้ในเครื่องปรับอากาศ เหมาะกับแก๊สที่ไม่สกปรกมาก และแบบกระดาษกรองหรือเส้นใยชั้นเดียวทอเป็นผืนผ้า (single-layer filter) เหมาะสำหรับการกรองอนุภาคหรือฝุ่นละเอียดจากแก๊สที่สกปรกได้ เส้นใยที่ใช้อาจเป็นเส้นใยทอผ้าปกติ หรือเส้นใยพิเศษทนการกัดกร่อน เช่น เส้นใยแก้ว หรือเส้นใยเคลือบเทฟลอน ในการใช้งานจะนำมาทำเป็นถุงกรอง

(bag filter) รูปทรงกระบอกยาวติดตั้งในแนวตั้ง ทำงานเป็นรอบๆ เพื่อเช็ดฝุ่นที่สะสม ออกเป็นระยะๆ ดังรูปที่ 2.21



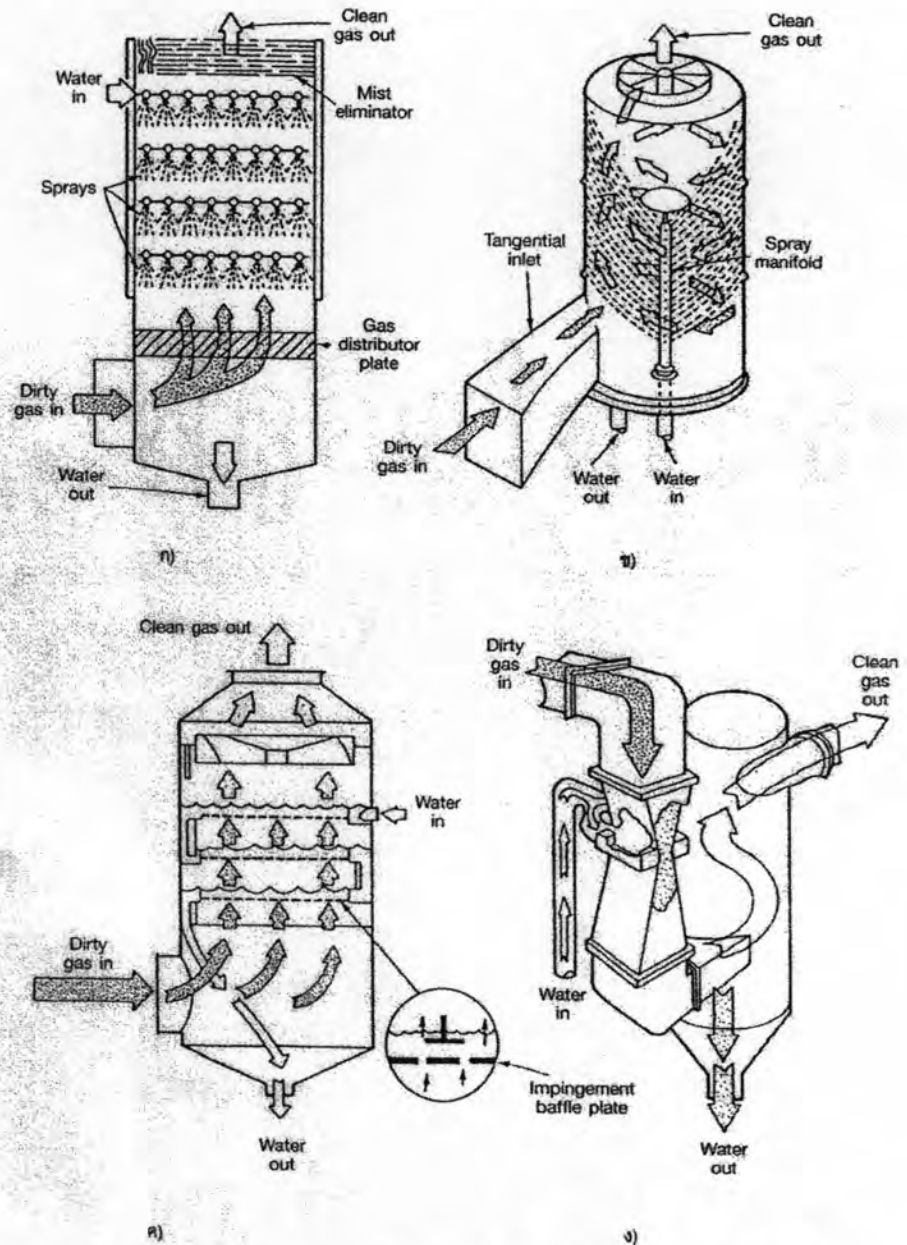
รูปที่ 2.21 เครื่องกรองฝุ่นแบบถุงกรอง (กัญจนา บุญเกียรติ, 2544)

ประสิทธิภาพการกรองของถุงกรองสูงมากกว่า 99เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ การเกาะสะสมกันของชั้นฝุ่น ซึ่งทำให้เกิดความดันลดสูงและการทำงานมีผลจากความชื้นหรือ หยดของเหลวที่ควบแน่นได้ที่ติดมากับแก๊ส โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ไอของกรดซัลฟูริกในฟลู แก๊สจากการเผาไหม้ถ่านหินจะควบแน่นบนเส้นใย ทำให้เกิดการกัดกร่อนรุนแรง นอกจากนี้ยังมีข้อจำกัดเกี่ยวกับความเร็วของแก๊สและอุณหภูมิด้วย ในปัจจุบันนิยมใช้ เครื่องกรองฝุ่นแบบถุงกรองมาก โดยเฉพาะฝุ่นหรืออนุภาคขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายต่ำกว่าเครื่องแยกแบบ ESP

2.10.1.5 การล้าง (wet scrubbing) (กัญจนา บุญเกียรติ, 2544)

การกำจัดอนุภาคโดยวิธีต่างๆข้างต้น มีประสิทธิภาพกำจัดอนุภาคแขวนลอยที่เป็นของแข็งและหยดของเหลวได้ดี แต่ละวิธีมีข้อจำกัดในการปฏิบัติการ โดยเฉพาะช่วงขนาดอนุภาคและปฏิกิริยาการกัดกร่อนอันอาจเกิดขึ้นได้ วิธีการล้างเป็นวิธีปฏิบัติที่คล่องตัวกว่า โดยมีข้อจำกัดในแง่สมบัติและปริมาณของสารมลพิษในแก๊สน้อยกว่า หลักการคือ ใช้ของเหลวที่ใช้ล้าง (เช่น น้ำ) ฉีดกระแทกกับ กระแสแก๊ส ทำให้อนุภาคนปะทะกับหยดของเหลวที่ใช้ในการล้าง เกิดการ

รวมตัวกันบนพื้นผิว และอาจมีของเหลวและแก๊สบางชนิดละลายลงในของเหลว แล้วออกไปจากระบบ ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 เครื่องล้างแก๊สชนิดต่างๆ (กัญจนา บุญเกียรติ, 2544)

ก) แบบหอสเปรย์

ข) หอสเปรย์แบบไซโคลน

ค) แบบแผ่นปะทะ

ง) แบบคอคอดเวนทิวรี

กลไกการกำจัดเกิดขึ้น 4 ขั้นตอนคือ

1. แก๊สสกปรกพบกับหยดน้ำซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าอนุภาค 10 – 1,000 เท่า
2. อนุภาคและหยดของเหลวเกิดการปะทะชน และการระแทกกัน

3. อนุภาคเกาะบนผิวหยดของเหลวโดยแรงดึงดูดผิวของของเหลว เกิดการรวมตัวของอนุภาค และเกิดการละลายของของเหลวและแก๊ส
4. หยดของเหลวรวมตัวกันตกลงสู่ด้านล่างแล้วถูกนำออกไปจากระบบ

เครื่องล้างแก๊สเหมาะสำหรับกำจัดอนุภาคหลังจากแก๊สผ่านไซโคลนแล้ว และอนุภาคมีช่วงขนาดใหญ่กว่าที่จะต้องใช้เครื่องแยกแบบ ESP หรือแบบถุงกรอง คือในช่วง 2.5 – 10 ไมโครเมตร โดยมีประสิทธิภาพประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์

ข้อดีคือ ค่าใช้จ่ายด้านการลงทุนถูก , ได้ประสิทธิภาพสูงตลอดทั้งช่วงขนาดของอนุภาค และ ทำหน้าที่เป็นเครื่องปฏิกรณ์ได้ด้วย คือทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างแก๊สมลพิษกับของเหลวที่ใช้ล้างพร้อมกันไป เช่นใช้สารละลายปูนขาวฉีดพ่นเพื่อจับแก๊สกลุ่มซัลเฟอร์ออกไซด์ในฟลูแก๊ส ข้อเสียคือ ต้องใช้พลังงานสูง โดยเฉพาะอนุภาคขนาดเล็กกว่า 5 ไมโครเมตร , ของเหลวที่ใช้ล้าง เมื่อแยกสารมลพิษออกแล้วต้องนำกลับมาใช้อีก จึงมีปัญหาการมีอนุภาคขนาดเล็กเจือปน จึงทำให้เกิดการสึกกร่อนที่หัวฉีด และ ต้องกำจัดของเสียในรูปน้ำเสียจากระบบการล้าง

2.10.2 วัฏจักรไนโตรเจน (สุब्ณชิต นิर्मรัตน์, 2549)

ไนโตรเจนเป็นธาตุที่มีความสำคัญต่อสิ่งมีชีวิตทุกชนิด เพราะไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบพื้นฐานของโปรตีนและกรดนิวคลีอิก โดยทั่วไปในเซลล์ของสิ่งมีชีวิตมีธาตุไนโตรเจนประมาณ 16 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้ง อย่างไรก็ตาม ไนโตรเจนเป็นธาตุที่พืชขาดแคลนมากที่สุด ถึงแม้ว่าไนโตรเจนจะเป็นส่วนประกอบที่สำคัญที่สุดของพืชเป็นอันดับที่ 4 รองมาจาก คาร์บอน ไฮโดรเจน และ ออกซิเจน ธาตุไนโตรเจนเป็นธาตุอาหารที่สำคัญต่อพืช โดยทั่วไปพืชจะมีความต้องการธาตุไนโตรเจนเป็นจำนวนมาก เพราะเป็นธาตุอาหารที่สำคัญในการส่งเสริมการเจริญเติบโตของใบและลำต้นของพืช โดยพืชที่ได้รับไนโตรเจนในปริมาณที่เพียงพอจะมีใบเขียวสด รวมทั้งยังเป็นธาตุอาหารที่ควบคุมการออกดอกและการออกผลซึ่งช่วยเพิ่มผลผลิตให้มีผลและเมล็ดมากขึ้น

ดินโดยทั่วไป มักจะมีไนโตรเจนไม่เพียงพอกับความต้องการของพืช เพราะไนโตรเจนส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของแก๊สไนโตรเจน ซึ่งพืชไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ ยกเว้นพืชบางชนิดที่มีจุลินทรีย์อยู่ร่วมกัน จะสามารถตรึงแก๊สไนโตรเจนและเปลี่ยนแก๊สไนโตรเจนให้เป็นแอมโมเนียมไอออน และแอมโมเนียมไนเตรต ซึ่งพืชทั่วไปสามารถ

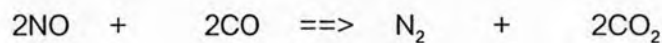
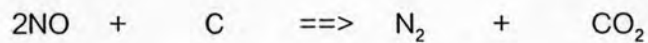
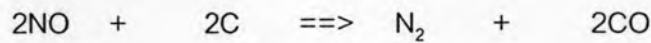
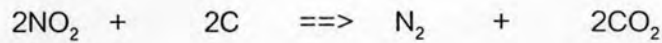
2.10.2.1 แก๊สไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) (ปิยะพันธ์ จะกอ, 2548)

แก๊สไนโตรเจนออกไซด์เป็นแก๊สไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ละลายน้ำได้บ้างเล็กน้อย สามารถเกิดขึ้นได้ตามธรรมชาติได้แก่ ฟ้าผ่า ฟ้าแลบ ภูเขาไฟระเบิด หรือจากการกระทำของมนุษย์เช่น การเผาเชื้อเพลิง อุตสาหกรรมกรดไนตริก ชุบโลหะ กรดกำมะถัน และวัตถุระเบิด เป็นต้น แก๊สไนโตรเจนออกไซด์ที่สำคัญคือ แก๊สไนตริกออกไซด์ (NO) และแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO₂) โดยแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์จะพบได้น้อยมากในฟลูแก๊สและไอเสียจากยานพาหนะ โดยจะเกิดขึ้นในบริเวณเปลวไฟแต่จะถูกรีดิวซ์กลับไปเป็นไนตริกออกไซด์ในบริเวณหลังเปลวไฟ แก๊สเหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยากับแสง (photochemical reaction) ในบรรยากาศก่อให้เกิดหมอกที่เรียกว่า smog เป็นสารมลพิษทางโฟโตเคมี เป็นสารประกอบที่มีพิษ (noxious compound) เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตทั้งพืชและสัตว์ อีกทั้งแก๊สไนตริกออกไซด์จะถูกออกซิไดซ์เมื่อพบกับออกซิเจนและโอโซนในบรรยากาศกลายเป็นแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นสาเหตุของฝนกรดเนื่องจากละลายน้ำแล้วจะได้กรดไนตริก (มีส่วนให้เกิดฝนกรดถึง 30 เปอร์เซ็นต์) นอกจากนี้แก๊สไนตริกออกไซด์ยังสามารถรวมกับฮีโมโกลบินในเม็ดเลือดแดงได้เช่นเดียวกับแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สเหล่านี้จึงจัดเป็นสารที่ก่อให้เกิดมลพิษในอากาศ ซึ่งจะต้องควบคุมปริมาณไม่ให้เกินพิกัดที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต

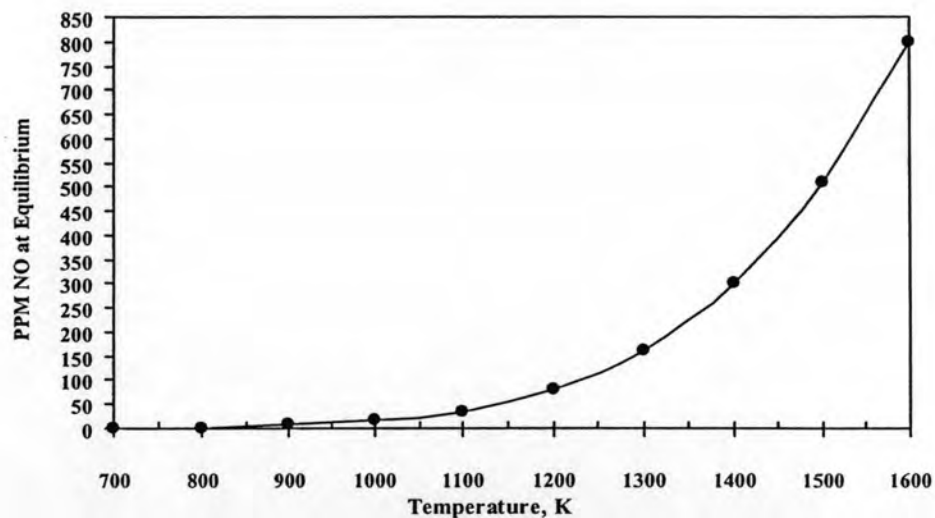
แก๊สไนโตรเจนออกไซด์สามารถเกิดได้จากการเผาไหม้ถ่านหินและน้ำมัน ซึ่งพบว่าจะมีแก๊สไนตริกออกไซด์มากกว่าแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ โดยปริมาณของแก๊สไนโตรเจนออกไซด์จะขึ้นกับ

1. ชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้ ขึ้นกับปริมาณของไนโตรเจนที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในถ่านหินหรือเชื้อเพลิงที่นำมาใช้ในการเผาไหม้
2. อุณหภูมิของการเผาไหม้ ยิ่งอุณหภูมิในการเผาไหม้สูงจะทำให้เกิดแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ได้ดี โดยเฉพาะที่อุณหภูมิของการเผาไหม้สูงกว่า 1,173 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 2.24
3. ปริมาณอากาศมากเกินไป ส่งผลให้มีปริมาณของไนโตรเจนในอากาศมากขึ้น และก่อให้เกิดแก๊สไนโตรเจนออกไซด์มากตามไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.25
4. การเกิดแก๊สไนโตรเจนออกไซด์จะลดลงเมื่อเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาของแก๊สในช่วงอุณหภูมิสูงสุดลดลง
5. ถ้านำฟลูแก๊สมาทำให้เย็นลงช้าๆ แก๊สไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดจะกลายเป็นแก๊สไนโตรเจน และแก๊สออกซิเจน

6. ถ่านชาร์และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์สามารถลดปริมาณแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ลงโดยเปลี่ยนเป็นแก๊สไนโตรเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หรือแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ โดยมีความร้อนเข้าร่วมด้วย ดังปฏิกิริยา

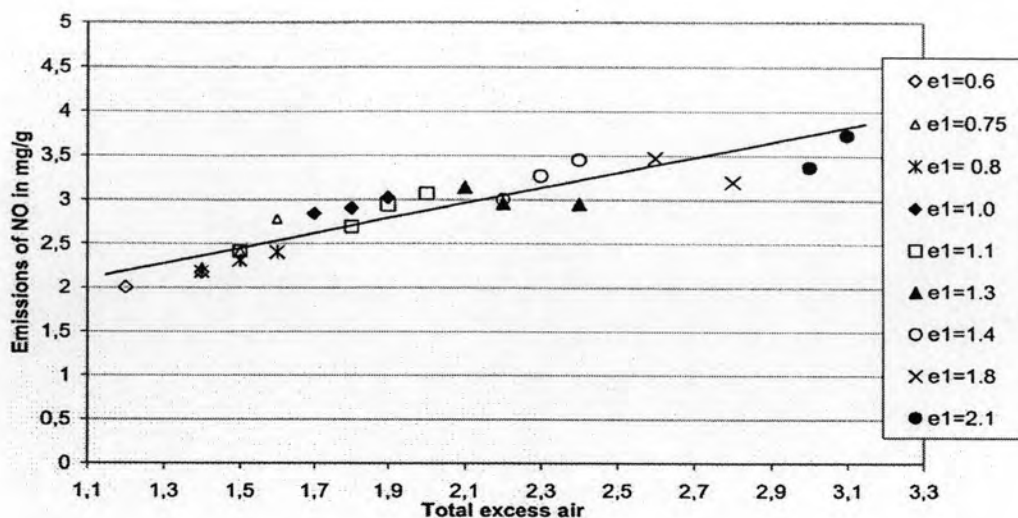


7. การเผาไหม้เป็นขั้นๆ (staged combustion) โดยเผาไหม้ช่วงแรกที่ภาวะอากาศน้อยๆ หรือภาวะเชื้อเพลิงเกินพอไนโตรเจนออกไซด์จะถูกปล่อยออกมาน้อย เนื่องจากอากาศน้อยกว่าเชื้อเพลิง อุณหภูมิต่ำ ออกซิเจนน้อย นอกจากนี้โมเลกุลของไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้นสามารถทำปฏิกิริยาไปเป็นแก๊สไนโตรเจนซึ่งมีความเสถียรสูง หลังจากนั้นจึงป้อนอากาศเข้าไปเพิ่มในขั้นถัดไป เรียกภาวะเช่นนี้ว่า ภาวะอากาศเกินพอ เพื่อทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ต่อไป (โปรตปราน สิริธีรศาสตร์, 2539) ดังรูปที่ 2.26

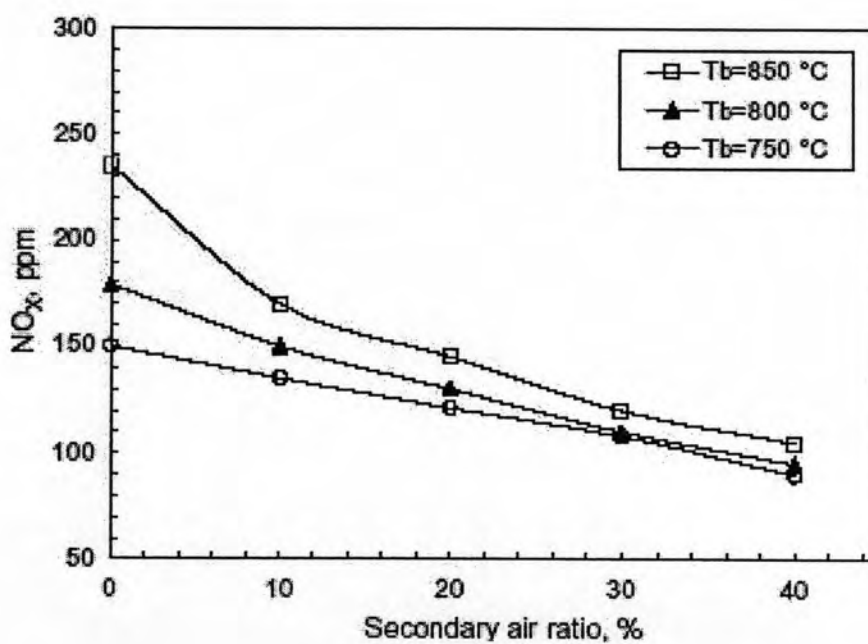


รูปที่ 2.24 การเกิดไนโตรเจนออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างๆ

(ปิยะพันธ์ จะกอ, 2548)



รูปที่ 2.25 ปริมาณการปล่อยแก๊สไนตริกออกไซด์โดยเปรียบเทียบกับปริมาณอากาศเกินพอ (Rogmuae, et al., 2008)

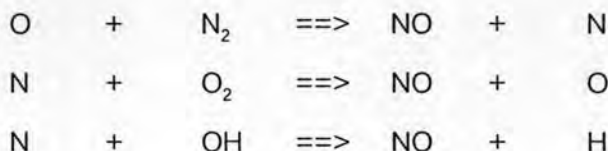


รูปที่ 2.26 ปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงโดยมีการเผาไหม้เป็น 2 ชั้น (Staged combustion) ที่ปริมาณอากาศรวมเท่ากัน และเปรียบเทียบที่อุณหภูมิในการเผาไหม้ต่างๆ กัน (Okasha, 2007)

โดยทั่วไปสามารถแบ่งการเกิดแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ได้ 4 เส้นทาง (สำเร็จ จักรใจ, 2547)

1. Thermal NO_x (Zeldovich-NO)

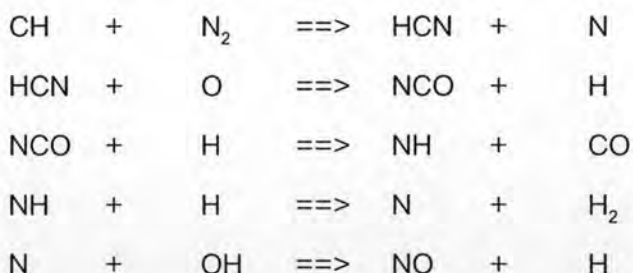
เป็นการเกิดแก๊สไนโตรเจนออกไซด์จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของแก๊สไนโตรเจนในบรรยากาศที่อุณหภูมิสูง (ประมาณ 1,700 องศาเซลเซียส)



สาเหตุที่ได้ชื่อว่า thermal NO เพราะว่า ไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้นนี้ต้องใช้พลังงานก่อกัมมันต์ที่สูงมาก ทั้งนี้เพราะต้องเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมของ N₂ ในรูปของไตรพันธะเพื่อเกิดปฏิกิริยา และจะเกิดได้อย่างเร็วมากก็ต่อเมื่ออุณหภูมิต้องสูงมากเท่านั้น ดังนั้นการที่จะลดปริมาณ thermal NO ได้นั้นมีเพียง 2 วิธี คือ ลด [N₂] และ [O] หรือ ลดอุณหภูมิการเผาไหม้

2. Prompt NO (Fenimore-NO)

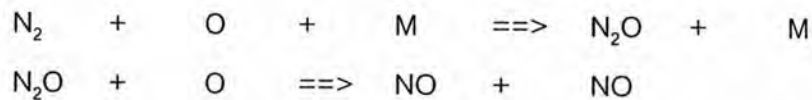
Prompt NO เกิดจากอนุมูลอิสระ CH ซึ่งแต่เดิมพิจารณาว่าไม่มีความสำคัญประการใด แต่กลับพบว่าอนุมูลอิสระ CH นี้ เกิดขึ้นในลักษณะเป็นสารชั้นกลางที่บริเวณแนวเปลวไฟเท่านั้น จากนั้น CH จะทำปฏิกิริยากับไนโตรเจนในอากาศทำให้เกิดกรดไฮโดรไซยานิก (HCN) ซึ่งจะทำปฏิกิริยาต่อไปจนเกิด NO ดังสมการต่อไปนี้



อย่างไรก็ตาม การประเมินเพื่อหาปริมาณ prompt NO ภายใต้ภาวะความเข้าใจในการเกิดปฏิกิริยาในปัจจุบันยังไม่ดีนักเพราะยังมีข้อมูลเกี่ยวกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาของ prompt NO ค่อนข้างน้อย ทั้งนี้ prompt NO จะเกิดขึ้นที่ภาวะอากาศน้อยๆ (อัตราส่วนอากาศที่ใช้จริงต่ออากาศทางทฤษฎี < 1) ที่อุณหภูมิต่ำกว่าการเกิด thermal NO คือประมาณ 1,300 องศาเซลเซียส

3. NO ที่เกิดขึ้นผ่านไนตรัสออกไซด์ (N₂O)

Thermal NO จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงๆ ในขณะที่ prompt NO จะเกิดที่ภาวะอากาศน้อยๆ แต่สำหรับ NO ที่เกิดผ่าน N₂O จะเกิดได้ดีที่ภาวะการเผาไหม้ที่อากาศมาก (อัตราส่วนอากาศที่ใช้จริงต่ออากาศทางทฤษฎี > 1) NO ที่เกิดผ่าน N₂O นี้จะมีความคล้ายคลึงกับการเกิด thermal NO ในแง่ที่ว่าอะตอมของออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยาโดยตรงกับโมเลกุลไนโตรเจน แต่ต้องอาศัยโมเลกุลที่สาม M เป็นตัวช่วยเร่งปฏิกิริยาให้เกิด N₂O จากนั้น N₂O จะทำปฏิกิริยากับอะตอมของออกซิเจนต่อไปจนเกิด NO ตามสมการข้างล่างนี้

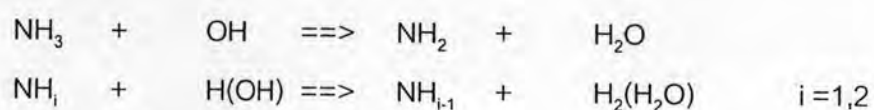


ยิ่งความดันจากการเผาไหม้มีค่าสูงมากเท่าไร NO ที่เกิดขึ้นผ่านไนตรัสออกไซด์ ก็ยังเกิดขึ้นเท่านั้น เนื่องจากต้องการพลังงานกระตุ้นที่ต่ำ และอุณหภูมิการเผาไหม้ที่ต่ำ ก็ไม่ได้มีผลเหมือนกับ thermal NO ดังนั้น NO ที่เกิดขึ้นผ่านไนตรัสออกไซด์ จึงเกิดได้ดีที่ระบบการเผาไหม้ถูกเจือจางด้วยอากาศมาก

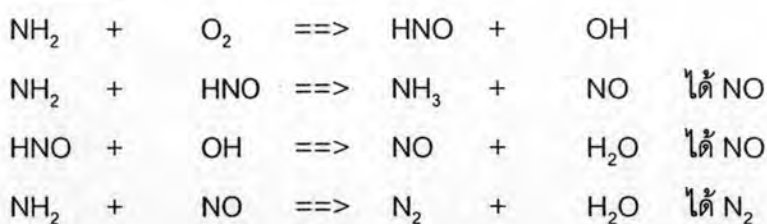
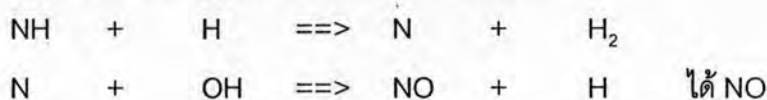
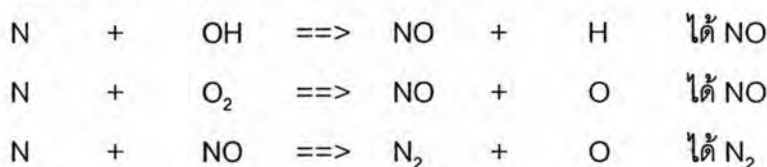
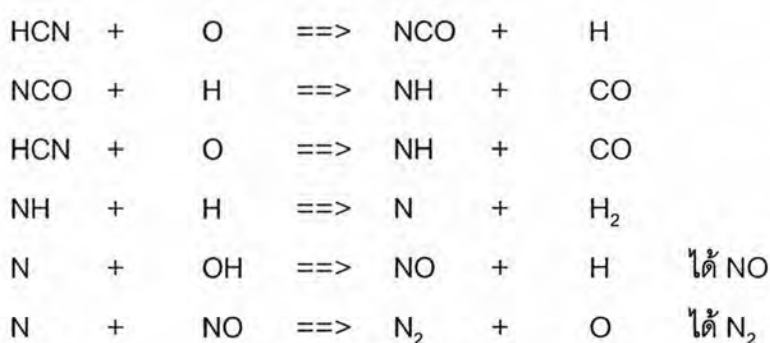
4. NO ที่เกิดจากไนโตรเจนในเชื้อเพลิง (Fuel NO)

จะเกิดในขณะที่เชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้ มีธาตุไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบอยู่ในเชื้อเพลิงจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในบรรยากาศ โดยทั่วไประบบการเผาไหม้แบบฟลูอิดไคต์เบดจะเกิด NO ที่เกิดจากไนโตรเจนในเชื้อเพลิงมากกว่า (ประมาณร้อยละ 90) กลไกการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบในถ่านหินจะเกิดการสลายตัวเป็นสองส่วนดังกล่าวคือ สารระเหยและถ่านชาร์ ในแต่ละส่วนจะมีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ เมื่อเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงไนโตรเจนจะเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบที่อยู่ในรูป แอมโมเนีย (NH₃) และ กรดไฮโดรไซยานิก (HCN) ก่อนจะทำปฏิกิริยาต่อไปจนเกิด NO ดังสมการข้างล่าง

กรณีแอมโมเนีย



เมื่อ NH_{i-1} คือ amine radical อาจเป็น NH₂, NH หรือ N ก็ได้ ซึ่งจะถูกออกซิไดซ์ต่อไปจนเกิด NO หรือ N₂

กรณี NH₂กรณี NH (คล้ายปฏิกิริยาการเกิด prompt NO)กรณี N (คล้ายปฏิกิริยาการเกิด thermal NO)กรณีของกรดไฮโดรไซยานิก (คล้ายปฏิกิริยาการเกิด prompt NO)

จะพบว่า fuel NO มีกลไกการเกิด NO ที่ผสมผสานระหว่าง thermal NO และ prompt NO โดยจะเกิดขึ้นได้ดีในกรณีการเผาไหม้ที่เจือจางด้วยออกซิเจนในปริมาณที่สูง ดังนั้นจึงต้องควบคุมอัตราส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงต่อออกซิเจนให้ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้เชื้อเพลิงที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ

2.10.2.2 แก๊สไนตรัสออกไซด์ (N₂O)

(ที่มา <http://en.wikipedia.org/wiki/N2O> วันที่ 16 เมษายน พ.ศ.2551)

แก๊สไนตรัสออกไซด์ ณ อุณหภูมิห้อง เป็นแก๊สไม่มีสี แต่มีกลิ่นและรสชาติหอมหวานชวนเพลิดเพลิน หากสูดดมในปริมาณมากจะรู้สึกเคลิบเคลิ้ม มีความสุข จึงมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า แก๊สหัวเราะ เป็นแก๊สไม่ติดไฟแต่ช่วยให้ไฟติดเนื่องจากมีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ ในปัจจุบันแก๊สไนตรัสออกไซด์ได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในวงการแพทย์

ทำหน้าที่เป็นยาสลบ ยาชา หรือยาระงับปวด เป็นต้น อีกทั้งยังมีการนำไปใช้ในการปรับแต่งเครื่องยนต์ที่มีความเร็วรอบสูงๆ เพื่อเพิ่มกำลังของเครื่องยนต์ในฐานะเป็นตัวออกซิไดเซอร์ หรือเรียกว่า NOS (nitrous oxide systems)

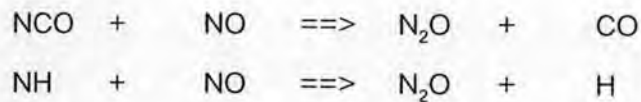
ออกไซด์ของไนโตรเจนมีอยู่หลายชนิด แต่ไนตรัสออกไซด์จะมีความแตกต่างจากออกไซด์ของไนโตรเจนชนิดอื่นๆ เป็นอย่างมากตรงที่เป็นแก๊สเรือนกระจกชนิดรุนแรง ซึ่งหากกล่าวถึงแก๊สเรือนกระจกคงจะหนีไม่พ้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากมีการปล่อยออกสู่บรรยากาศในปริมาณมากมายมหาศาล การกำหนดค่าศักยภาพของแก๊สเรือนกระจก (GWP, global warming potential) จะกำหนดให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเป็น 1 GWP แต่แก๊สไนตรัสออกไซด์มีผลกระทบต่อภาวะเรือนกระจกมากกว่าคาร์บอนไดออกไซด์ถึงประมาณ 310 เท่า หรือ 310 GWP เมื่อเทียบที่ปริมาณเท่าๆกัน และมีระยะเวลาในการสลายตัวมากกว่า 100 ปี ดังแสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ศักยภาพของแก๊สเรือนกระจก เปรียบเทียบโดย 1 กิโลกรัมของแก๊สเรือนกระจกต่อ 1 กิโลกรัมของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Based on Intergovernmental Panel on Climate Change Third Assessment Report, 2001)

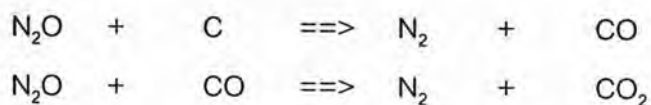
Greenhouse gas	Estimated Lifetime (years)	Global Warming Potential		
		20 years	100 years	500 years
Carbon Dioxide (CO ₂)	Variable	1	1	1
Methane (CH ₄)	12.0	62	23	7
Nitrous Oxide (N ₂ O)	114	275	296	156

ไนตรัสออกไซด์ส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายดิน สารอินทรีย์ในน้ำ และมหาสมุทรโดยแบคทีเรีย ซึ่งในภาวะธรรมชาตินั้นมีความสมดุลอยู่แล้ว แต่ในปัจจุบันมีการทำเกษตรกรรมกันอย่างแพร่หลาย มีการพรวนดิน ใส่ปุ๋ยไนโตรเจน อีกทั้งยังมีการทำฟาร์มปศุสัตว์ ซึ่งทำให้เกิดการย่อยสลายโดยแบคทีเรียในปริมาณมากขึ้นจึงเกิดการสะสมของแก๊สไนตรัสออกไซด์ในบรรยากาศ โดยคิดเป็นปริมาณถึง 65 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ใน

กระบวนการอุตสาหกรรม อาทิเช่น อุตสาหกรรมไนลอน อุตสาหกรรมเคมีและพลาสติก บางชนิด อุตสาหกรรมที่มีกรดไนตริกเกี่ยวข้อง และการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล ทำให้เกิดแก๊สไนตรัสออกไซด์สู่สิ่งแวดล้อม 20 เปอร์เซ็นต์ โดยปฏิกิริยาการเกิดไนตรัสออกไซด์จากกระบวนการเผาไหม้เป็นดังนี้



และปฏิกิริยาเปลี่ยนแก๊สไนตรัสออกไซด์เป็นแก๊สไนโตรเจนมีดังนี้



2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปิยะพันธ์ จะกอ (2548) ได้ทดลองเผาไหม้ถ่านหินผสมแกลบโดยใช้เครื่องเผาไหม้ฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน พบว่า สามารถผสมแกลบกับถ่านหินได้มากที่สุดที่ร้อยละ 13.11 โดยน้ำหนักเนื่องจากข้อจำกัดของระบบป้อนเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลอง จากการทดลองที่อัตราส่วนผสมของแกลบที่ 23.19 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะเกิดการไหม้ของเชื้อเพลิงย้อนเข้าในถังบรรจุเชื้อเพลิง ปริมาณแกลบที่เพิ่มขึ้นทำให้อุณหภูมิส่วนล่างของท่อโรเซออร์สูงขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณแกลบมีผลทำให้ปริมาณออกซิเจนและแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ (ไนตริกออกไซด์และไนโตรเจนไดออกไซด์) เพิ่มขึ้น ในขณะที่แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลง เนื่องจากแกลบมีปริมาณไนโตรเจนมากกว่าถ่านหิน และแกลบมีปริมาณคาร์บอนคงตัวและซัลเฟอร์น้อยกว่าถ่านหิน

ชัยวัฒน์ พรหมภูเบศร์ (2548) ได้ทดลองเผาไหม้ถ่านหินผสมแกลบโดยใช้เครื่องเผาไหม้ฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน พบว่า อุณหภูมิการเผาไหม้ในโรเซออร์ของฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียนจะค่อนข้างคงที่ตลอดโรเซออร์อยู่ในช่วงประมาณ 800 – 1,000 องศาเซลเซียส ที่ปริมาณการป้อนอากาศรวมเท่ากัน (อากาศปฐมภูมিরวมกับอากาศทุติยภูมิ) อุณหภูมิในโรเซออร์จะสูงกว่าเมื่อมีการแบ่งอากาศไปป้อนในตำแหน่งอากาศทุติยภูมิมากกว่า ปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จะสูงมากบริเวณส่วนล่างของโรเซออร์ซึ่งมีการ devolatile ของเชื้อเพลิงและจะลดลงอย่างรวดเร็วบริเวณตำแหน่งที่มีการป้อนอากาศทุติยภูมิซึ่งจะช่วยให้การเผาไหม้สมบูรณ์ขึ้น ปริมาณแก๊สออกซิเจนจะลดลงตลอดความสูงโรเซออร์ ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะเพิ่มขึ้นตลอดความสูงโรเซออร์ ปริมาณแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะเพิ่มขึ้นตลอดความสูงโรเซออร์อยู่ในช่วงไม่เกิน 400 – 600 ส่วน

ในล้านส่วน ปริมาณแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ (ไนตริกออกไซด์และไนโตรเจนไดออกไซด์) คอนข้าง จะคงที่ตลอดไรเซอร์อยู่ในช่วงไม่เกิน 100 และ 10 ส่วนในล้านส่วน ตามลำดับ อุณหภูมิตลอดไร เซอร์มีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณแก๊สที่เพิ่มขึ้น แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์ ลดลงเมื่ออัตราส่วนของแก๊สที่ป้อนมีมากขึ้น

อันธิการ์ วรณะ (2548) ได้ทดลองเผาไหม้ถ่านหินผสมชีวมวล 3 ชนิด ได้แก่ ช้างข้าวโพด แก๊ส และ กากกาแฟ โดยใช้เครื่องเผาไหม้ฟลูอิดไธด์เบดแบบหมุนเวียน ในการทดลองจะใช้ชีวมวลทีละชนิดมาเผาไหม้ร่วมกับถ่านหิน โดยใช้เครื่องควบคุมอุณหภูมิแบบ P และ PI มาบังคับ อัตราการป้อนเชื้อเพลิงและอัตราการป้อนอากาศ ซึ่งจะควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ที่ 700 องศาเซลเซียส 800 องศาเซลเซียส และ 900 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่า อัตราส่วนของถ่านหินต่อชีวมวลที่สามารถป้อนชีวมวลได้มากที่สุดคือ 2ต่อ1 หากอัตราส่วนของชีวมวลมากกว่านี้จะทำให้เกิดการเผาไหม้ย้อนกลับเข้าทางถังบรรจุเชื้อเพลิง

คันสนีย์ กำรนาทรัพย์ (2548) ได้ศึกษารูปแบบการเคลื่อนที่ของของแข็งในเครื่องฟลูอิดไธด์เบดแบบหมุนเวียน โดยมีตัวแปรที่ใช้ศึกษา คือ ความเร็วอากาศ ตำแหน่งตามแนวรัศมีและตาม ความสูงของไรเซอร์และชีวมวลที่นำมาผสม โดยใช้ความเร็วของอากาศ 7 , 8 และ 9 เมตรต่อ วินาที ใช้เม็ดแก้วเป็นเบดและผสมแก๊สในสัดส่วนร้อยละ 20 จากการศึกษาเบดที่เป็นเม็ดแก้ว อย่างเดียว พบว่าที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 7 เมตรต่อวินาที มีปริมาณของแข็งสะสมอยู่ในไร เซอร์เป็นจำนวนมากตลอดช่วงความสูงของไรเซอร์ และที่ส่วนบนของไรเซอร์ใกล้กับทางออกของ ของแข็ง ค่าสัดส่วนช่องว่างมีค่าน้อยลง เป็นผลจากบริเวณทางออกของไรเซอร์ทำมุมกับทางเข้า ของไซโคลนแบบ 90 องศา จึงทำให้เม็ดแก้วที่เคลื่อนที่ขึ้นกระทบกับส่วนปลายของไรเซอร์ซึ่งเป็น ท่อตันแล้วตกกลับมาที่ส่วนล่างอีกครั้ง ที่ความเร็วอากาศ 8 และ 9 เมตรต่อวินาทีส่วนของเบด หนาแน่นทางด้านล่างของไรเซอร์ลดลง และสัดส่วนช่องว่างมีค่าใกล้เคียงกันตลอดความสูงของไร เซอร์ ประมาณ 0.99 และผลกระทบของทางออกต่อสัดส่วนช่องว่างจะมีน้อยมากเมื่อความเร็ว อากาศที่ใช้มากขึ้น เนื่องจากปริมาณของเม็ดแก้วในไรเซอร์มีน้อยลง ที่ความเร็วอากาศต่างๆ พบว่าเมื่อความเร็วอากาศเพิ่มขึ้น ร้อยละของเม็ดแก้วที่เคลื่อนที่ลงมีน้อยลง แต่ร้อยละของเม็ด แก้วที่เคลื่อนที่ขึ้นมีมากขึ้น โดยที่ความเร็วอากาศ 7 และ 8 เมตรต่อวินาที เกิดรูปแบบการเคลื่อนที่ ของเม็ดแก้ว เป็นแบบคอร์-แอนนูลัส คือของแข็งส่วนใหญ่ที่บริเวณกึ่งกลางคอลัมน์มีความเร็วสูง และเคลื่อนที่ขึ้น เรียกส่วนนี้ว่า คอร์ ในขณะที่บริเวณผนังของแข็งส่วนใหญ่เคลื่อนที่ลง เรียกส่วนนี้ ว่า แอนนูลัส และเมื่อศึกษาเบดผสม พบว่าที่บริเวณด้านบนบนสัดส่วนช่องว่างมีค่าใกล้เคียงกัน ประมาณ 0.99 ที่ทุกความเร็วอากาศและไม่มีผลกระทบจากลักษณะทางออกของไรเซอร์ อาจ เนื่องมาจาก ในระบบที่วัสดุเบดเป็นของผสมระหว่างเม็ดแก้วกับแก๊สมีอัตราการไหลป้อนกลับ

ของของแข็งน้อยกว่าเมื่อใช้วัสดุเบดเป็นเม็ดแก้วอย่างเดียว จึงทำให้ภายในโรเตอร์มีปริมาณของของแข็งน้อยลง และมีแกลบที่เบาเคลื่อนที่ได้ง่ายมาช่วยในการพาเม็ดแก้วออกไปจากรอเตอร์ได้ง่ายขึ้น และพบว่าความหนาแน่นของของแข็งมีผลต่อความเร็วของเบดน้อยมากเมื่อเทียบกับผลของขนาดของของแข็ง โดยความเร็วของเม็ดแก้วที่อยู่ในของผลระหว่างเม็ดแก้วกับแกลบน้อยกว่าความเร็วของระบบที่มีเม็ดแก้วเป็นวัสดุเบดเพียงอย่างเดียว โดยเฉพาะที่บริเวณส่วนล่างของโรเตอร์มีความแตกต่างของความเร็วของเม็ดแก้วค่อนข้างมาก

Jensen และ คณะ (1995) ได้ทำการทดลองเผาไหม้ถ่านหินโดยใช้เครื่องเผาไหม้ฟลูอิดไคซ์แบบอัดความดันสูง โดยได้ทดลองวิธีลดการปล่อยแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ 2 วิธี คือฉีดสารละลายแอมโมเนีย และการควบคุมปริมาณออกซิเจนหรือปริมาณอากาศ พบว่าการฉีดสารละลายแอมโมเนียเป็นล่องลอยทางด้านบนสุดของห้องเผาไหม้สามารถช่วยลดปริมาณแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ลงได้ 50 – 70 เปอร์เซ็นต์ และการลดปริมาณออกซิเจนที่การป้อนอากาศปฐมภูมิ (primary air) สามารถลดการปล่อยแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ลงได้ เช่นการทดลองขั้นตอนหนึ่ง ป้อนปริมาณอากาศต่อเชื้อเพลิง ประมาณ 0.82 โดยไม่มีการป้อนอากาศทุติยภูมิ (secondary air) พบว่ามีการปล่อย แก๊สไนโตรเจนออกไซด์ออกมาน้อยมากจนเกือบเป็นศูนย์

Hayhurst และ Lawrence (1996) ได้ทดลองเผาไหม้ถ่านหิน โดยใช้เครื่องเผาไหม้แบบฟลูอิดไคซ์เบด พบว่าแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้นมีแหล่งที่มา 2 แหล่งคือ แก๊สไนโตรเจนในอากาศและปริมาณไนโตรเจนในเชื้อเพลิง และประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ ของแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้น เกิดมาจากไนโตรเจนในเชื้อเพลิง เนื่องจากต้องใช้อุณหภูมิถึง 1700 องศาเซลเซียสเพื่อให้เกิดปฏิกิริยากับแก๊สไนโตรเจนในอากาศเปลี่ยนไปเป็นแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ ในขณะที่การเผาไหม้ในเครื่องเผาไหม้แบบฟลูอิดไคซ์เบดจะมีอุณหภูมิเพียง 1000 องศาเซลเซียส เท่านั้น และการใช้เชื้อเพลิงที่มีปริมาณไฮโดรคาร์บอนหรือคาร์บอนคงตัวสูงๆ หรือ การเติมสารละลายแอมโมเนียช่วยลดปริมาณแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ได้ และการศึกษาเกี่ยวกับแก๊สไนโตรสออกไซด์พบว่าแก๊สไนโตรสออกไซด์เกิดมาจากแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงหรือแอมโมเนีย แต่แก๊สไนโตรสออกไซด์สามารถแปรเปลี่ยนเป็นแก๊สไนโตรเจนหรือไนโตรเจนออกไซด์ได้ง่ายมาก ด้วยการใช้อุณหภูมิสูงๆและป้อนปริมาณออกซิเจนมากๆ ทำให้มีการปลดปล่อยแก๊สไนโตรสออกไซด์ออกมาเพียงเล็กน้อยเท่านั้น (น้อยกว่า 5 ส่วนในล้านส่วน)

Zhao และ คณะ (1997) ได้ทำการทดลองเผาไหม้ถ่านหินโดยใช้เครื่องเผาไหม้ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน พบว่า การที่มีปริมาณออกซิเจนมากเกินไปในการป้อนอากาศปฐมภูมิ จะทำให้ปริมาณแก๊สไนโตรเจนออกไซด์เพิ่มขึ้น ในขณะที่การป้อนปริมาณออกซิเจนน้อยกว่าปริมาณที่จำเป็นสำหรับการเผาไหม้สมบูรณ์ในการป้อนอากาศปฐมภูมิ จะทำให้ปริมาณการเกิดแก๊ส

ไนโตรเจนออกไซด์ลดลงได้มาก อีกทั้งถ่านชาร์ยังมีส่วนช่วยในการลดแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ลดลงได้ด้วย และหินปูนมีความสามารถในการลดปริมาณซัลเฟอร์ออกไซด์ลงได้

Liu และ Gibbs (2001) ได้ทดลองเผาไหม้ถ่านหินโดยใช้เครื่องเผาไหม้ฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน ซึ่งในการทดลองมีการเติมปูนขาวด้วย วัตถุประสงค์หลักคือเพื่อลดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ แต่ผลการทดลองพบว่าเมื่อผลกระทบต่อแก๊สไนโตรเจนออกไซด์และไนตรัสออกไซด์ด้วยคือ เมื่อเพิ่มปริมาณปูนขาวจะทำให้แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์และไนตรัสออกไซด์ลดลง ในขณะที่แก๊สไนโตรเจนออกไซด์จะเพิ่มขึ้น

Shen และ คณะ (2003) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการเผาไหม้ร่วมระหว่างถ่านหินและชีวมวลโดยใช้เครื่องเผาไหม้แบบฟลูอิโดซ์เบด โดยมีการศึกษาถึงผลของตัวเร่งปฏิกิริยา 4 ชนิด คือ CaO , CaSO_4 , Fe_2O_3 และ ถ่านชาร์ พบว่า CaO , Fe_2O_3 , หินปูน และ ถ่านชาร์ สามารถช่วยลดปริมาณแก๊สไนตรัสออกไซด์ได้ อีกทั้งการเผาไหม้ร่วมระหว่างถ่านหินและชีวมวลสามารถช่วยลดปริมาณแก๊สไนตรัสออกไซด์ได้อีกด้วย

Nimmo และ คณะ (2004) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการเผาไหม้ถ่านหินโดยมีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา แคลเซียมแมกนีเซียมอะซีเตต เพื่อศึกษาถึงผลกระทบต่อการปลดปล่อยแก๊สซัลเฟอร์ออกไซด์ พบว่าเมื่อปริมาณ Ca/S เท่ากับ 2.5 สามารถลดปริมาณแก๊สซัลเฟอร์ออกไซด์ได้ถึง 70-80 เปอร์เซ็นต์ และมีแนวโน้มจะลดได้มากขึ้นหากเพิ่มปริมาณ Ca/S และเมื่อปรับเปลี่ยนค่าปริมาณการป้อนอากาศปฐมภูมิกับการปล่อยแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ พบว่า ที่การป้อนอากาศปฐมภูมิ 105, 115 และ 140 เปอร์เซ็นต์ของการเผาไหม้สมบูรณ์ ปริมาณการปล่อยแก๊สไนโตรเจนออกไซด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามลำดับ

Akira และ คณะ (2002) ศึกษาการเผาไหม้ของกากของเสีย 4 ชนิดที่มีคุณสมบัติต่างกันภายในเตาเผาฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน พบว่าสามารถเผาไหม้กากของเสียเหล่านั้นได้โดยการปรับระดับการเกิดการฟลูอิโดซ์ภายในโรเตอร์ และการเผาไหม้ด้วยระบบนี้ (CFB) ยังเป็นการลดปริมาณ NO_x และ N_2O ได้โดยการใช้วิธีการแบ่งการป้อนอากาศเป็นชั้น ๆ เพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า และปริมาณของ SO_x ยังสามารถกำจัดได้ทันทีในระหว่างการเผาไหม้โดยการป้อนหินปูน (lime stone) เข้าไป รวมทั้งยังเป็นการลดปริมาณของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่จะเกิดขึ้นเนื่องจากการเผาไหม้ที่ค่อนข้างสมบูรณ์ และยังไม่มีการอันตรายที่ปล่อยออกมาเท่ากับถ่านหิน การเผาไหม้ด้วยเตาเผาไหม้ฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียนนี้สามารถเผาไหม้ได้ทั้งถ่านหินที่มีปริมาณ fixed carbon สูงและกากของเสียซึ่งมีปริมาณความชื้นสูง ดังนั้นอาจจะมีการนำไปประยุกต์ใช้กับเชื้อเพลิงแข็งชนิดอื่นที่มีคุณสมบัติต่างออกไปหรือจะเป็นการเผาไหม้ร่วมกันของเชื้อเพลิงหลายชนิด

Amand และ Leckner (2001) ได้ศึกษาการลดปริมาณของ NO_x , N_2O ที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมระหว่างถ่านหิน ไม้ และกากของเสีย เนื่องจากกากของเสียนั้นมีองค์ประกอบของไนโตรเจนในปริมาณสูง สามารถปล่อย NO_x ออกมาได้ปริมาณสูง จึงศึกษาถึงความแตกต่างระหว่างถ่านหินหรือไม้ที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงหลักโดยมีกากของเสียเป็นเชื้อเพลิงผสม อีกทั้งยังศึกษาของผลของกากของเสียแห้งกับกากของเสียเปียกต่อการปล่อย NO_x และ N_2O จึงได้ประยุกต์ใช้วิธี advanced air staging method มาใช้กับเตาเผาฟลูอิดไคด์แบบหมุนเวียน (CFB) พบว่าทั้งถ่านหินและไม้นั้นปล่อย NO_x ออกมาในปริมาณน้อยแต่กากของเสียแห้งกับกากของเสียเปียกนั้นยังไม่สามารถที่จะหาข้อสรุปที่ชัดเจนได้ วิธีนี้ใช้ได้ดีในกรณีที่กากของเสียที่นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงผสมกับเชื้อเพลิงหลักมีสัดส่วนที่ไม่สูงเกินไป (ไม่เกินร้อยละ 25) และวิธีนี้ไม่เหมาะสมที่จะใช้กับเชื้อเพลิงที่มีปริมาณสารระเหย (volatile) สูง

Werther และ คณะ (2000) ศึกษาวิธีการลดปริมาณของ emission ที่เกิดขึ้นระหว่างการเผาในเตาเผาฟลูอิดไคด์แบบหมุนเวียน โดยเป็นการเผาไหม้ของกากของเสียผสมกับถ่านหินหรือไม้ โดยดูถึงอิทธิพลของลักษณะของการป้อนอากาศเข้าไปยังเตาเผาไหม้ โดยวิธีการป้อนอากาศดังกล่าวคือการแบ่งอากาศเป็น 2 ส่วนคือ primary air และ secondary air โดยให้ primary air เข้าสู่เตาเผาไหม้ทางด้านล่างของเตา (bottom) ส่วน secondary air จะให้เข้าตรงทางด้านขวาออกจาก ไชโคลน เพื่อให้เกิดการเผาไหม้ครั้งที่อุณหภูมิต่ำกว่าพบว่าวิธีนี้ทำให้ปริมาณ NO_x และ N_2O ลดลงอย่างได้ผล แต่อย่างไรก็ตามวิธีนี้ยังมีประสิทธิภาพไม่มากนักเมื่อใช้กับเชื้อเพลิงที่มีปริมาณสารระเหยสูง ส่วน แก๊ส SO_2 นั้นมีกรรมวิธีอื่นที่เหมาะสมได้ผลดีกว่านั้นคือการเติมหินปูน (lime stone)

Liu และ Gibbs (1998) ศึกษาผลของการเติมหินปูน ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ในท่อโรเซอร์คือ ส่วนล่างของท่อโรเซอร์ และอีกตำแหน่งคือ ส่วนบนซึ่งอยู่เหนือตำแหน่งของการป้อนอากาศทุติยภูมิ ที่มีผลต่อองค์ประกอบของฟลูแก๊สได้แก่ แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ไนโตรสออกไซด์ ไนโตรเจนออกไซด์ และ คาร์บอนมอนอกไซด์ ที่เกิดจากการเผาถ่านหินในเตาฟลูอิดไคด์แบบหมุนเวียนพบว่าหินปูนซึ่งเติมลงไปเพื่อกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ทำให้แก๊สไนโตรสออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลงแต่ทำให้แก๊สไนโตรเจนออกไซด์เพิ่มขึ้นทั้งตำแหน่งบนและตำแหน่งล่าง โดยตำแหน่งการเติมหินปูนทั้งสองตำแหน่งไม่มีผลต่อการลดลงของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ แต่ส่งผลต่อแก๊สอื่นๆ คือเมื่อเติมหินปูนที่ตำแหน่งบนพบว่าสามารถลดแก๊สไนโตรสออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์ได้มากกว่าการเติมที่ตำแหน่งล่าง และทำให้เกิดแก๊สไนโตรเจนออกไซด์เพิ่มขึ้นกว่าตำแหน่งล่างเช่นกัน ทำให้ไม่สามารถสรุปได้ว่าตำแหน่งในการเติมหินปูนในเตาฟลูอิดไคด์

เบดแบบหมุนเวียน สามารถช่วยลดแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ได้เนื่องจากปริมาณที่ลดได้น้อยมาก (น้อยกว่าร้อยละ 20) รวมทั้งการทำให้เกิดแก๊สไนโตรเจนออกไซด์เพิ่มขึ้น

Leckner และ คณะ (2004) ศึกษาการปล่อยแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้ร่วมของกากของเสียกับเชื้อเพลิงหลักคือถ่านหินหรือไม้ในเตาฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน 2 เตาคือ CTH (Charmer Technical University) กับ TUHH (Technical University Hamburg-Hamburg) โดยตัวแปรที่ศึกษาคือผลการเติมอากาศ และการเผาไหม้ร่วมเปรียบเทียบกับ การเผาไหม้เชื้อเพลิงหลักอย่างเดียว พบว่าการปล่อยแก๊สทั้งการเผาไหม้เชื้อเพลิงหลักและการเผาไหม้ร่วมซึ่งสัดส่วนของการผสมคิดเป็นพลังงานน้อยกว่าร้อยละ 25 ยังต่ำกว่าค่ามาตรฐานของทั้งยุโรปและเยอรมนี ยกเว้นคลอรีน ซึ่งสามารถลดได้ด้วยกระบวนการอื่น อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่ากากของเสียจะมีปริมาณไนโตรเจนและซัลเฟอร์สูง แต่ด้วยข้อดีของการเผาไหม้ด้วยเตาฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน ซึ่งมีประสิทธิภาพในการลดไนโตรเจนออกไซด์ รวมทั้งการที่สามารถเติมหินปูนลงไประหว่างที่มีการเผาไหม้ ทำให้ทั้งแก๊สไนโตรเจนออกไซด์และแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์เกิดขึ้นน้อย ส่วนผลของการเติมอากาศเป็นชั้น (air staging) พบว่าสามารถลดแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพสำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีสารระเหยน้อย ยังมีสารระเหยมกประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ก็ยังคงลดลง

Topal และ คณะ (2003) ศึกษาประสิทธิภาพการเผาไหม้เยื่อมะกอก (olive cake) เปรียบเทียบกับการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์ในฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียนโดยมีสัดส่วนอากาศอากาศเกินพอเป็นตัวแปรตั้งแต่ 1.1 – 2.16 ที่มีผลต่ออุณหภูมิและองค์ประกอบของฟลูแก๊ส พบว่าการเผาไหม้เยื่อมะกอกจะเกิดการเผาไหม้บริเวณส่วนบนของท่อไรซ์เซอร์อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส มีประสิทธิภาพการเผาไหม้ถึงร้อยละ 94 – 98.95 และเมื่อมีอากาศเกินพอน้อยๆ พบว่าการเผาไหม้เยื่อมะกอกจะมีประสิทธิภาพการเผาไหม้ลดลงและจะเกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์รวมทั้งส่วนที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์มากกว่าการเผาไหม้ถ่านหิน และเมื่อเพิ่มอากาศเกินพอทำให้แก๊สต่าง ๆ มีปริมาณลดลง โดยอากาศเกินพอที่เหมาะสมที่สุดคือร้อยละ 36

Fang และ คณะ (2004) ศึกษาการนำแกลบมาเผาไหม้ในเตาฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียนจากการทดลองใช้แกลบในระบบ cold model ของฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียนพบว่าการทำให้แกลบเกิดการฟลูอิดไคซ์ทำได้ยากแต่สามารถแก้ไขได้โดยการใช้ทรายและถ่านหินเป็นตัวช่วยให้เกิดการฟลูอิดไคซ์ ดังนั้นในการเผาไหม้จริงสำหรับการทดลองนี้จึงศึกษาผลของขนาดทราย ความเร็วของอากาศ โดยขนาดของทรายที่เหมาะสมที่ทำให้การผสมได้ดีอยู่ในช่วง 0.3 – 0.8 มิลลิเมตร (เฉลี่ย 0.55 มม.) ความเร็วของอากาศ 0.8 – 2 เมตรต่อวินาที อัตราการป้อนแกลบ 20-40 กก./ชม. พบว่าอุณหภูมิในการเผาไหม้ 750-850 องศาเซลเซียส โดยเริ่มเผาไหม้ที่อุณหภูมิ 340 องศา

เซลเซียส (ignition temperature) เนื่องจากแกลบบมีสารระเหยง่ายอยู่มาก ดังนั้นการเผาไหม้ส่วนใหญ่มักจะเกิดในบริเวณ Freeboard และการแบ่งอากาศเป็นสองส่วนจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ โดยความเร็วอากาศที่เหมาะสม 1.2 เมตรต่อวินาทีโดยแบ่งเป็นร้อยละ 70 สำหรับอากาศปฐมภูมิและร้อยละ 30 สำหรับอากาศทุติยภูมิ

งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาถึงตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่ออุณหภูมิในห้องเผาไหม้ และองค์ประกอบของฟลูแก๊สที่ถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศ ตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ ชนิดและอัตราส่วนผสมของเชื้อเพลิง โดยมีเชื้อเพลิง 2 ชนิด คือ ถ่านหินและแกลบ ปริมาณอากาศรวม โดยป้อนอากาศปฐมภูมิมุมที่ 200 ลิตรต่อวินาที ซึ่งเป็นปริมาณอากาศที่เพียงพอต่อการทำให้ทรายเกิดการฟลูอิไดซ์และหมุนเวียน แต่ไม่เพียงพอต่อการเผาไหม้สมบูรณ์ของเชื้อเพลิง แล้วศึกษาผลของปริมาณอากาศทุติยภูมิและตำแหน่งที่ป้อนอากาศทุติยภูมิ พร้อมทั้งศึกษาผลของหอดูดซับด้วยน้ำด้วย