

บทที่ 2 วารสารปริทัศน์

2.1 ถ่านหิน

ถ่านหินเกิดจากการทับถมตัวของซากพืช โดยผ่านกระบวนการสูญเสียออกซิเจน (Deoxygenation) และกระบวนการเกิดถ่านหิน (Coalification) ภายใต้อุณหภูมิและความดันสูงเป็นเวลานานหลายสิบล้านปี ถ่านหินแต่ละชนิดจึงมีส่วนประกอบแตกต่างกันไปทั้งกายภาพและทางเคมี ในทางธรณีวิทยาถือว่าถ่านหินเป็นหินตะกอน (Sedimentary rocks) ชนิดหนึ่งซึ่งประกอบด้วยสารอินทรีย์เป็นส่วนใหญ่ และมีสารอนินทรีย์ปะปนอยู่บ้างเล็กน้อย ถ่านหินมีโครงสร้างเป็นโมเลกุลคล้ายพอลิเมอร์ (Polymer-like molecule) ประกอบด้วยธาตุหลักคือ คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน(H) ออกซิเจน(O) และธาตุเจือปนเช่น กำมะถัน(S) ไนโตรเจน(N) ซิลิคอน(Si) แคลเซียม(Ca) ฯลฯ

กระบวนการเกิดถ่านหินเริ่มจากการเน่าเปื่อยผุพังของซากพืชกลายเป็นถ่านพีต (Peat) ซึ่งมีอายุประมาณ 20 ล้านปี ต่อมาเป็นถ่านหินอ่อน (Soft coal) ได้แก่ถ่านหินสีน้ำตาล (Brown coal) และถ่านลิกไนต์ (Lignite) แล้วแปรสภาพเป็นถ่านหินแข็ง (Hard coal) ได้แก่หินกลุ่มบิทูมินัส (Bituminous coals) และแอนทราไซต์ (Anthracitic coals) ซึ่งมีอายุประมาณ 250 ล้านปี

2.1.1 การจำแนกถ่านหิน จะแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ ชนิดและ ศักดิ์ของถ่านหิน

2.1.1.1 ชนิด (Type) โดยอาศัยการศึกษาาระบบไมโครสโคปิก (Microscopic) ของถ่านหินว่ามีอะไรเป็นพื้นฐาน ในการศึกษาสามารถจำแนกย่อยได้อีก 3 แบบ คือ

- วิทริไนต์ (Vitritinite) เกิดจากการเน่าเปื่อยผุพังของพวกเปลือกไม้ เนื้อเยื่อของไม้ เป็นพื้นฐาน

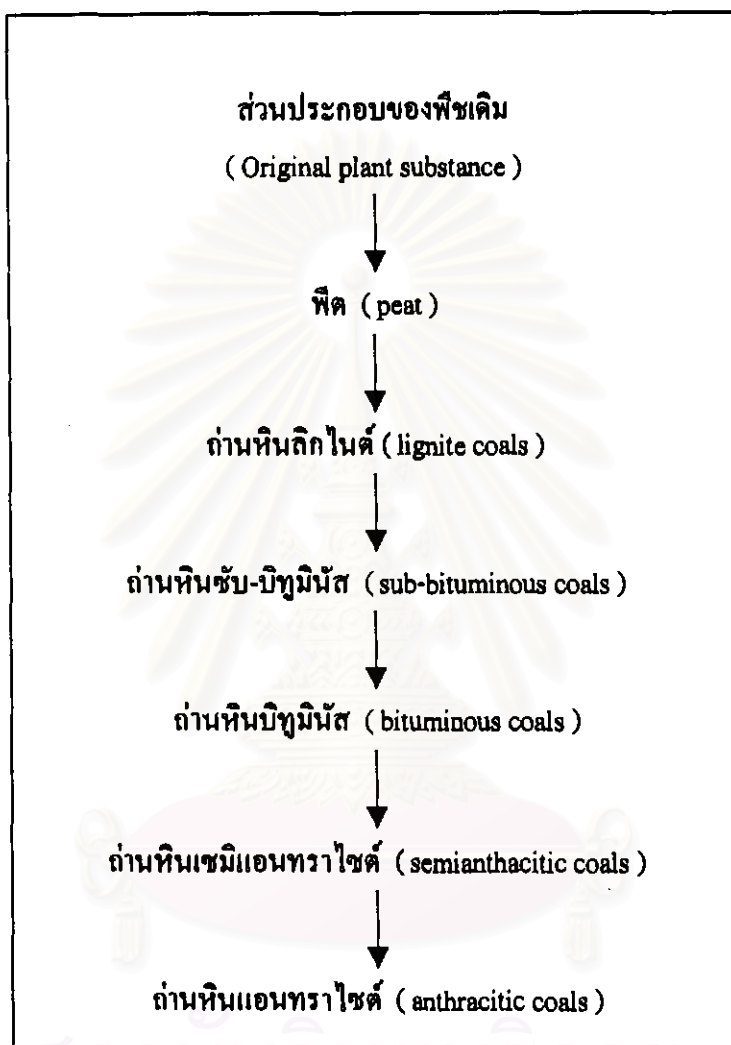
- เอ็กซิไนต์ (Exinite) เกิดจากการเน่าเปื่อยผุพังของสาหร่าย และพืชชั้นต่ำ

- อินเนอทิไนต์ (Inertinite) ซึ่งไม่สามารถจำแนกได้ว่าเกิดจากอะไรเป็นองค์ประกอบพื้นฐาน

2.1.1.2 ศักดิ์ (Rank) เป็นสมบัติที่สำคัญของถ่านหินซึ่งแสดงถึงความเป็นอิสระของการเปลี่ยนแปลงเป็นถ่านหิน (Coalification) ถ่านหินที่มีศักดิ์ต่ำสุดคือ ลิกไนต์ ตามด้วยชั้นบิทูมินัส บิทูมินัสและแอนทราไซต์ ถ่านหินที่มีศักดิ์ต่ำจะใช้เวลาในการเกิดน้อย มีปริมาณ

คาร์บอนต่ำและปริมาณออกซิเจนสูงเมื่อเทียบกับถ่านหินที่มีศักดิ์สูงกว่า ถ่านหินที่มีศักดิ์สูงกว่าจะ
ให้ค่าความร้อนสูงกว่าถ่านหินที่มีศักดิ์ต่ำ

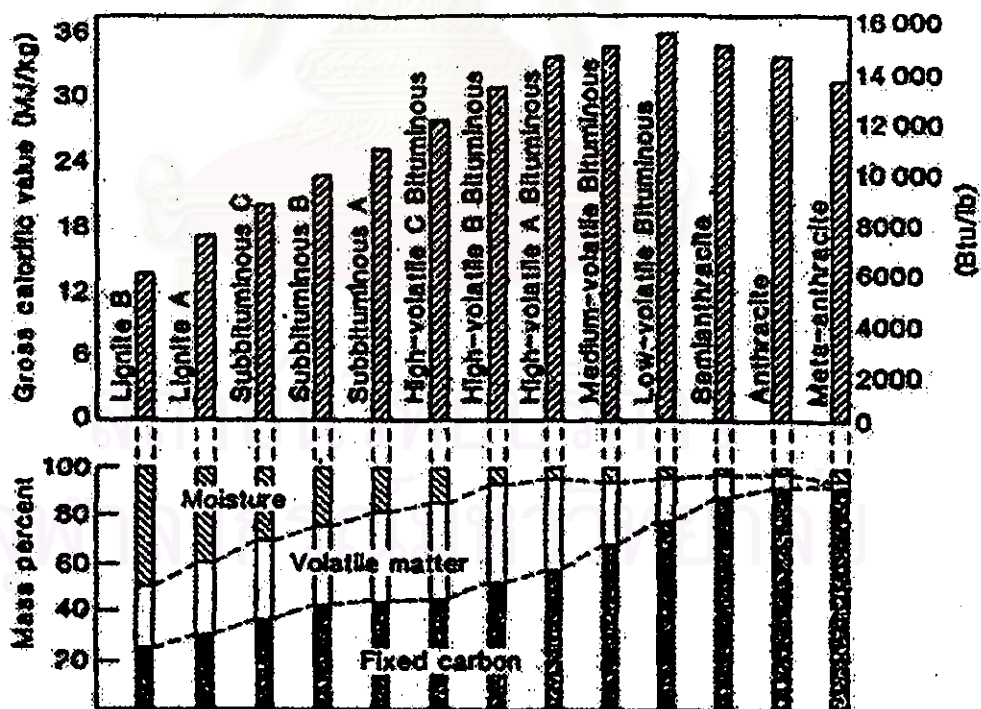
ตารางที่ 2.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงการเกิดถ่านหิน⁽¹⁾



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.2 แสดงการจำแนกการเกิดถ่านหินโดยพื้นฐานต่างๆ⁽²⁾

Maceral Group	Maceral	Composed of or Derived from
Vitrinite	Collinite	Humic gels
	Tellinite	Wood, bark, and cortical tissue
Exinite	Sporinite	Fungal and other spores
	Cutinite	Leaf cuticles
	Resinite	Resin bodies and Waxes
	Alginite	Algal remains
Inertinite	Micrinite	Unspecified detrital matter, 10 μ m
	Macrinite	Similar, but 10-100 μ m grains
	Semifusinite Fusinite	"Carbonized" woody tissue
	Sclerotinite	Fungal sclerotia and mycelia



รูปที่ 2.1 แสดงค่าความร้อนของถ่านหินและการวิเคราะห์แบบประมาณ⁽²⁾

2.1.2 องค์ประกอบของถ่านหิน องค์ประกอบสำคัญของถ่านหินได้แก่ ความชื้น เถ้า สารระเหย และคาร์บอนคงตัว ซึ่งองค์ประกอบดังกล่าวได้จากการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis)

- ความชื้น (Moisture) เป็นน้ำหนักที่สูญหายไป หลังจากการอบถ่านหินละเอียดที่อุณหภูมิ 105-110 องศาเซลเซียส ภายใต้ภาวะที่กำหนดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง น้ำที่เป็นความชื้นจะระเหยออกมา พบว่าถ่านหินที่มีอายุน้อยจะมีความชื้นอยู่มาก เมื่ออายุมากขึ้นแรงดันต่างๆบนผิวโลกที่กดทับลงบนแนวถ่านหินทำให้ความชื้นลดลง ความชื้นในถ่านหินมี 2 รูปแบบ คือ

ก. ความชื้นที่ติดแน่นอยู่ในเนื้อถ่านหิน (Inherent moisture) เกิดจากสมบัติของถ่านหิน การดูดความชื้นเข้าไปในเนื้อถ่านหินเป็นปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับอายุของถ่านหิน อุณหภูมิ และความชื้น ณ แหล่งกำเนิด

ข. ความชื้นอิสระ (Free or accidental moisture) เป็นความชื้นที่ถ่านหินดูดไว้ที่ผิว ซึ่งจะสูญหายไปเมื่อทิ้งไว้ในอากาศ

- เถ้า (Ash) เป็นน้ำหนักที่คงเหลืออยู่หลังการเผาถ่านหินบดละเอียดที่อุณหภูมิ 725 องศาเซลเซียส จนกระทั่งเหลืออยู่แต่สารอนินทรีย์ที่ถูกออกซิไดซ์สมบูรณ์แล้ว สารอนินทรีย์ในถ่าน แบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

ก. สารอนินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบของสิ่งมีชีวิตกลายเป็นถ่านหิน ได้แก่ธาตุที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืชถูกทับถมพร้อมกับซากอินทรีย์ และปรากฏเป็นองค์ประกอบในถ่านหินด้วย เช่น ออกไซด์ของโพแทสเซียม โซเดียม แมกนีเซียม แคลเซียม และซิลิกอน เป็นต้น

ข. สารอนินทรีย์ที่ถูกทับถมลงบนแนวของถ่านหินขณะที่กำลังเกิดการสะสมตัว ได้แก่ ยิปซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ไพไรต์ (FeS_2) หินปูนแอนคิไรต์ (Ankerites) หินเชลล์ และดิน เป็นต้น

โดยทั่วไปพบว่า สารอนินทรีย์มากกว่า 95 % ประกอบด้วยแร่ 3 ชนิดคือ คาโอลินไนต์ (Kaolinite) แคลไซต์ (Calcite) และไพไรต์ (Pyrite) ในถ่านหินมากกว่า 95 % ประกอบด้วย SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 และ CaO ที่เหลืออีก 5 % เป็น MgO , Na_2O , K_2O และ TiO_2

สารประกอบอินทรีย์จะเริ่มเปลี่ยนแปลงเมื่อถูกเผาที่อุณหภูมิต่างๆ และเกิดปฏิกิริยาเคมีได้สารประกอบเชิงซ้อนใหม่ ซึ่งมีปริมาณออกซิเจนน้อยกว่าสารเริ่มต้น เพราะถูกใช้ไปโดยรีดิวซิ่งแก๊ส (Reducing gas) Fe_3O_4 และ FeS_2 ที่พบในถ่านหินมักถูกรีดิวซ์เป็น Fe_2O_3 หรือ FeS ซึ่งทำให้อุณหภูมิในการหลอมเหลวต่ำลงเช่นเดียวกับ Na_2O , K_2O และ MgO สำหรับ SiO_2 และ Al_2O_3 ทำให้อุณหภูมิในการหลอมเหลวสูงขึ้นนอกจากนี้เหล็กที่อยู่ในรูปไพไรต์ (FeS_2) เมื่อได้รับความร้อนจะรวมตัวกับออกซิเจนเกิดเป็นเหล็กออกไซด์ และ SO_2 หรือ SO_3

- สารระเหย (Volatile matter) เป็นน้ำหนักที่สูญหายไป (หักความชื้นออกแล้ว) หลังจากเผาถ่านหินบดละเอียด ในช่วงเวลาและอุณหภูมิที่กำหนด โดยไม่ให้สัมผัสกับอากาศ เพื่อกลิ่น

สลายสารที่ระเหยในเนื้อถ่านหินออกมา สารระเหยได้ประกอบด้วยน้ำมันหาร์ท น้ำมันเบา (Lighter oils) ไฮโดรคาร์บอน แก๊สไฮโดรเจน ออกไซด์ของคาร์บอน และน้ำจากการแตกตัวของโมเลกุลที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ (Hydrates) ซึ่งไม่ใช่ความชื้นอิสระ

สารระเหยนี้มีความสำคัญมากในการวิเคราะห์ถ่านหิน เพราะส่วนประกอบของสารระเหยได้แตกต่างกันตามศักดิ์ของถ่านหิน โดยลดลงเมื่อถ่านหินมีศักดิ์สูงขึ้น

- คาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) เป็นของแข็งที่เป็นคาร์บอนส่วนใหญ่ที่เหลืออยู่ในถ่านหินประมาณได้จากร้อยละที่เหลือจากการวิเคราะห์แบบประมาณ เมื่อหักค่าความชื้น สารระเหย และเถ้า ถ่านหินที่มีศักดิ์สูงจะมีคาร์บอนคงตัวสูงด้วย เนื่องจากปริมาณความชื้นและสารระเหยต่ำ

2.2 ทฤษฎีการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง

แก๊สฟิเคชัน หมายถึง กระบวนการแปรสภาพเชื้อเพลิงที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างเชื้อเพลิงแข็ง เช่น ถ่านหิน ถ่านไม้ เป็นต้น กับ อากาศ แก๊สออกซิเจน ไอน้ำ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ หรือส่วนผสมของตัวทำปฏิกิริยาเหล่านี้ ให้อยู่ในรูปเชื้อเพลิงที่เป็นแก๊ส ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากกระบวนการเหมาะที่จะนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงาน หรือ เป็นวัตถุดิบเพื่อผลิตสารเคมี เชื้อเพลิงเหลว และเชื้อเพลิงแก๊สชนิดอื่นๆ ต่อไป

การแก๊สฟิเคชันถ่านหิน เป็นการเปลี่ยนองค์ประกอบอินทรีย์ของถ่านหินให้เป็นแก๊สเชื้อเพลิงโดยการทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วนของถ่านหินกับอากาศ(ออกซิเจน) ไอน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน หรือแก๊สผสมดังกล่าว ผลิตภัณฑ์ของการแก๊สฟิเคชันส่วนใหญ่ประกอบด้วยแก๊สไฮโดรเจน (H_2) แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) แก๊สมีเทน (CH_4) และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ (C_nH_n) ไนโตรเจน (N_2) ออกซิเจน (O_2) นอกจากนี้ยังมีสารปนเปื้อนอีกเล็กน้อย ได้แก่ น้ำมันหาร์ท ไฮโดรเจนซัลไฟด์ แอมโมเนีย เป็นต้น กระบวนการดังกล่าวเป็นการเปลี่ยนแปลงทางเทอร์โมเคมีคอล (Thermochemical conversion process) ได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วนของคาร์บอนกับออกซิเจนหรือไอน้ำ ที่อุณหภูมิสูงๆ ความดันตั้งแต่ 1 บรรยากาศขึ้นไป ปฏิกิริยาเกิดขึ้นหลายขั้นตอนมีทั้งปฏิกิริยาดูดความร้อนและคายความร้อน แก๊สเชื้อเพลิงประกอบด้วยแก๊สผสมของ CO และ H_2 เรียกว่า " โพรดิวเซอร์แก๊ส" (Producer gas)

โพรดิวเซอร์แก๊สเกิดจากปฏิกิริยาเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (Incomplete combustion) ของคาร์บอนไปเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ และปฏิกิริยารีดักชันของคาร์บอนไดออกไซด์หรือไอน้ำไปเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรเจน

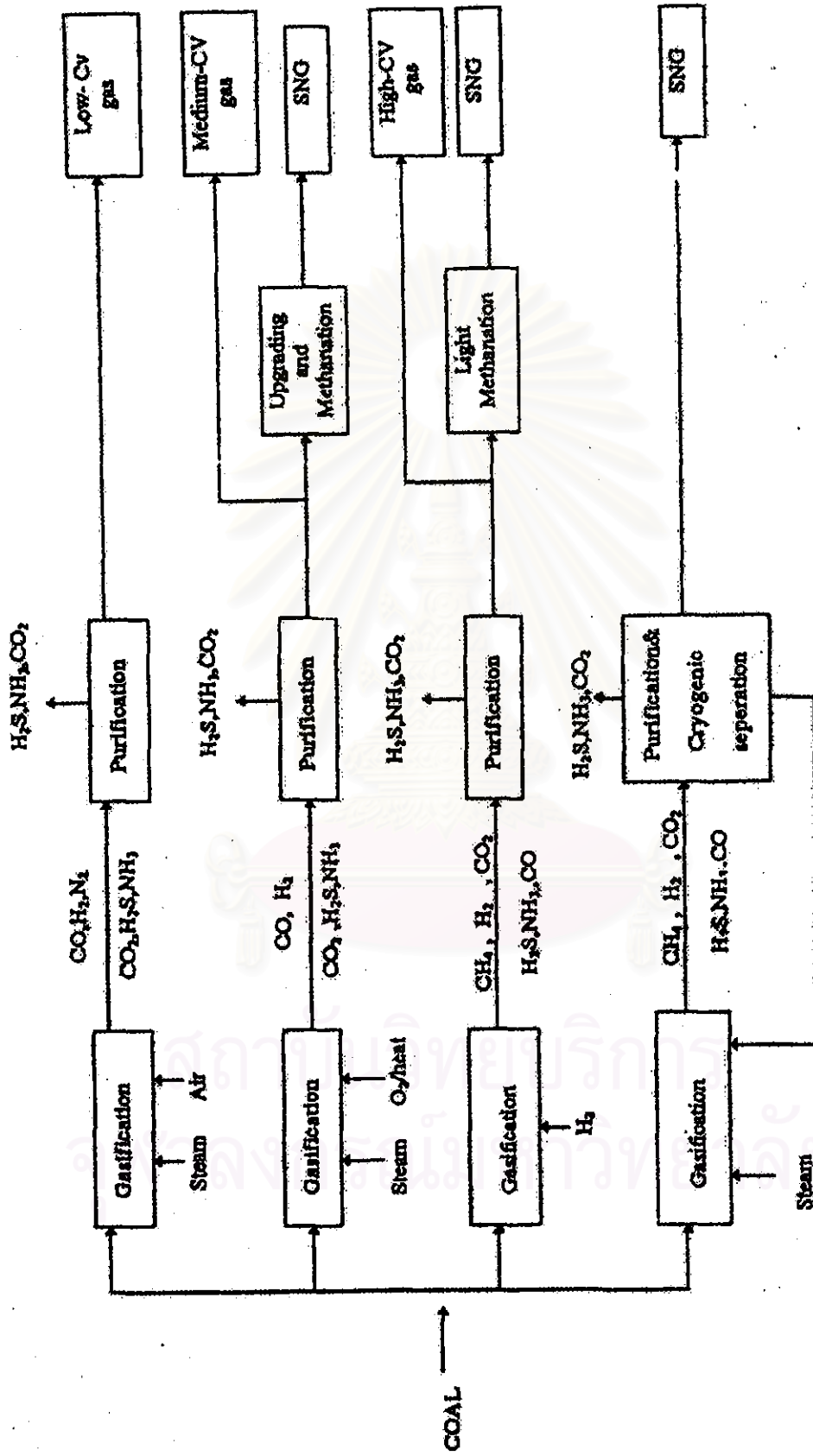
ขั้นตอนสำคัญของการแกสซิฟเคชันได้แก่การไพโรไลซ์ถ่านหินตามด้วยการแกสไฟถ่านชาร์ และน้ำมันชาร์ โดยทั่วไปอุณหภูมิของการแกสซิฟเคชันอยู่ที่ประมาณ 700-1000 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดันบรรยากาศจนมากถึงกว่า 6,900 กิโลปาสคาล ระหว่างการแกสซิฟเคชันเกิดปฏิกิริยาหลายอย่างพร้อมกัน และต่อเนื่องกันซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเชื้อเพลิงแข็งไปเป็นแก๊สเชื้อเพลิง

2.2.1 การไพโรไลซิส

การไพโรไลซิสเป็นขั้นตอนแรกที่เกิดในการแกสซิฟเคชัน เมื่อถ่านหินได้รับความร้อนในที่อับอากาศหรือออกซิเจน จะเกิดการกลั่นและการสลายตัวเป็นแก๊ส น้ำมันชาร์และถ่านชาร์ ช่วงแรกแก๊สและไอน้ำถูกปล่อยออกมาก่อนที่จะอุณหภูมิประมาณ 200 องศาเซลเซียส แต่การสลายตัวจริงๆ นั้นเกิดตั้งแต่ 300 องศาเซลเซียสขึ้นไป การปลดปล่อยของสารระเหยเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ และคงที่ที่อุณหภูมิประมาณ 700 องศาเซลเซียสขึ้นไป

การเปลี่ยนแปลงทางเคมีทั้งหมดของถ่านหินเกิดขึ้นเมื่อถ่านหินได้รับความร้อน สารประกอบที่มีจุดเดือดต่ำเกิดการระเหยตัว และกลั่นตัวออกมาโดยไม่เกิดการแตกตัวของพันธะทางเคมีแต่โมเลกุลที่มีน้ำหนักสูงและโมเลกุลที่มีพันธะเชื่อมขวาง (Cross-linked) เกิดการแตกตัวของ C-O, C-S และ C-C พร้อมทั้งเกิดสารผลิตภัณฑ์ระหว่างปฏิกิริยา (Intermediate) สารผลิตภัณฑ์ระหว่างปฏิกิริยาที่เกิดจากการสลายตัวครั้งแรกจะตั้งไฮโดรเจนจากสารระหว่างปฏิกิริยาอื่นแล้ว กลั่นตัวและเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันเกิดเป็นถ่านโค้ก ถ่านหินส่วนที่เหลือที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยา กลายเป็นถ่านชาร์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสลายตัวในขั้นแรกเกิดการสลายตัวต่อไปอีกที่อุณหภูมิสูง

รูปที่ 2.2 แสดงถึงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นและผลิตภัณฑ์เมื่อถ่านหินถูกไพโรไลซ์ ในบรรยากาศเฉื่อยที่ความดันบรรยากาศ ทารซึ่งเป็นของเหลวเกิดในระหว่างไพโรไลซ์จะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิง (Hydrocracking) และถูกแกสไฟต่อเกิดเป็น มีเทน ไฮโดรเจน และคาร์บอนมอนอกไซด์ ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวก่อตัวจากโมเลกุลของถ่านหินที่เกิดจากการสลายตัวจากความร้อนเกิดออกไซด์ของคาร์บอนจากการสลายตัวของ Carboxyl, Carbonyl และ Etheral group แก๊สไฮโดรคาร์บอนก่อตัวจากกลุ่มอัลคิลและปฏิกิริยาอัลคิลเลชัน (Alkylation) ไฮโดรเจนเกิดจากดีไฮโดรจีเนชัน (Dehydrogenation) ของวงแหวนแนฟทีนิก (Naphthenic ring) และการสลายตัวของโครงสร้างอะโรมาติก นอกจากนั้นยังพบว่า มีเทนส่วนใหญ่เกิดในช่วงนี้ โดยการทำปฏิกิริยาระหว่างแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจากการไพโรไลซิสกับเคมีชาร์



รูปที่ 2.2 แผนภาพแสดงกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากถ่านหิน^๑

ตารางที่ 2.3 แสดงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในระหว่างไพโรไลซ์ถ่านหิน⁽²⁾

Product	Source	Reaction
Tar+Liquid	Weakly bounded ring clusters	Distillation and pyrolysis
CO ₂	Carboxyl groups	Decarboxylation
CO(<500°C)	Carbonyl groups and ether linkaged	Decarbonylation
CO(>500°C)	Heterro-oxygens	Ring rupture
H ₂ O	Hydroxyl groups	Dehydroxylation
CH ₄ +C ₂ H ₄	Alkyl groups	Dealkylation
H ₂	Aromatic C-C bonds naphthenic ring	Ringrupture and Dehydrogenation

2.2.2 การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากถ่านชาร์

ถ่านชาร์ที่เกิดขึ้นภายหลังจากไพโรไลซ์มีความว่องไวต่ำกว่าถ่านหินมาก ในขั้นนี้จึงต้องอาศัยเวลาทำปฏิกิริยามากขึ้น และปฏิกิริยาเกิดที่อุณหภูมิสูงกว่าขั้นแรกคือ 600 องศาเซลเซียสขึ้นไป เกิดทั้งปฏิกิริยาแกสซิฟิเคชันและไฮโดรแกสซิฟิเคชัน ได้มีเทน คาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน นอกจากนี้ถ่านชาร์ยังเกิดการเผาไหม้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนปฏิกิริยาชิฟต์ (Shift Reaction) เกิดในทุกภาวะการแกสซิฟาย

สำหรับสารอินทรีย์ในถ่านหินเกิดการสลายตัวและเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เกิดเป็นแก๊สซัลเฟอร์ ไนโตรเจน และออกซิเจนในถ่านหินถูกเปลี่ยนเป็นไฮโดรเจนซัลไฟด์ แอมโมเนียม และสารประกอบอินทรีย์ที่ประกอบด้วยซัลเฟอร์ ไนโตรเจน และไอน้ำ

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทั้งหมดเกิดขึ้นอย่างสลับซับซ้อน บางปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาที่พื้นผิวโดยแก๊สบางตัวเข้าทำปฏิกิริยากับอนุภาคคาร์บอนบนผิวของถ่านหิน หรือแก๊สบางตัวอาจถูกดูด (Adsorption) อยู่บนผิวของผงถ่านและทำปฏิกิริยากัน เมื่อได้ผลผลิตก็คายตัวออกจากผิวของผงถ่านหรือบางปฏิกิริยาเกิดในสภาพแก๊สโดยตรง (Gasphase Reaction)

2.2.3 ระบบการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง

2.2.3.1. แก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำ (low-heating value gas or low Btu gas) ค่าความร้อนประมาณ 3.3-10 MJ/m³ ค่าความร้อนนี้ได้จากแกสซิฟายถ่านหินโดยใช้อากาศเนื่องจากในอากาศประกอบด้วยออกซิเจน และไนโตรเจน แก๊สที่ได้จากการเผาไหม้จึงถูกเจือด้วย

ไนโตรเจน ทำให้ค่าความร้อนต่ำ เพื่อไม่ให้แก๊สที่ได้มีความร้อนต่ำมากนักอาจแก้ไขโดยการให้ความร้อน แก่อากาศก่อนเข้าไปในระบบ นอกจากนี้ในอากาศยังมีความชื้นปนอยู่ด้วย ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นคือ



องค์ประกอบที่สามารถเผาไหม้ได้ (Combustible components) ของแก๊สผลิตภัณฑ์คือคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน ซึ่งเจือจางอยู่ในคาร์บอนไดออกไซด์และไนโตรเจน แก๊สจะมีอุณหภูมิเปลวไฟ (Flame temperature) ต่ำ ปัจจุบันมีการนำมาใช้ในการผลิตไฟฟ้าสำหรับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก

2.2.3.2. แก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนปานกลาง (Medium heating value gas หรือ medium Btu gas) ค่าความร้อนประมาณ 10-20 MJ/m³

กระบวนการนี้ใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ที่ได้จากการแยกอากาศ เพื่อใช้ในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วน (Partial oxidation) การไม่มีไนโตรเจนจะทำให้ความร้อนสูงขึ้น

2.2.3.3. แก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนสูง (High heating value gas หรือ high Btu gas) ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้เทียบเท่ากับ Synthesis gas (SNG) ได้โดยกระบวนการเมทานเนชัน (Methanation) ที่อุณหภูมิต่ำ Catalytic process เกิดปฏิกิริยาของแก๊ส CO และ H₂ เป็นมีเทนและน้ำดังสมการ



เมื่อผ่านการทำให้แห้ง ก็จะได้แก๊สซึ่งมีสมบัติใกล้เคียงกับแก๊สบริสุทธิ์

2.2.4 ประเภทของกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Classification of Gasification Process)

กระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสามารถแบ่งได้ออกเป็น 4 กลุ่มใหญ่ๆดังนี้

2.2.4.1. เบดนิ่งหรือเบดเคลื่อนที่ (Fixed bed Gasifier หรือ Moving Bed Gasifier)

วัตถุดิบจะเข้าสู่เตาผลิตแก๊สโดยการนำเข้าทางด้านบนและจะเคลื่อนตัวตลอดเวลาในแนวของเตาไอน้ำและอากาศที่เข้าทางด้านล่างจะเคลื่อนที่ขึ้นด้านบน ส่วนบริเวณส่วนล่างของ

เบด คาร์บอนจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ต่อจากช่วงนี้ปฏิกิริยาดูดความร้อนทั้งหมดก็เกิดขึ้น แก๊สจากปฏิกิริยาเหล่านี้จะลอยตัวขึ้นผ่านเบดของคาร์บอน คาร์บอนมอนอกไซด์เกิดขึ้นโดยปฏิกิริยาของคาร์บอนไดออกไซด์กับคาร์บอน ซึ่งพอสรุปได้ว่า ขณะที่วัตถุดิบเคลื่อนตัวลงมา สิ่งที่จะเกิดขึ้นคือ

- การทำให้แห้ง (Drying) เมื่อสัมผัสกับแก๊สร้อนที่ลอยตัวขึ้น
- การเอาสารระเหยได้ออก (Devolatilization) สารระเหยในวัตถุดิบจะระเหยออกมา แยกตัวให้แก๊สไฮโดรเจน มีเทน และ ไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลหนักอื่นๆ ลอยปะปนไปกับแก๊สผลิตภัณฑ์
- เกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนมีทั้งออกซิเดชัน (Oxidation) และ รีดักชัน (Reduction) ส่วนที่ไม่เกิดปฏิกิริยาที่เหลือก็จะถูกปล่อยออกมาทางส่วนล่างของเบด

2.2.4.2. ฟลูอิดไธเบด (Fluidization Bed Gasifier)

ระบบนี้มีการพัฒนาน้อยที่สุด ในสมัยก่อนสงครามโลกครั้งที่ 2 เตาผลิตแก๊สนี้ใช้ในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง ผลิตกระแสไฟฟ้า และเดินเครื่องยนต์แก๊ส เครื่องยนต์ที่ใช้ในโรงงานการสังเคราะห์แอมโมเนีย เตาผลิตภัณฑ์ผงถ่านเล็กๆ จะถูกฟลูอิดไธด้วยความเร็วของแก๊สที่มีทิศทางเมื่อเปรียบเทียบกับ Entrained Flow Gasifier พบว่า จะมีความร้อนและฝุ่นเล็กๆ ซึ่งสูญหายไปกับแก๊สที่ผลิตได้ที่ออกจากตัวเตาเผาผลเสียอันนี้ถูกชดเชยด้วยความสามารถในการเดินเครื่องได้อย่างต่อเนื่องที่อัตราการป้อนสูง การใช้ถ่านต่อเวลาและปริมาตรของเตาสูงกว่า อีกทั้งการถ่ายโอนมวลสารและความร้อนดี ทำให้สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ง่ายและทั่วถึงกว่า

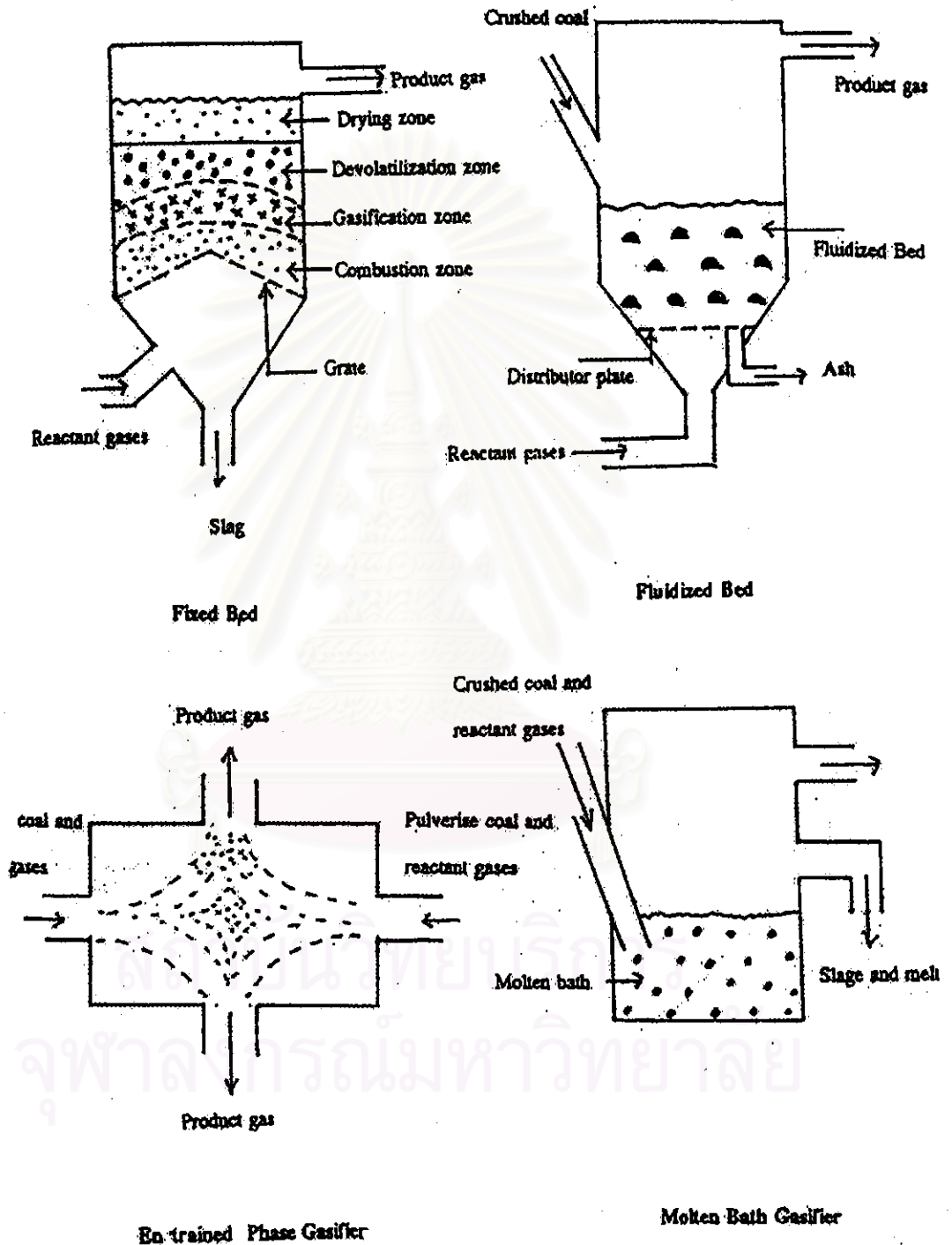
2.2.4.3. Entrained flow Gasifier

เป็นการใช้ส่วนผสมของวัตถุดิบกับแก๊ส (อากาศ/ไอน้ำ หรือ ออกซิเจน/ไอน้ำ) เมื่อนำเอาผงละเอียดเล็กของวัตถุดิบเข้าสู่เตาผลิตแก๊ส โดยที่ขนาดของวัตถุดิบและความเร็วของแก๊สที่เข้าจะต้องพอดีกัน เพื่อรักษาสภาพของ suspension ไว้ การทดลองเรื่องนี้ได้รับการพัฒนามาจากระบบการเผาไหม้ของ Pulverized-coal เถ้า และ ถ่านชาร์ จะออกจากเตาพร้อมกับแก๊สผลิตภัณฑ์ ซึ่งต้องมีการแยกออกอีกครั้งหนึ่ง อัตราการเกิดปฏิกิริยาของถ่านหินและอุณหภูมิสูงมากเมื่อเทียบกับเบดนิ่งและเมื่ออุณหภูมิสูงเกินภาวะเกิด slag การแกลิฟิเคชันจะสามารถเกิดขึ้นสำเร็จด้วยการผ่านเข้าเพียงครั้งเดียวซึ่งในระบบแห่งนี้มักจะมีการนำถ่านชาร์กลับเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในปริมาณสูง

2.2.4.4. Molten Salt Gasifier

สารหลอมเหลวสามารถใช้ในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง เพื่อที่จะถ่ายโอนความร้อนและเป็นคะตะลิสต์ สารที่เป็นสารหลอมเหลวนอกจากเกลือแล้ว อาจจะเป็นเหล็กหรือโลหะอื่นๆรวมทั้งซีเถ้าของถ่าน การผลิตแก๊สที่ใช้ตัวกลางที่หลอมเหลวได้นั้นทำให้ผลิตแก๊สได้มากขึ้นเพราะในการ

เร่งปฏิกิริยาของสารหลอมเหลว กำมะถันจะอยู่ในส่วนที่หลอมเหลวทำให้กรรมวิธีที่ใช้มีความสะอาดของแก๊สน้อยลง ผลเสียที่สำคัญคือเกิดการกัดกร่อน เนื่องจากการใช้สารหลอมเหลว โดยการผสมกระบือของอุณหภูมิต่ำที่มีความบริสุทธิ์สูงในเกลือที่ใช้เป็นเพียงการแก้ปัญหาอย่างชั่วคราว



รูปที่ 2.3 เครื่องมือการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบต่างๆ⁽⁵⁹⁾

ตารางที่ 2.4 สรุปปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง⁽²⁾

Reaction	Heat of reaction	Equilibrium condition		Kinetic	Heat of reaction
		Effect of increase in temperature	Effect of increase in pressure		
Pyrolysis	Coal = H ₂ , CH ₄ , H ₂ O, CO ₂ , CO, tar etc.	→	←	Fast	Exothermic(mildiy)
Partial combustion	C + 1/2O ₂ = CO	spontaneous	←	Fast	Exothermic
Boudouard	C + CO ₂ = 2CO	→	←	Rather slow	Endothermic
Hydrogasification	C + 2H ₂ = CH ₄	←	→	Slow	Exothermic(mildiy)
Water gas	C + H ₂ O = CO + H ₂	→	←	Modurate	Endothermic
Combustion	C + O ₂ = CO ₂	spontaneous	spontaneous	Fast	Exothermic(stronger)
Shift	CO + H ₂ O = CO ₂ + H ₂	←	←	Modurate	Exothermic(mildiy)
Methanation	CO + 3H ₂ = CH ₄ + H ₂ O	←	→	Slow	Exothermic(stronger)
Sulfur retention	Ca + H ₂ S = CaS + H ₂ O	←	←	Fairly slow	Exothermic(slightly)
Carbon dioxide Acceptor	Ca + CO ₂ = CaCO ₃	←	←	Fairly slow	Exothermic

ตารางที่ 2.5 สมบัติของเครื่องผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแต่ละชนิด⁽²⁾

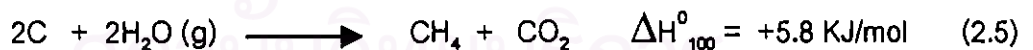
Gasifier type	Coal type			
	Size grading	Caking properties	reactivity	Ash fusion
Fixed bed	Sized	Non-caking or weakly caking	-	-
Fluidized bed	Crushed	Tolerant	-	-
Molten bath	Crushed	Tolerant	-	-
Entrained phase	Pulverised	Tolerant	-	-
Non-slugging	-	-	Reactive coals preferred	High ash fusion temperature
Slugging	-	-	Tolerant	Low ash fusion temperature

2.2.5 แก๊สรีเอเจนต์ (Reagent gases)

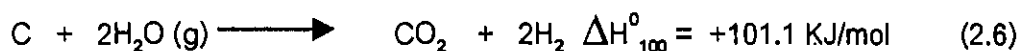
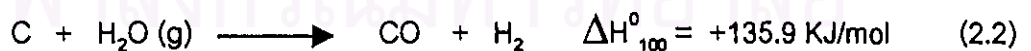
ในกระบวนการแก๊สซิเคชัน แก๊สดังต้นพื้นฐานที่นิยมใช้กันมี 3 ชนิดคือ ออกซิเจน ไอน้ำ และไฮโดรเจน

2.2.5.1. ออกซิเจน/ไอน้ำ (Oxygen/Steam)

ทางอุดมคติการแก๊สไฟโดยใช้ออกซิเจน/ไอน้ำ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนและไอน้ำเพื่อให้ได้มีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ตามสมการ



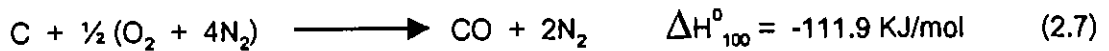
ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนเล็กน้อย แต่การเกิดมีเทนเกิดช้าถ้าไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ดังนั้นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่พบทั่วไป คือ



ซึ่งพบว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนอย่างมาก

2.2.5.2. อากาศ (Air)

การใช้ออกซิเจนในรูปของอากาศในกระบวนการแก๊สซิเคชัน แก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ คาร์บอนมอนอกไซด์แสดงดังสมการ



เรียกแก๊สที่เกิดขึ้นว่า โปรดิวเซอร์แก๊ส ซึ่งจะเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ประมาณ 33 % และให้ค่าความร้อนประมาณ 5.7 MJ/m^3

2.2.5.3. อากาศ/ไอน้ำ (Air/Steam)

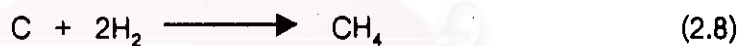
การแกสซิฟิเคชันสามารถใช้อากาศแทนออกซิเจนบริสุทธิ์เพื่อประหยัดค่าใช้จ่ายในการแยกออกซิเจนจากอากาศในกระบวนการนี้จะใช้ไอน้ำเพียงเล็กน้อยในการแกสซิฟาย แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จะเรียกว่า "semi-water gas" และมีค่าความร้อนประมาณ 7 MJ/m^3 ซึ่งแก๊สนี้เหมาะที่จะนำไปใช้ได้กับเทอร์ไบน์ที่ใช้แก๊ส (Gas turbine) เพื่อผลิตไฟฟ้า

2.2.5.4. ไอน้ำ (Steam)

การใช้ไอน้ำเพียงอย่างเดียวในการแกสซิฟิเคชันได้แก๊สเชื้อเพลิงที่ให้ค่าความร้อนปานกลางเนื่องจากได้มีการเจือจางของไนโตรเจน ซึ่งสารที่ได้จะถูกเปลี่ยนแปลงโดยกระบวนการทางเคมี เพื่อให้ได้เชื้อเพลิงเหลวหรือ SNG (Substitute natural gas)

2.2.5.5. ไฮโดรเจน (Hydrogen)

การใช้ไฮโดรเจนในการแกสซิฟิเคชันจะทำให้ผลิตภัณฑ์เป็นมีเทน อาจเรียกว่า ไฮโดรแกสซิฟิเคชัน (Hydrogasification) แก๊สที่ออกมาจะให้ค่าความร้อนสูง (High-Calorific Value) แสดงดังสมการ



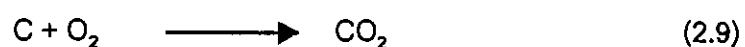
2.2.6 ปฏิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง

2.2.6.1. ปฏิริยาเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (Partial-combustion reaction)



เป็นปฏิริยาการเผาไหม้ของคาร์บอนที่กำลังลุกแดงภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนไม่เพียงพอ

2.2.6.2. ปฏิริยาการเผาไหม้ (Combustion-reaction)



เป็นปฏิกิริยาการเผาไหม้ของคาร์บอนในบริเวณที่มีออกซิเจนมากเกินไป เกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์

2.2.6.3. ปฏิกิริยาเบาดาดซ์ (Boudouard reaction)



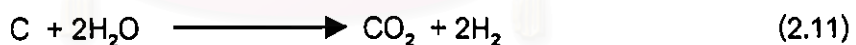
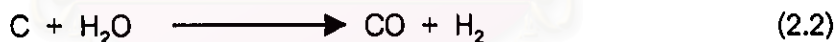
เป็นปฏิกิริยาการเผาไหม้ของคาร์บอนกับคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นปฏิกิริยาพื้นฐานของการผลิตโปรตีวเซอร์แก๊ส จากการศึกษาพบว่าอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาขึ้นกับธรรมชาติของเชื้อเพลิงและลักษณะเฉพาะบนผิว (Surface characteristic) อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิมากกว่า 150 °C เนื่องจากมีการแตกตัวของคาร์บอนเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของเชื้อเพลิงเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่านี้

2.2.6.4. ปฏิกิริยาไฮโดรแกสิฟิเคชัน (Hydrogasification reaction)



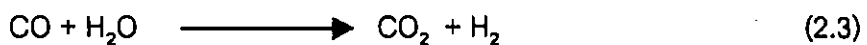
เป็นปฏิกิริยาของคาร์บอนกับไฮโดรเจนเพื่อผลิตมีเทน ซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นกับอุณหภูมิ ความดันและตัวเร่งปฏิกิริยา

2.2.6.5. ปฏิกิริยาอวเตอร์แก๊ส (WATERGAS reaction)



ปฏิกิริยานี้เกิดเมื่อป้อนไอน้ำเข้าไปพร้อมกับอากาศ และเกิดการแตกตัวของไอน้ำทำปฏิกิริยากับคาร์บอน

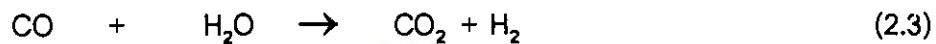
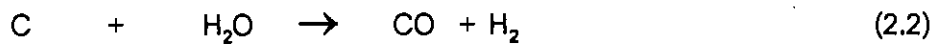
2.2.6.6. ปฏิกิริยาชิฟต์ (Shift-wateraction)



เป็นปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนมอนอกไซด์กับไอน้ำ ได้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์กับไฮโดรเจน อาจเรียกว่า water gas shift reaction

ปฏิกิริยาเหล่านี้เป็นปฏิกิริยาผันกลับได้ (Reversible) ถึงแม้ปัจจัยทางเวลาและสมดุลเกือบจะไม่มีผลเลยในการปฏิบัติงานจริง

กระบวนการแบบต่อเนื่องการแกสซิฟายถ่านหินโดยทั่วไป ระบบการทำงานจะเป็นแบบเบตนิ่ง หรือแบบฟลูอิไดซ์เบด โดยใช้ไอน้ำและแก๊สออกซิเจน หรืออากาศ เป็นตัวเข้าทำปฏิกิริยาแกสซิฟายกับถ่านหินที่บดละเอียด ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นประกอบด้วย⁽³⁾



ในภาวะการทำงานของกระบวนการแกสซิฟาย การเกิดปฏิกิริยาของแก๊สออกซิเจน (ปฏิกิริยา 2.9 และ 2.12) เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วมาก มีผลให้การหายไปของแก๊สออกซิเจนเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ส่วนปฏิกิริยาแกสซิฟายคาร์บอนด้วยไอน้ำและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (ปฏิกิริยา 2.2 และ 2.10) ดำเนินไปไม่ถึงจุดสมดุลทางเคมี เนื่องจากปฏิกิริยาก่อนข้างช้า จุดสมดุลทางเคมีของปฏิกิริยาดังกล่าว จะเกิดขึ้นเมื่อไอน้ำเกิดการสลายตัว 100 % โดยเกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์น้อยมากที่อุณหภูมิเกินกว่า 1093 °C ความดัน 1 ถึง 20 บรรยากาศ ปฏิกิริยาที่ 2.10 โดยทั่วไปอัตราการเกิดปฏิกิริยาช้ากว่าปฏิกิริยาที่ 2.2 เมื่อความเข้มข้นของสารที่เข้าทำปฏิกิริยาเท่า ๆ กัน⁽⁴⁾

ปฏิกิริยาที่ 2.3 เรียก "ปฏิกิริยาวอเตอร์แกสชิฟต์" (Water-Gas shift Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่แก๊สเกิดปฏิกิริยาขึ้นบนผิวของเชื้อเพลิงแข็ง โดยส่วนใหญ่ และเกิดปฏิกิริยานี้ขึ้นเพียงเล็กน้อยในวัฏภาคแก๊ส (Gas phase) ปฏิกิริยานี้จะอยู่ที่จุดสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งโดยทั่วไปเป็นฟังก์ชันเนื่องจากการสลายตัวของไอน้ำ หรือความเสถียรของเบตเชื้อเพลิง ที่อุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยานั้น ๆ แพกเตอร์อื่น ๆ ก็มีผลกระทบที่สำคัญ เช่น ความสามารถเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของเถ้าถ่าน เป็นต้น ที่ค่าการสลายตัวของไอน้ำต่ำ ๆ ปฏิกิริยานี้จะดำเนินไปไม่ถึงจุดสมดุล แต่จะกลับไปอยู่ที่จุดสมดุลใหม่โดยเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของไอน้ำผ่านปฏิกิริยาที่ 2.2 แทน เมื่อค่าการสลายตัวของไอน้ำสูง และมีปริมาณของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากพอสมควรแล้ว ก็อาจจะเป็นไปได้ที่จะเกิดสมดุลของปฏิกิริยาวอเตอร์แกสชิฟต์ โดยปฏิกิริยามีแนวโน้มที่จะเกิดปฏิกิริยาในทาง

ย้อนกลับในการเกิดสมดุล การเกิดการสลายตัวของไอน้ำจะเป็นตัวแปรตามกับอุณหภูมิ แต่ที่อุณหภูมิเกินกว่า 1093°C แล้ว การสมมุติว่าเกิดสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ของปฏิกิริยานี้มีความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อยเท่านั้นตลอดการสลายตัวของไอน้ำทุกช่วง ซึ่งเป็นจริงเฉพาะปฏิกิริยาในกระบวนการแกสไฟยาด่านหินบดละเอียด โดยใช้แก๊สออกซิเจนและไอน้ำและเถ้าถ่านเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า “ภาวะการหลอมตัวเป็นก้อนของเถ้า (Ashslagging Condition) ⁽⁵⁾”

ปฏิกิริยาการเกิดแก๊สมีเทน (Methane-Formation Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่สำคัญเกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาแรก ในกระบวนการแกสไฟยาด่านหินที่ประกอบด้วยสารระเหยซึ่งว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1093°C ความดันบรรยากาศหรือมากกว่า ในถ่านที่ประกอบด้วยคาร์บอนคงตัว แต่เพียงอย่างเดียว ปฏิกิริยานี้จะเกิดน้อยมากถึงแม้จะทำปฏิกิริยากับแก๊สไฮโดรเจนโดยตรงก็ตาม ปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊สมีเทนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการเติมแก๊สไฮโดรเจนของสารระเหยในถ่านจะแปรผันกับอัตราการให้ความร้อน วิธีการทำให้เกิดการสัมผัสกันของสารเข้าทำปฏิกิริยา ระดับของอุณหภูมิ และความดันย่อยของแก๊สไฮโดรเจนและไอน้ำ เป็นภาวะการเกิดแก๊สมีเทนที่ตีมาก ปฏิกิริยาของสารไฮโดร-คาร์บอนาเซียส (Hydro-Carbonaceous) กับไอน้ำเป็นสาเหตุให้เกิดการกระตุ้นพื้นที่ผิวที่จะเกิดปฏิกิริยาให้เป็นพื้นที่ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาซึ่งง่ายในการเกิดปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนเพื่อเกิดแก๊สมีเทน

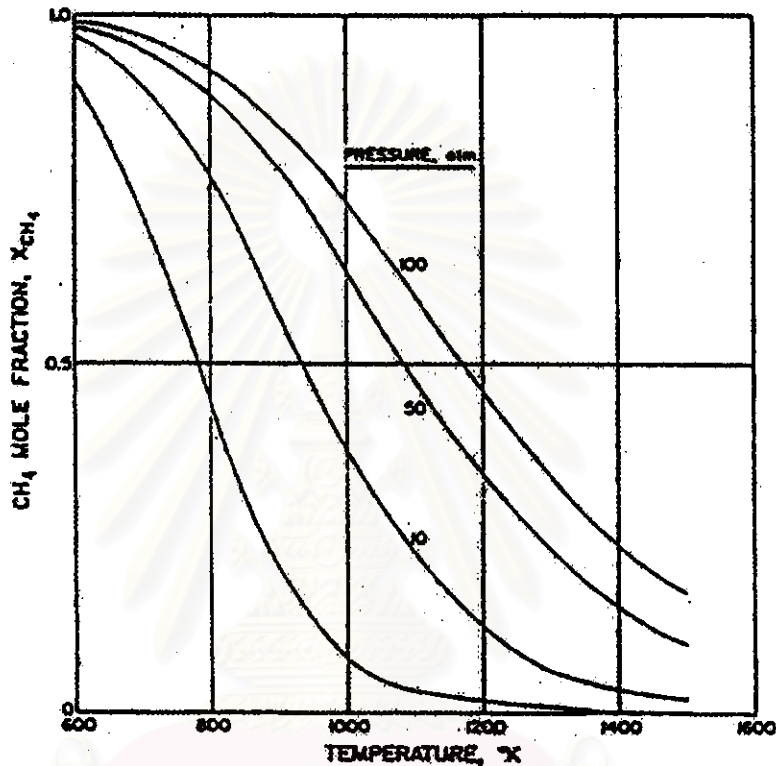
อย่างไรก็ตาม ปริมาณแก๊สมีเทนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาแบบต่อเนื่องการแกสไฟยาระบบฟลูอิดไรซ์เบดที่ปฏิบัติงานที่อุณหภูมิต่ำกว่า 2000°F จะมีปริมาณมีเทนสูงกว่าที่เกิดในกระบวนการแกสไฟยาระบบแบบตึง ผลอันนี้สืบเนื่องมาจากการเกิดการผสมผสานกันอย่างต่อเนื่อง และการหมุนเวียนของก้อนของแข็งในฟลูอิดไรซ์เบด ซึ่งนำเอาอนุภาคของเชื้อเพลิงแข็งที่ว่องไวในการทำปฏิกิริยาจากบริเวณที่มีความดันย่อยของไอน้ำสูงทางตอนล่างของเบดไปสู่บริเวณที่มีความดันย่อยของแก๊สไฮโดรเจนสูงทางตอนบนของเบด ส่วนในกรณีของเบดนิ่ง ส่วนบนของเบดจะไม่ถูกนำกลับมาทำให้เกิดความว่องไวในปฏิกิริยาใหม่โดยไอน้ำ ดังนั้นปฏิกิริยาระหว่างไอน้ำและคาร์บอนจึงมีอัตราเร็วที่ลดลงโดยผลจากการหน่วงปฏิกิริยาเนื่องจากแก๊สไฮโดรเจน และความดันย่อยของไอน้ำที่ต่ำทางตอนบน ทำให้อัตราการเกิดแก๊สมีเทนลดลง

2.2.7 องค์ประกอบที่จุดสมดุล (Equilibrium Composition)

จากเหตุผลทางเทอร์โมไดนามิกส์การที่ธาตุคาร์บอนที่อยู่ในถ่านหินมีค่าแอกติวิตีสูงกว่าธาตุคาร์บอนในกราไฟต์ องค์ประกอบของแก๊สที่ได้รับจากปฏิกิริยาแกสไฟยาด่านหินภายใต้ภาวะที่สมดุล จะมีค่ามากกว่าที่เกิดจากกราไฟต์ ดังนั้นในการคำนวณค่าขององค์ประกอบของแก๊สต่าง ๆ จึงตั้งสมมุติฐานให้ธาตุคาร์บอนนั้น ๆ มีค่าพลังงานอิสระมาตรฐานของการรวมกันของสารเช่นเดียวกับกราไฟต์ ดังตัวอย่างเช่น ปฏิกิริยาสมดุลระหว่างกราไฟต์-ไฮโดรเจน-แก๊สมีเทน ⁽³⁾



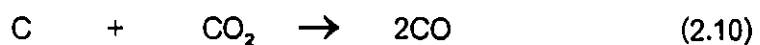
ที่จุดสมดุลสามารถเขียนความสัมพันธ์ให้อยู่ในเทอมฟังก์ชันของอุณหภูมิและความดันรวมได้เท่านั้น พิจารณารูปที่ 2.4 ซึ่งเป็นผลการคำนวณจาก The JANAF Thermochemical Table ⁽⁶⁾ ซึ่งพิจารณาให้แก๊สทั้งหลายมีพฤติกรรมเป็นแก๊สในอุดมคติ



รูปที่ 2.4 ลักษณะสมดุลของระบบกราไฟต์-ไฮโดรเจน-มีเทน⁽⁶⁾

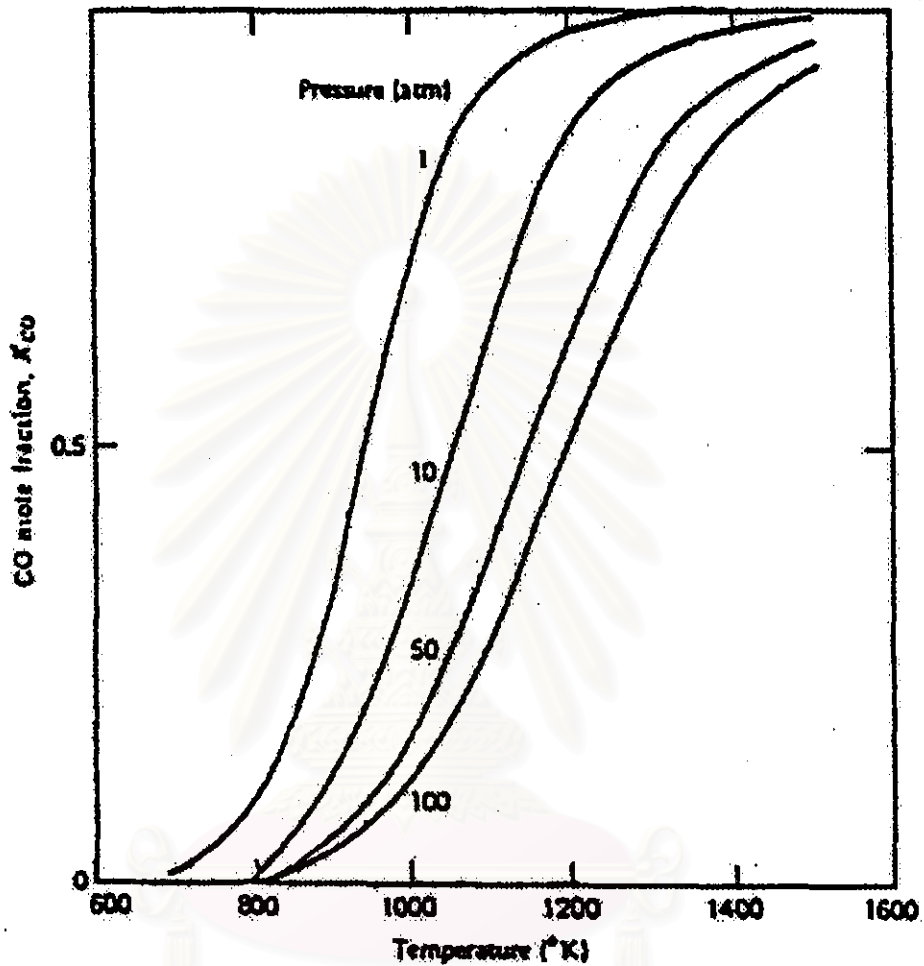
จะเห็นได้ว่าเศษส่วนโมลที่สมดุลของแก๊สมีเทนจะมีค่าลดลง เมื่ออุณหภูมิของระบบเพิ่มขึ้น หรือเมื่อความดันลดลง

สำหรับปฏิกิริยาสมดุลของกราไฟต์-แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์-แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์สามารถเขียนสมการการเกิดสมดุลได้ดังนี้



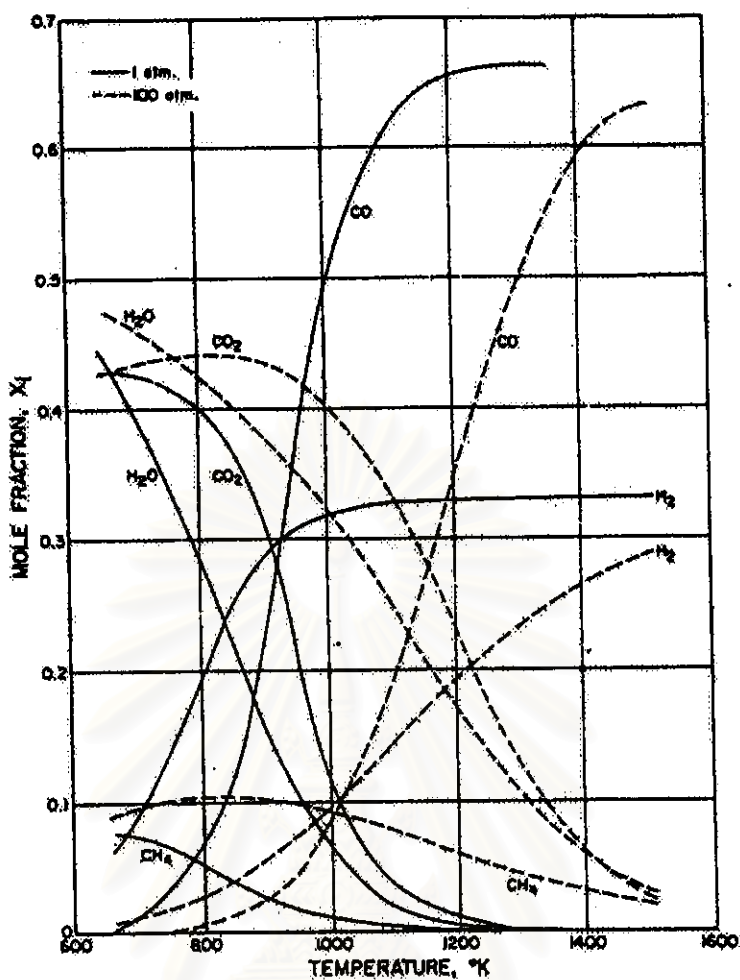
องค์ประกอบของแก๊สต่าง ๆ ที่สมดุลก็จะเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและความดันรวมเท่านั้น พิจารณาได้จากรูป 2.5 จะเห็นได้ว่าเศษส่วนโมลของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ

เพิ่มอุณหภูมิ หรือเมื่อลดความดันลง ซึ่งแนวโน้มการเกิดปฏิกิริยาจะตรงกันข้ามกับปฏิกิริยาสมดุลของแก๊สมีเทนในรูป 2.4



รูปที่ 2.5 ลักษณะสมดุลของระบบกราฟต์-แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์-แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์⁽⁶⁾

ส่วนในระบบสมดุลของ คาร์บอน-ไฮโดรเจน-ออกซิเจน ซึ่งสมดุลนี้เป็นสมดุลที่สำคัญมากในกระบวนการแก๊สฟาย แก๊สที่ได้รับจากการเกิดปฏิกิริยาโดยทั่วไปประกอบด้วย CO , CO_2 , H_2 , H_2O องค์ประกอบของแก๊สที่สมดุลในระบบนี้จะอยู่ในเทอมฟังก์ชันของอุณหภูมิ



รูปที่ 2.6 ลักษณะสมดุลของระบบคาร์บอน-ไฮโดรเจน-ออกซิเจน ($H/O = 1$)⁽⁶⁾

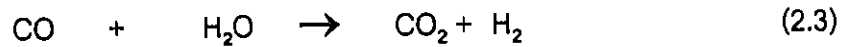
ตารางที่ 2.6 แสดงแนวโน้มสมดุลของระบบ C-H-O ($H/O = 1$ gm-atom/gm-atom)⁽⁶⁾

Mole Fraction, X_i	Temperature \uparrow	Pressure \uparrow	H/O Ratio \uparrow
X_{CO}	\uparrow	\downarrow	\downarrow
X_{CO_2}		\uparrow	\downarrow
X_{H_2}	\uparrow	\downarrow	\uparrow
X_{H_2O}	\downarrow	\uparrow	\rightarrow
X_{CH_4}	\rightarrow	\uparrow	\uparrow
$\left[\frac{x_{CH_4}}{x_{CH_4} + x_{CO} + x_{CO_2}} \right]$	\rightarrow * \downarrow **	\uparrow	\uparrow

* $H/O < 2$

** $H/O \geq 2$

ความดันรวมและอัตราส่วนของ H₂O (อะตอม/อะตอม) ในวัฏภาคแก๊ส ปฏิริยาสมดุลที่เกิดขึ้นในระบบนี้ค่อนข้างซับซ้อน โดยจะประกอบด้วยสมดุลในสมการที่ 2.8 และ 2.10 รวมกับสมการสมดุลปฏิริยาอวเทอร์-แก๊ส ด้วย



ซึ่งจะเห็นได้ว่าระบบสมดุลนี้ประกอบด้วย ปฏิริยาต่าง ๆ เกิดร่วมกันถึง 3 ปฏิริยา ซึ่งการจะเกิดปฏิริยาไหนอย่างไหนนั้นเป็นไปโดยอิสระ ขึ้นอยู่กับตัวแปรต่าง ๆ พิจารณารูปที่ 2.6 เป็นสมดุลของระบบเมื่อค่าอัตราส่วน H₂O = 1 สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.5 โดยให้เครื่องหมาย (↑) แสดงถึงมีค่ามากขึ้น (↔) แสดงถึงมีค่าลดลงในตอนท้าย ตัวอย่าง เช่น เศษส่วนโมลของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ จะมีค่ามากขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และมีค่าลดลงเมื่อความดันสูงขึ้น หรือเมื่ออัตราส่วน H₂O เพิ่มขึ้น เป็นต้น⁽⁶⁾

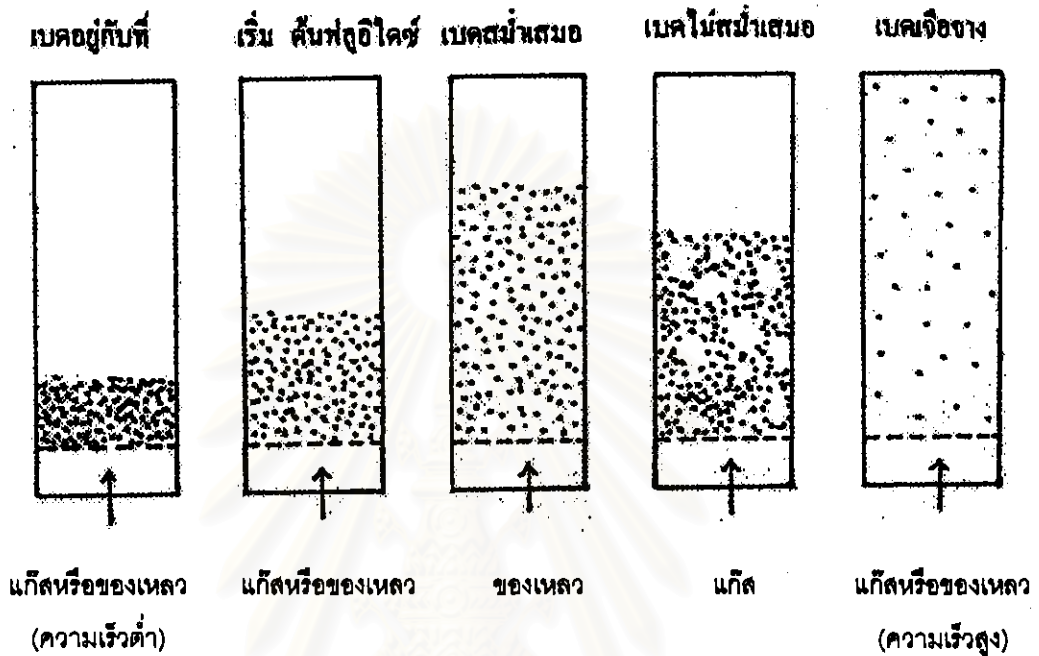
2.3 ฟลูอิดเซชัน

ฟลูอิดเซชันเป็นปรากฏการณ์ที่กลุ่มของอนุภาคประพติดั้วทางกายภาพคล้ายกับของไหลเมื่อแก๊สหรือของเหลวผ่านกลุ่มของอนุภาคนั้น ในขณะที่ของไหลผ่านอนุภาคด้วยความเร็วต่ำของไหลจะแทรกตัวไปตามช่องว่างอนุภาคที่อยู่กับที่ (Fixed bed) แต่เพื่อความเร็วของของไหลเพิ่มขึ้น อนุภาคเริ่มลอยตัวเป็นอิสระจากกัน แต่ยังรวมกันเป็นกลุ่มก้อนอยู่ (Dense phase Fluidized bed) แรงที่กระทำบนอนุภาคจะอยู่ในลักษณะสมดุล กล่าวคือ แรงดันที่เกิดจากน้ำหนักของอนุภาคและแรงพยุงของของไหล ซึ่งมีทิศทางตรงข้ามกันมีค่าเท่ากัน ความดันลดที่พื้นที่หน้าตัดใดๆ ของกลุ่มอนุภาคมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับความสูงของกลุ่มอนุภาคสภาพของกลุ่มอนุภาคขณะนี้ เป็นสภาพเริ่มต้นของปรากฏการณ์ฟลูอิดเซชัน (Incipiently Fluidization Bed) ความเร็วของของไหล ณ จุดนี้เรียกว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน (Minimum Fluidization Velocity)

ถ้าหากความเร็วของของไหลเพิ่มขึ้น อนุภาคก็จะลอยตัวแยกตัวอยู่ห่างจากกันมากขึ้น กลุ่มของอนุภาคลักษณะนี้เรียกว่าฟลูอิดเซชันเบดเจือจาง (Dilute phase Fluidized bed) และถ้าเพิ่มความเร็วของของไหลมากขึ้นอีกจนถึงจุดหนึ่ง ของไหลจะพาอนุภาคดังกล่าวหลุดลอยออกจากระบบได้ และกลายเป็นระบบขนส่งต่อไป

ในระบบแก๊ส ของแข็งจะมีลักษณะแตกต่างออกไป จากระบบของแข็ง-ของเหลวกล่าวคือ เมื่อเพิ่มความเร็วของแก๊สให้สูงขึ้นมากกว่าความเร็วต่ำสุดในการทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน กลุ่มอนุภาคจะมีการเคลื่อนที่อย่างรุนแรง และขยายตัวเกิดเป็นช่องว่างซึ่งอาจจะเรียกฟองแก๊ส

(Bubble) แทรกตัวขึ้นมาอยู่ทั่วไปในกลุ่มอนุภาคและจะหลุดออกไปที่ผิวหน้าของกลุ่มอนุภาคนั้น ในบางครั้งอาจจะเกิดแนวหรือช่องทางเดินของแก๊ส แทรกอยู่ในกลุ่มอนุภาคด้วยซึ่งมักจะพบบ่อย ถ้าความเร็วของแก๊สและความหนาแน่นของอนุภาคมีค่าสูง ลักษณะขั้นตอนการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิไดเซชันของกลุ่มอนุภาคของของแข็งอาจจะแสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ขั้นตอนการเกิดภาวะฟลูอิไดเซชัน⁽⁷⁾

2.3.1 ปรากฏการณ์ฟลูอิไดเซชัน

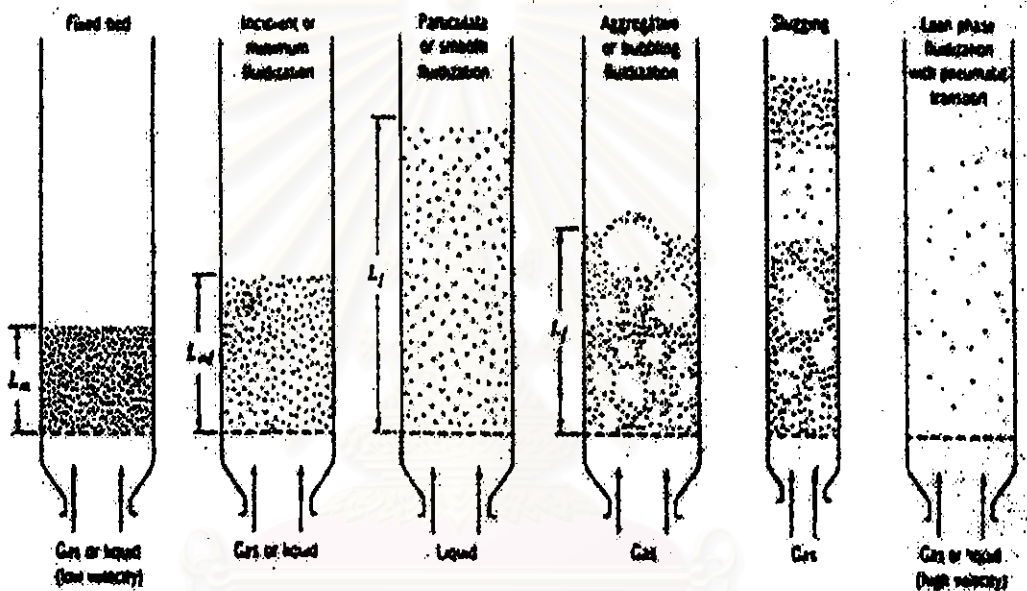
เมื่อผ่านของไหลขึ้นมาจากตอนล่างของชั้นอนุภาคของแข็งดังแสดงในรูปที่ 2.8 ที่อัตราการไหลของของไหลต่ำ ๆ ของไหลจะแทรกตัวผ่านไปตามช่องว่างระหว่างอนุภาคของแข็งที่หยุดนิ่ง จุดนี้เรียกว่า "เบดนิ่ง" (Fixed-Bed)

เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของของไหลให้มากขึ้น อนุภาคของแข็งจะเริ่มเคลื่อนตัวออกจากกัน และบางอนุภาคจะมีการสั่นและเคลื่อนตัวได้ในเนื้อที่จำกัด จุดนี้เรียกว่า "เบดขยาย" (Expanded-Bed) ถ้ายังคงเพิ่มความเร็วของของไหลให้มากขึ้นไปอีก จนถึงจุดหนึ่งซึ่งอนุภาคจะแทรกตัวกระจายอย่างทั่วถึง ในกระแสนี้ของไหลที่ผ่านขึ้นมาจากตอนล่าง ที่จุดนี้แรงเนื่องจากความเสียดทานที่เกิดระหว่างของไหลและผิวของอนุภาค จะเท่ากับพอดีกับน้ำหนักของอนุภาค โดยมีทิศทางสวนกัน แรงกดลงในแนวตั้งระหว่างอนุภาคที่อยู่ติดกันจะหายไป และความดันลด

ตลอดชั้นต่าง ๆ ของเบดจะเท่ากับน้ำหนักของของไหลและของอนุภาคในช่วงชั้นนั้น ๆ ซึ่งที่จุดนี้กล่าวได้ว่า เกิดการฟลูอิดไรซ์ หรือเรียกว่า เกิด "ฟลูอิดไรซ์ที่น้อยที่สุด" (Minimum Fluidization)

ในกรณีนี้ของไหลเป็นแก๊ส เมื่อเพิ่มอัตราการไหลให้สูงกว่าที่จุดฟลูอิดไรซ์ที่น้อยที่สุดขึ้นไปอีก จะเกิดปรากฏการณ์ที่แตกต่างกัน 2 ลักษณะ คือ

1. ถ้าพื้นที่หน้าตัดของเบดมีขนาดใหญ่ ชั้นของอนุภาคจะเกิดเป็นฟองแก๊สโดยที่ชั้นอนุภาคจะขยายตัวขึ้นไม่มาก แต่จะเกิดการไหลวนผสมกันอย่างรุนแรงเรียกว่า "เบดฟลูอิดไรซ์แบบฟองแก๊ส" (Bubbling Fluidized-Bed)

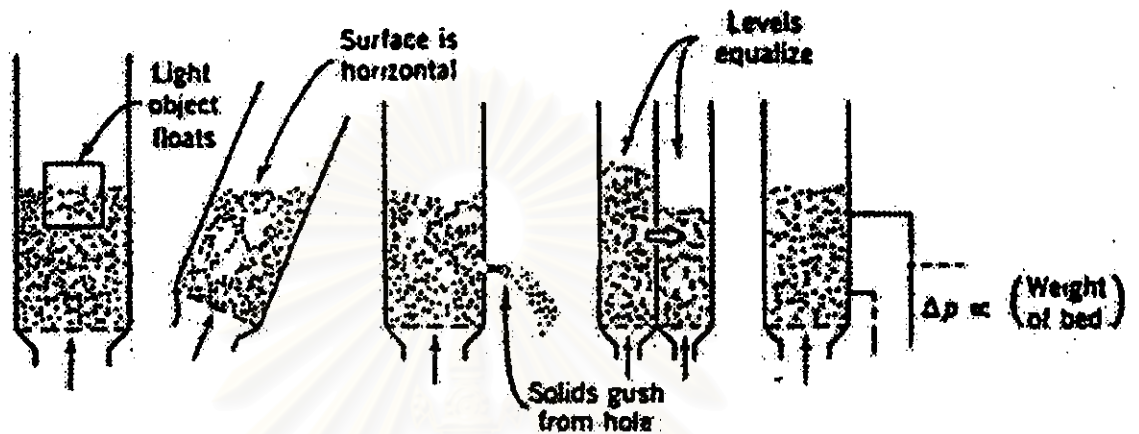


รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะปรากฏการณ์ฟลูอิดไรซ์ชนิดต่าง ๆ ของอนุภาคของแข็งด้วยของไหล⁽⁷⁾

2. ถ้าขนาดพื้นที่หน้าตัดของเบดมีขนาดเล็ก ฟองแก๊สที่เกิดจะมีขนาดใหญ่ จนในที่สุดจะรวมตัวกันเท่ากับขนาดของเบด ฟองแก๊สขนาดใหญ่นี้จะทำหน้าที่กั้นชั้นของอนุภาคที่อยู่ตอนบนให้ลอยตัวขึ้น และตกลงมาเมื่อฟองแก๊สแตกออก เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า "ปรากฏการณ์สลักกิง" (Slugging Phenomena)

ถ้าเพิ่มอัตราการไหลของของไหลต่อไปอีก อนุภาคของแข็งจะเกิดการไหลวนผสมกันอย่างรุนแรงยิ่งขึ้น เกิดการฟลูอิดไรซ์มากขึ้นจนถึงจุดหนึ่ง ความเร็วของของไหลมากพอที่จะกั้นเอาอนุภาคทั้งหมดให้ไหลตามออกไปพร้อม ๆ กับกระแสของไหล จุดนี้เรียกว่า "เบดฟลูอิดไรซ์แบบวัฏ

ภาคเบาบาง" (Lean-Phase Fluidized-Bed) ซึ่งนำไปใช้ในการถ่ายโอนมวลสารของแข็งจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง รูปที่ 2.9 แสดงถึงพฤติกรรมต่าง ๆ ที่เหมือนของเหลวของระบบฟลูอิดไรซ์



รูปที่ 2.9 แสดงพฤติกรรมต่าง ๆ ที่เหมือนของเหลวของระบบฟลูอิดไรซ์⁽⁷⁾

2.3.2 พฤติกรรมรวมของระบบฟลูอิดไรซ์เบด (Gross Behavior of Fluidized-Bed)

ปรากฏการณ์การเคลื่อนที่ของของไหลไปตามช่องว่างของอนุภาคในระหว่างที่เกิดฟลูอิดไรซ์นั้นเป็นปรากฏการณ์การเคลื่อนที่ที่สลับซับซ้อนมาก ดังนั้นการศึกษาถึงอิทธิพลจากแฟกเตอร์ต่าง ๆ เช่น ขนาดอนุภาค ความหนืดของของไหล ความดันลดที่ขึ้นต่อหน่วยความสูงของเบด และความหนาแน่นของของไหล เป็นต้น เริ่มต้นจากการทดลองและศึกษาถึงปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น เมื่อของไหลไหลผ่านชั้นของแข็งที่อยู่นิ่งและขนาดอนุภาคมีขนาดสม่ำเสมอ Ergun⁽¹⁰⁾ ได้สรุปความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ดังนี้

$$\frac{\Delta P \cdot g_c}{L} = 150 \frac{(1-\epsilon_m)}{\epsilon_m^3} \frac{U_o \mu}{(\phi_s D_p)^2} + 1.75 \frac{(1-\epsilon_m)}{\epsilon_m^3} \frac{U_o^2 \rho_s}{\phi_s D_p} \quad (2.15)$$

ความดันลดในสมการที่ 2.15 ประกอบด้วยเทอม 2 เทอม คือ พลังงานสูญเสียเนื่องจากความหนืด (Viscous Energy Loss) และสูญเสียพลังงานทางจลน์ (Kinetic Energy Loss) เมื่อค่าตัว

เลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number) ต่ำ ๆ ค่าพลังงานสูญเสียเนื่องจากความหนืดก็จะมีค่ามาก ดังนั้นสมการ 2.15 สามารถลดรูปได้อย่างง่าย คือ

$$\frac{\Delta P \cdot g_c}{L} = 150 \frac{(1-\epsilon_m)^2}{\epsilon_m^3} \frac{U_o \mu}{(\phi_s D_p)^2} \quad R_{op} < 20 \quad (2.16)$$

ในทางตรงกันข้าม เมื่อค่าตัวเลขเรย์โนลด์สูง ๆ การสูญเสียพลังงานทางจลน์ก็จะมีค่ามาก สำคัญมาก สมการ 2.15 จะลดรูปเป็น

$$\frac{\Delta P \cdot g_c}{L} = 1.75 \frac{(1-\epsilon_m)}{\epsilon_m^3} \frac{U_o^2 \mu}{(\phi_s D_p)} \quad R_{op} > 1000 \quad (2.17)$$

ส่วนในช่วงความเร็วกลาง ๆ สมการ 2.15 จะถูกใช้อธิบาย เนื่องจากพลังงานสูญเสียทั้งสองเทอมมีความสำคัญพอ ๆ กัน

พิจารณาอนุภาคของแข็งที่ลอยอยู่ในกระแสของของไหล ที่ไหลสวนทางกับแรงโน้มถ่วงของโลก ในขณะที่เกิดปรากฏการณ์ฟลูอิไดซ์ การที่อนุภาคสามารถลอยตัวอยู่ได้แสดงว่าเกิดภาวะสมดุลของแรงขึ้น ดังนั้น

$$\text{Drag Force by upward Moving gas} = \text{Weight of Particle} \quad (2.18)$$

$$\left(\text{Pressure Drop} \right) \left(\text{Cross Sectional} \right) = \left(\text{Volume} \right) \left(\text{Fraction} \right) \left(\text{Specific Weight} \right) \\ \left(\text{Across Bed} \right) \left(\text{Area of Tube} \right) = \left(\text{of Bed} \right) \left(\text{of Solid} \right) \left(\text{of Solid} \right) \quad (2.19)$$

$$\Delta P \cdot A_t = w = (A_t \cdot L_{mf}) (1-\epsilon_{mf}) (\rho_s - \rho_g) \frac{g}{g_c} \quad (2.20)$$

$$\frac{\Delta P}{L_{mf}} = (1-\epsilon_{mf}) (\rho_s - \rho_g) \frac{g}{g_c} \quad (2.21)$$

เมื่อรวมสมการ 2.15 เข้ากับสมการ 2.21 จะได้สมการทั่วไปดังนี้

$$\frac{1.75}{\phi \epsilon_{mf}^3} \left(D_p \frac{U_{mf}}{\mu} \rho_g \right)^2 + 150 \frac{(1-\epsilon_{mf})}{\phi^2 \epsilon_{mf}^3} \left(\frac{D_p U_{mf} \rho_g}{\mu} \right) = D_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) \cdot \frac{g}{\mu^2} \quad (2.22)$$

สำหรับอนุภาคขนาดเล็ก หรือมีความเร็วต่ำ ๆ สมการ 2.15 จะลดรูปลงเป็นสมการที่ 2.16 ดังนี้
สมการ 2.16 จะกลายเป็น

$$U_{mf} = (\phi_s D_p)^2 (\rho_s - \rho_g) \frac{g}{150\mu} \frac{\epsilon_{mf}^3}{(1 - \epsilon_{mf})} \quad R_{sp} < 20 \quad (2.23)$$

สำหรับอนุภาคขนาดใหญ่ หรือมีความเร็วสูง ๆ สมการ 2.15 จะลดรูปลงเป็นสมการ 2.17 ดังนั้น
สมการที่ 2.17 จะกลายเป็น

$$U_{mf}^2 = \phi_s D_p \cdot (\rho_s - \rho_g) \cdot \frac{1}{1.75\rho_g} \cdot g \cdot \epsilon_{mf} \quad R_{sp} > 1000 \quad (2.24)$$

ค่า ϵ_{mf} และ ϕ_s ของระบบมักเป็นตัวแปรที่ไม่ทราบค่า Wen และ Yu ⁽¹³⁾ ได้ทำการทดลองและ
เสนอความสัมพันธ์โดยทั่วไประหว่าง ϵ_{mf} & ϕ_s ดังนี้

$$\frac{1}{\phi_s \epsilon_{mf}^3} = 14 \quad \frac{1 - \epsilon_{mf}}{\phi_s^2 \epsilon_{mf}^3} = 11 \quad (2.25)$$

เมื่อแทนค่าสมการ 2.25 ลงในสมการทั่วไปที่ 2.17 จะได้ว่า

$$D_p \frac{U_{mf}}{\mu} \rho_g = \left[(33.7)^2 + 0.0408 D_p^3 \rho_g \cdot (\rho_s - \rho_g) \frac{g}{\mu^2} \right]^{1/2} - 33.7 \quad (2.26)$$

$$U_{mf} = \frac{D_p^2 (\rho_s - \rho_g) \cdot g}{1650\mu} \quad R_{sp} < 20 \quad (2.27)$$

$$U_{mf}^2 = \frac{D_p (\rho_s - \rho_g) \cdot g}{24.5\rho_g} \quad R_{sp} > 1000 \quad (2.28)$$

สมการ 2.27 และ 2.28 ใช้ในการคำนวณค่าความเร็วที่จุดฟลูอิไดซ์ที่น้อยที่สุดได้โดย
ประมาณ ซึ่งถ้าข้อมูลเกี่ยวกับ ϵ_{mf} และ ϕ_s สามารถทราบค่าแล้ว ควรใช้สมการ 2.17 ในการ
คำนวณจะให้ผลที่ถูกต้องกว่า

สำหรับความเร็วของของไหลสุดท้ายที่จะเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไรซ์ (Terminal Velocity of Fluidization) สามารถประมาณได้จากปรากฏการณ์การตกอย่างอิสระของอนุภาค (Free-Fall of Particle)

$$U_t = \left[\frac{4}{3} \cdot g \cdot D_p \frac{(\rho_s - \rho_g)}{C_d \cdot \rho_g} \right]^{1/2} \quad (2.29)$$

$$C_d \cdot R_{ep}^2 = \frac{4}{3} \cdot g \cdot D_p^3 \cdot \rho_g \cdot (\rho_s - \rho_g) \cdot \frac{1}{\mu^2} \quad (2.30)$$

สำหรับช่วงความเร็วต่าง ๆ สมการ 2.30 สามารถสรุปได้ดังนี้

$$C_{d,spherical} = \frac{24}{R_{ep}} \quad R_{ep} < 0.4 \quad (2.31)$$

$$C_{d,spherical} = \frac{10}{R_{ep}^2} \quad 0.4 < R_{ep} < 500 \quad (2.32)$$

$$C_{d,spherical} = 0.43 \quad 500 < R_{ep} < 200,000 \quad (2.33)$$

นำค่า ในช่วงความเร็วต่าง ๆ ข้างต้นแทนลงในสมการ 2.29

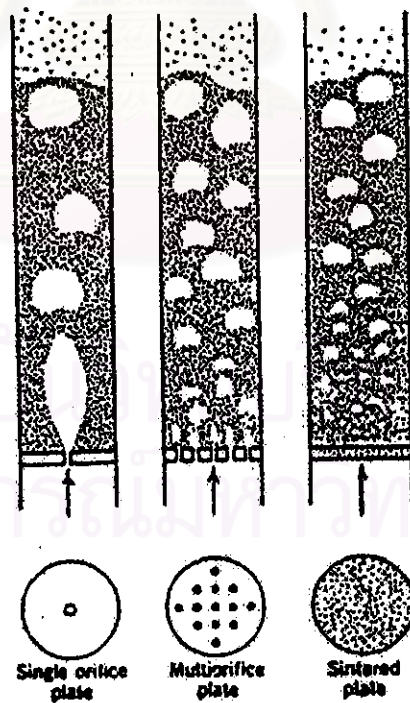
$$U_{t,spherical} = g \cdot \frac{(\rho_s - \rho_g)}{18\mu} \cdot D_p^2 \quad R_{ep} < 0.4 \quad (2.34)$$

$$U_{t,spherical} = \left[\frac{4}{225} \cdot \frac{(\rho_s - \rho_g)^2}{\rho_g \cdot \mu} g^2 \right]^{1/3} \cdot D_p \quad 0.4 < R_{ep} < 500 \quad (2.35)$$

$$U_{t,spherical} = \left[3.1 \cdot g \cdot \frac{(\rho_s - \rho_g)}{\rho_g} \cdot D_p \right]^{1/2} \quad 500 < R_{ep} < 200,000 \quad (2.36)$$

2.3.3 การเลือกชนิดของแผ่นกระจายแก๊ส (Choice of Distributor Type)

ลักษณะการเกิดฟองแก๊สในขณะที่เกิดปรากฏการณ์ฟลูอิไดซ์ มีผลกระทบอย่างมากจากชนิดของแผ่นกระจายแก๊สที่ใช้ในระบบ พิจารณารูปที่ 2.10 จะเห็นว่าเมื่อแผ่นกระจายแก๊สมีทางให้แก๊สผ่านได้เพียงช่องทางขนาดใหญ่เพียงช่องทางเดียว ความหนาแน่นของอนุภาคภายในระบบ จะมีค่าเปลี่ยนแปลงมากบ้างน้อยบ้าง ตามการเกิดฟองแก๊สภายใน โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าอัตราการไหลของแก๊สมีค่ามาก และอาจจะเกิดปรากฏการณ์ที่แก๊สพยายามแทรกตัวไปตามช่องว่างระหว่างอนุภาคกับผนังของเครื่องปฏิกรณ์หรือฟองแก๊สมีขนาดใหญ่ขึ้นจนเกือบเท่าขนาดท่อเกิดการอุดตันอนุภาคขึ้นไปตามกระแสการไหลของแก๊ส ถ้าขนาดของทางผ่านบนแผ่นกระจายแก๊สมีขนาดเล็กลง และมีจำนวนมากขึ้น ในขณะที่อัตราการไหลของแก๊สมีค่าต่ำ ๆ แล้ว ฟองแก๊สแทบจะไม่เกิดขึ้นเลย หรือเกิดเป็นฟองขนาดเล็กกระจายอยู่ทั่วไปอย่างสม่ำเสมอ ความหนาแน่นของอนุภาคจึงค่อนข้างสม่ำเสมอ การสัมผัสกันของแก๊สและของแข็งจะมีค่ามาก โดยมีปรากฏการณ์แทรกตัวหนีของแก๊สไปตามช่องว่างของผนังท่อน้อย แต่ถ้าแผ่นกระจายแก๊สเป็นตัวกลางที่มีรูพรุนขนาดเล็กมากขึ้นไปอีก ความหนาแน่นของอนุภาคในกระแสแก๊สที่ไหลสวนทางขึ้นมาจะมีความสม่ำเสมอ ฟองแก๊สเกิดขึ้นน้อยและมีขนาดเล็ก แต่ข้อเสียของแผ่นกระจายแก๊สแบบนี้ก็คือ ค่าความดันตกที่เกิดขึ้นระหว่างตอนบนและตอนล่างของแผ่นกระจายแก๊สจะมีค่าสูงมาก ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานมาก



รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะการเกิดฟลูอิไดซ์ชนิดต่าง ๆ เนื่องจากอิทธิพลของชนิดแผ่นกระจายแก๊ส

2.3.4 การออกแบบแผ่นกระจายแก๊ส⁽⁹⁾ (Design of Distributor Plate)

เมื่อกระแสของแก๊สไหลมาตามท่อส่ง จนถึงตอนล่างของแผ่นกระจายแก๊ส จะเกิดความดันลดซึ่งมีค่ามากพอที่จะให้แก๊สที่ไหลผ่านรูเปิดของแผ่นกระจายแก๊สมีอัตราเท่ากับอัตราการไหลของการส่งแก๊สพอดี ทำให้แก๊สที่เข้ามาถูกจัดตัวกันเสียใหม่ตามลักษณะการเรียงตัวของช่องทางเปิดบนแผ่นกระจายแก๊ส

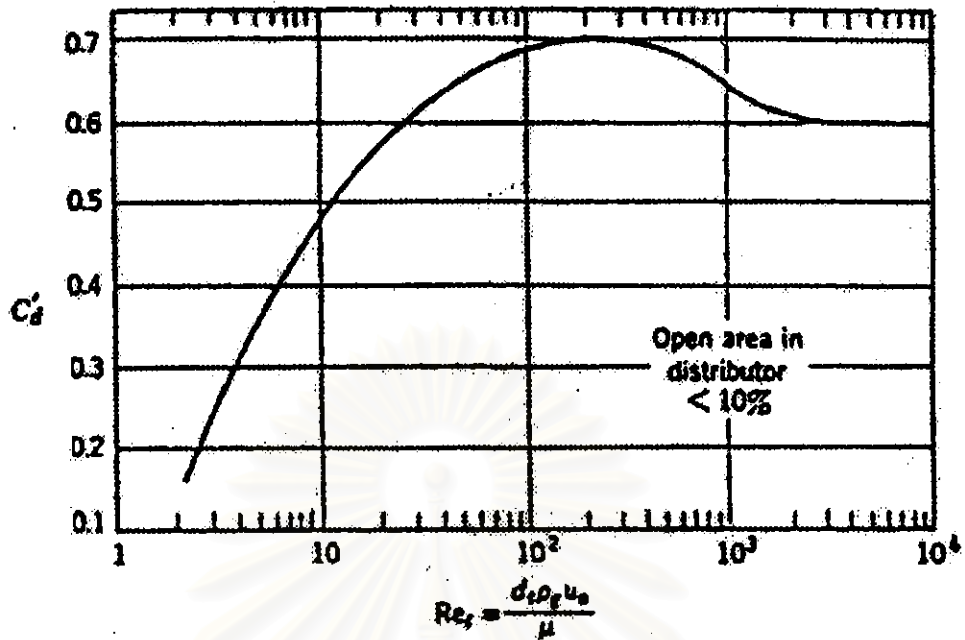
ความต้านทานเนื่องจากการจัดตัวใหม่ของแก๊ส จะอยู่ในรูปของการสูญเสียพลังงานเนื่องจากการขยายตัวเมื่อแก๊สไหลผ่านช่องทางเปิดเล็ก ๆ ของแผ่นกระจายแก๊ส⁽⁹⁾ ได้แนะนำอัตราส่วนของ การสูญเสียพลังงานเนื่องจากแผ่นกระจายแก๊สต่อการสูญเสียพลังงานเนื่องจากการขยายตัวว่า ควรจะมีค่าเป็น 100 เท่า⁽¹²⁾ ได้แนะนำว่า ความดันลดที่เกิดขึ้นบนแผ่นกระจายแก๊สควรมีค่าประมาณ 10 % ของความดันลดตลอดช่วงความยาวของชั้นอนุภาค และมีค่าอย่างน้อยไม่ต่ำกว่า 35 เซนติเมตรของน้ำ

$$\Delta P_d, \min = \text{Max} (0.1\Delta P_{bed}; 35 \text{ cm.H}_2\text{O}; 100\Delta P_{expansion}) \quad (2.37)$$

สมการ 2.37 สามารถนำไปใช้เป็นขอบเขตของการออกแบบความดันลดที่เกิดระหว่างตอนบนและตอนล่างของแผ่นกระจายแก๊ส

แผ่นกระจายแก๊สชนิดแผ่นเรียบ (Perforated Plate) สามารถออกแบบได้โดยตรงโดยอาศัยทฤษฎีออริฟิส (Orifice Theory) เมื่อความดันที่เกิดขึ้นทั้งหมดมีค่ามากกว่าความดันลดเนื่องจากออริฟิสมาก ๆ โดยมีขั้นตอนการออกแบบดังนี้

1. คำนวณค่าความดันลดที่จำเป็น ซึ่งเกิดระหว่างแผ่นกระจายแก๊สจากสมการ 2.21 และสมการ 2.34
2. คำนวณค่าจำนวนเลขเรย์โนลด์ เนื่องจากอัตราการไหลทั้งหมดของแก๊สที่มาถึงแผ่นกระจายแก๊ส และหาค่าสัมประสิทธิ์ออริฟิส (Orifice Coefficient) Cd จากรูปที่ 2.11
3. หาค่าความเร็วของไหลที่ผ่านช่องเปิดของแผ่นกระจายแก๊ส โดยใช้ความหนาแน่นและคุณสมบัติของแก๊สวัดที่ช่องเปิดพอดี



รูปที่ 2.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ออริฟิสกับเลขเรย์โนลด์⁽⁷⁾

$$U_{\alpha} = C_d \left[2 \cdot g_c \cdot \frac{\Delta P d}{\rho_s} \right]^{1/2} \quad (2.38)$$

อัตราส่วนของ $\frac{U_o}{U_{\alpha}}$ คือ เศษส่วนของพื้นที่ของช่องเปิดออริฟิสต่อพื้นที่ของแผ่นกระจายแก๊ส

4. เลือกค่า N_{α} หรือจำนวนรูเปิดต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของแผ่นกระจายแก๊ส และหาค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางเปิดจากสมการ 2.39

$$U_o = \frac{\pi}{4} \cdot D_{\alpha}^2 \cdot U_{\alpha} \cdot N_{\alpha} \quad (2.39)$$

สำหรับอนุภาคที่มีขนาดเล็กมาก ๆ การออกแบบแผ่นกระจายแก๊สที่ดี จะทำหน้าที่คล้าย ๆ กับเครื่องกวนผสม ทำให้การผสมกันของของแข็งดีขึ้น และเกิดฟลูอิดไรส์ได้อย่างทั่วถึงแพคเตอร์ที่พิจารณา คือ อัตราส่วนของพลังงานจลน์ของกระแสแก๊ส (Gas Jet) ที่ผ่านช่องเปิดของแผ่นกระจายแก๊สต่อความต้านทานที่เกิดขึ้น เนื่องจากน้ำหนักของแข็ง ถ้าพลังงานจลน์มีค่ามากกว่าน้ำหนักของแข็ง กระแสแก๊สจะผลักดันอนุภาคของแข็งขึ้นไปได้ แต่ถ้าพลังงานจลน์มีค่าน้อย จะ

เกิดปรากฏการณ์ร่วงหล่นลงของอนุภาคผ่านแผ่นกระจายแก๊ส และไม่เกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไรซ์ตามที่ต้องการ ดังนั้นสมมูลของแรงสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$(\text{Kinetic Energy Through Orifice}) = \left(\frac{1}{2} \text{ to } \frac{3}{4}\right) (\text{Resistance by Solid weight}) \quad (2.40)$$

$$\frac{\rho_g \cdot U_o^2}{2 \cdot g_c} = \left(\frac{1}{2} \text{ to } \frac{3}{4}\right) \left(\frac{1}{A_t} \cdot W_{bed}\right) \quad (2.41)$$

$$U_{or} = (0.7 \text{ to } 0.85) \left(2 \cdot g_c \cdot \frac{\Delta P_{bed}}{\rho_g}\right)^{1/2} \quad (2.42)$$

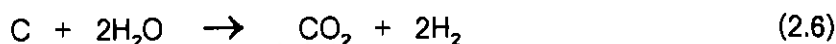
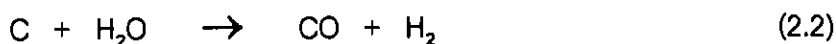
ทั้งสมการ 2.38 และ 2.42 สามารถนำไปใช้ในการออกแบบแผ่นกระจายแก๊สแบบชนิดแผ่นเรียบได้ โดยมีความแตกต่างกันไม่มากนัก

2.4 กายภาพของระบบการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบฟลูอิดไรซ์ (Physical of fluidized Gasification System)

ปรากฏการณ์ทางกายภาพที่เกิดขึ้นในกระบวนการแก๊สซิฟายมีความสำคัญพอ ๆ กับปรากฏการณ์ทางเคมี สิ่งสำคัญที่ควรพิจารณาได้แก่ ความดันที่ต้องการเพื่อจะให้เกิดการไหลของสารที่ทำปฏิกิริยาและผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นผ่านชั้นของก้อนเชื้อเพลิง การเคลื่อนที่ของของไหลและอนุภาคของแข็งเพื่อให้เกิดการผสมกันโดยตรงอย่างทั่วถึง ทั้งในแนวตามความยาวและในแนวรัศมีของเครื่องปฏิกรณ์เคมี อัตราการถ่ายโอนความร้อนและมวลสารที่พื้นผิวสัมผัส อิทธิพลของแฟกเตอร์เหล่านี้ย่อมส่งผลถึงปรากฏการณ์ทางเคมีของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น นอกจากนี้อัตราการลดลงของความดันการถ่ายโอนมวลสารและความร้อนยังมีความสัมพันธ์อย่างสลับซับซ้อนต่ออุณหภูมิ ความเร็วของแก๊ส สมบัติทางกายภาพของของไหลและสมบัติในการเคลื่อนที่ของของไหล ความหนาแน่น ความหนืด ค่าการนำความร้อนและความสามารถในการแพร่กระจายมวลสาร ส่วนสมบัติของของแข็ง ได้แก่ ความหนาแน่นโดยรวม (Bulk Density) ขนาดและปริมาณพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific Area) ปริมาตรของช่องว่าง (Void Volume) ความสามารถแพร่กระจายความร้อน (Thermal Diffusivity) และตัวแปรอื่น ๆ

2.5 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

(1) Haslam, R.T., Hitchcock, F.L. and Rudow, E.W. ⁽¹⁴⁾ ได้ศึกษาปฏิกิริยา วอเตอร์-แก๊ส (Water-Gas Reaction) ที่อุณหภูมิ 650-1200 องศาเซลเซียส สรุปได้ว่าปฏิกิริยาที่สำคัญ คือ



โดยเสนอกกลไกการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวคาร์บอนและปฏิกิริยาเป็นแบบโมเลกุลเดียว (Monomolecular Reaction) อัตราการเกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 900 องศาเซลเซียส คือ

$$[\text{CO}_2] = 0.5([\text{H}_2\text{O}] - [\text{H}_2\text{O}]^2) \quad (2.43)$$

ที่อุณหภูมิสูงกว่า 900 องศาเซลเซียส คือ

$$[\text{CO}_2] = 0.47([\text{H}_2\text{O}] - [\text{H}_2\text{O}]^{1.85}) \quad (2.44)$$

ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 900 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยา (2.2) จะไม่เกิด แต่ปฏิกิริยา (2.10) จะมีอัตราเร็วเป็น 2 เท่าของปฏิกิริยา (2.6)

ส่วนที่อุณหภูมิมากกว่า 900 องศาเซลเซียส อัตราเร็วของปฏิกิริยา (2.10) จะเป็น 2.18 เท่าของปฏิกิริยา (2.2) การเพิ่มความดันจะมีผลให้อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์มากขึ้น

(2) Scott, G.S. ⁽¹⁵⁾ ศึกษากลไกการสลายตัวของไอน้ำในปฏิกิริยาแกสซิฟิเคชันถ่านหินลิกไนต์ ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1000 °C ปฏิกิริยาปฐมภูมิที่เกิดขึ้น คือ



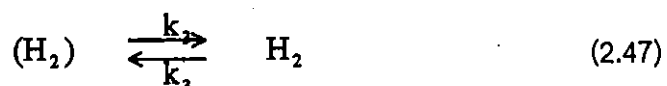
โดยแก๊สแห่งที่เป็นผลิตภัณฑ์ประกอบด้วย $33\frac{1}{3}\%$ CO_2 และ $66\frac{2}{3}\%$ H_2 อัตราเร็วการเกิดปฏิกิริยาทั้งหมด (Over-All Reaction) ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส มีอันดับของปฏิกิริยา (Order of Reaction) = 2 และมีค่าพลังงานกระตุ้น (Activation Energy) เป็น 26 กิโลแคลอรี/โมล

(3) Goring, G.E., Curran, G.P., Zielke, C.W., และ Everett Gorin ⁽¹⁶⁾ ได้ศึกษาอิทธิพลของความดันและปริมาณคาร์บอนที่ถูกเผาไหม้หมดไปต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของถ่านด้วยแก๊สผสมระหว่าง ไอน้ำ-แก๊สไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิ 1600 °C สรุปว่าการเพิ่มขึ้นของจำนวนคาร์บอน

ที่เผาไหม้ จะเป็นเหตุให้เกิดการลดอัตราเร็วปฏิกิริยาทั้งหมดของปฏิกิริยาแกสฟิเคชันและอัตราเร็วปฏิกิริยาการผลิตแก๊สมีเทน แต่เมื่อเพิ่มความดันในระบบ จะเพิ่มอัตราเร็วทั้งหมดและอัตราเร็วปฏิกิริยาการผลิตแก๊สมีเทน และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไอน้ำ อัตราส่วนของ H_2/H_2O จะลดลง แต่จะเพิ่มอัตราเร็วทั้งหมดของปฏิกิริยาแกสฟิเคชันและปฏิกิริยาการผลิตแก๊สมีเทน จากการทดลองของ Hunt, et. al. ⁽¹⁷⁾ โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบอินทีเกรต-เบดนิ่ง (Integrate Fixed-Bed Reactor) วัดอัตราการเกิดปฏิกิริยาแกสฟิเคชันของถ่านหินด้วยไอน้ำ ที่อุณหภูมิระหว่าง 980 – 1370 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศพบว่าที่อุณหภูมิต่ำ ๆ อัตราเร็วของปฏิกิริยาถูกควบคุมโดยปฏิกิริยาเคมี มีค่าพลังงานกระตุ้นประมาณ 45 กิโลแคลอรี/โมล อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิสูง ๆ ค่าพลังงานกระตุ้นจะลดลง และอิทธิพลจากการแพร่จะเป็นขั้นตอนที่ควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยา

(4) Pilcher, et. al. ⁽¹⁸⁾ ได้ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ และความดันย่อยของไอน้ำ ที่มีผลต่ออัตราเร็วปฏิกิริยา โดยใช้เทคนิคความร้อนสมดุล (Thermobalance) ที่อุณหภูมิ 800 – 1450 องศาเซลเซียส ความดันย่อยไอน้ำ 30-360 มม.ปรอท ได้ค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยา เป็น 40.7 กิโลแคลอรี/โมล ที่อุณหภูมิ 1000-1100 องศาเซลเซียส สำหรับที่อุณหภูมิสูงกว่านี้ อัตราการแพร่จะเป็นขั้นตอนที่ควบคุมปฏิกิริยา อันดับของปฏิกิริยาปรากฏ (Apparent Reaction Order) มีค่าเป็น 0.66 และอัตราส่วน CO/CO_2 จะมีค่ามากตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นแต่จะเป็นอัตราส่วนกลับต่อความดันย่อยของไอน้ำ ซึ่งผลการทดลองนี้ตรงกับผลการทดลองของ May, et. al, (1958) ⁽⁵⁾, Goring, et. al, (1953) ⁽¹⁶⁾ และ Klei, et. al, (1975) ⁽¹⁹⁾

(5) Von Ferdersdoff, et. al, ⁽³⁾ ได้เสนอแนะกลไกการเกิดปฏิกิริยาของ $C-H_2O$ โดยเกิดสมดุลการดูดซับ (Equilibrium Adsorption) ของไอน้ำบนผิวของคาร์บอน หลังจากนั้นจะเกิดปฏิกิริยาเคมีบนพื้นผิวของคาร์บอน แก๊สไฮโดรเจนซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จะเกิดปฏิกิริยาสมดุลและหลุดตัวออกจากผิวของคาร์บอนเข้าสู่กระแสของแก๊สต่อไป



$$r = k_f \cdot \sigma_c \cdot P_{H_2O} (1 - P_{H_2} + P_{H_2O}) \quad (2.48)$$

$k_1 = k_1 k_2 / k_1$; $\alpha = k_3 / k_3$; $\beta = k_1 / k_1$; $\sigma_c =$ Active Surface Area ต่อมา

(6) Ergun ⁽²⁰⁾ ได้ศึกษาปฏิกิริยาแกสฟายของคาร์บอน และเสนอกฎการเกิดปฏิกิริยาของ C-H₂O และ C-CO₂ และเขียนสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาโดยใช้สมการดูดซับของ แลงมารีไฮน์เชลวูด (Langmuir-Hinshelwood) โดยมีสมมุติฐานว่า การดูดซับของแกสที่จะเข้าทำปฏิกิริยาบนผิวคาร์บอน และการคายตัวของผลิตภัณฑ์มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว

$$r = k \cdot \sigma_c / (1 + P_{H_2} / P_{H_2O}) \quad (2.49)$$

$r =$ อัตราเร็วปฏิกิริยา (Reaction Rate of C-H₂O)

$k =$ ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยา (Reaction Rate Constant)

$\sigma_c =$ ปริมาณพื้นที่ผิวที่ว่างไว้ปฏิกิริยา (Active Surface Area)

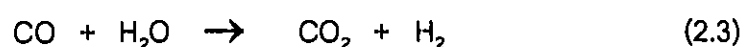
$\alpha =$ อัตราส่วนค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาไปข้างหน้าและปฏิกิริยากลับหลังของปฏิกิริยาการดูดซับแกสไฮโดรเจน

$\beta =$ อัตราส่วนค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาไปข้างหน้าและปฏิกิริยากลับหลังของปฏิกิริยาการดูดซับไอน้ำ

P_{H_2O} , $P_{H_2} =$ ความดันย่อยของไอน้ำและไฮโดรเจน

(7) May, et. al. ⁽⁵⁾ ได้ศึกษาปฏิกิริยาชิฟต์ (Shift Reaction) และปฏิกิริยา C-H₂O สรุปว่าอัตราเร็วของปฏิกิริยาชิฟต์ช้ากว่าปฏิกิริยาระหว่าง C-H₂O อย่างมากและอัตราเร็วของปฏิกิริยาจะลดลงตามอุณหภูมิ

(8) Von Fredersdorf และ Elliot ⁽³⁾ ได้ศึกษาปฏิกิริยา C-H₂O ว่ามีปฏิกิริยาที่สำคัญคือ



โดยปฏิกิริยา 2.2 และปฏิกิริยา 2.3 เกิดขึ้นบนผิวสัมผัสของของแข็งและแก๊ส แต่ปฏิกิริยา 2.3 อาจเกิดขึ้นในวัฏภาคแก๊สก็ได้ ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาชิฟต์จะมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ

(9) Leven Spiel ⁽²¹⁾ และ Wen ⁽²²⁾ ได้เสนอแบบจำลองของการเกิดปฏิกิริยาของอนุภาคของแข็งกับแก๊ส เรียก "The Shrinking Core Model" โดยเสนอว่า ในขั้นแรก ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นที่ผิวด้านนอกสุดของของแข็ง เมื่อเวลาผ่านไปผิวของอนุภาคที่จะเกิดปฏิกิริยาจะหดตัว โดยมีชั้นของเถ้าถ่านหุ้มไว้ข้างนอกแทน ดังนั้น จึงเกิดความต้านทานการเกิดปฏิกิริยา ดังนี้

1. การแพร่ของแก๊สเข้าทำปฏิกิริยาผ่านฟิล์มที่หยุดนิ่งของแก๊ส ซึ่งห่อหุ้มอนุภาคไว้
2. การแพร่ของแก๊สผ่านชั้นของเถ้าถ่าน
3. ปฏิกิริยาเคมีบนพื้นผิวของของแข็ง

ขั้นตอนทั้งสามที่เกิดขึ้นขั้นตอนใดขั้นตอนหนึ่ง อาจจะเป็นขั้นตอนที่ควบคุมอัตราเร็วการเกิดปฏิกิริยาได้ ขึ้นกับภาวะการเกิดปฏิกิริยาของระบบ

(10) Jensen ⁽²³⁾ ได้ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาแก๊สฟิเคชันของถ่านหินด้วยไอน้ำ ในเตาปฏิกรณ์เคมีแบบฟลูอิดไธซ์ ที่อุณหภูมิ 1000-1300 °ซ โดยพบว่า อัตราเร็วของปฏิกิริยาถูกควบคุมโดยปฏิกิริยาเคมีบนพื้นผิวของคาร์บอน โดยมีค่าพลังงานกระตุ้น 19.8 กิโลแคลอรี/โมล ซึ่งผลการทดลองเข้าได้ดีกับแบบจำลองแบบแกนกลางหดตัว (The Shrinking Core Model) อุณหภูมิที่ดีที่สุดสำหรับปฏิกิริยานี้อยู่ระหว่าง 1100-1200 องศาเซลเซียส เพราะว่าให้ค่าความว่องไวการเกิดปฏิกิริยาสูงมาก และปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผลิตภัณฑ์มีน้อย แต่อย่างไรก็ตาม ค่าพลังงานกระตุ้นที่ทดลองได้ค่อนข้างจะมีค่าต่ำ

ส่วนปฏิกิริยาซิฟต์เกิดขึ้นน้อยมากที่ผิวของอนุภาค เนื่องจากมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาช้า แต่เมื่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา และหลุดตัวออกจากผิวของคาร์บอน โดยแพร่ผ่านชั้นของเถ้า (Ash Layer) ที่ห่อหุ้มอยู่ ทำให้เวลาในการสัมผัสกันกับไอน้ำที่แพร่สวนทางเข้าไปในชั้นของเถ้า มีมากพอที่จะเกิดปฏิกิริยาออกเทอร์-แก๊ส ซิฟต์ ได้ และเป็นที่ทราบกันว่าองค์ประกอบของธาตุบางชนิดในเถ้า มีสมบัติเป็นตัวเร่งการเกิดปฏิกิริยานี้ด้วย ดังนั้นจึงพบว่าอนุภาคนาขนาดใหญ่จะมีความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นเร็วกว่าอนุภาคนาขนาดเล็ก

(11) Riede และ Havesian ⁽²⁴⁾ ได้ทดลองปฏิกิริยาแก๊สฟิเคชันระหว่างอุณหภูมิ 500 -900 องศาเซลเซียส ความดันย่อยระหว่าง 70 -120 มม.ปรอท ความเร็วของแก๊ส 5-15 ชม./วินาที พบว่าอัตราเร็วของปฏิกิริยาถูกควบคุมโดยปฏิกิริยาเคมีพื้นผิว ค่าพลังงานกระตุ้น 16.4 กิโลแคลอรี/โมล

(12) Chan และ Papić⁽²⁶⁾ ได้ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาระหว่างถ่านหินกับไอน้ำในเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่ความดันปกติ อุณหภูมิ 800-1000 องศาเซลเซียส พบว่าผลิตภัณฑ์ประกอบด้วย H_2 , CO_2 , CO โดยอัตราเร็วปฏิกิริยาไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมาก ผลการทดลองเข้าได้ดีกับแบบจำลองแบบแกนกลางขาดตัว โดยให้ค่าพลังงานกระตุ้น 32.7 กิโลแคลอรี/โมล

(13) Satyanarayana Katta, et al.⁽²⁶⁾ ได้ศึกษาปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอน-ไอน้ำ และคาร์บอน-แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในเตาปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไรซ์ที่อุณหภูมิ 920-1040 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ อธิบายอัตราเร็วปฏิกิริยาโดยใช้สมการ Langmuir-Hinshelwood และแบบจำลองของ Eugun โดยที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิและองค์ประกอบของแก๊ส พบว่าอัตราเร็วของปฏิกิริยา $C-H_2O$ เป็น 2.5-5 เท่าของปฏิกิริยา $C-CO_2$ ที่อุณหภูมิ 950-1040 องศาเซลเซียส ค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยา $C-H_2O$ มีค่าเท่ากับ 48.2 กิโลแคลอรี/โมล ของปฏิกิริยา $C-CO_2$ เท่ากับ 69 กิโลแคลอรี/โมล

(14) จากการศึกษาปฏิกิริยาแก๊สซิไฟเอชันด้วยแก๊สผสมของไอน้ำและแก๊สออกซิเจน โดย Mark J. Purdy et al.⁽²⁷⁾ ในเตาปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไรซ์ โดยการเปลี่ยนค่าอุณหภูมิและอัตราส่วนของไอน้ำต่อคาร์บอนที่ป้อนเข้าทำปฏิกิริยา พบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยของเตาและอัตราส่วนโมลของไอน้ำต่อคาร์บอนเป็นฟังก์ชันที่สำคัญมากต่ออัตราการเกิดของแก๊สผลิตภัณฑ์ ถ้าเพิ่มอัตราส่วนดังกล่าว จะมีผลให้อัตราการเกิดของแก๊สผลิตภัณฑ์เพิ่มมากขึ้น

(15) Martin Schmal, et al.⁽²⁸⁾ ได้ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาแก๊สซิไฟเอชันด้วยไอน้ำ ด้วยเครื่องมือสมดุทางความร้อนในภาวะที่เรียกว่า Isothermal ที่อุณหภูมิ 800 - 1000 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศขนาดอนุภาค $-14+20$ เทลเลอร์เมต โดยทำการไล่สารระเหยออกก่อน (Devolatiled) ผลการทดลองอธิบายได้ดีด้วยแบบจำลองแกนกลางปราศจากปฏิกิริยา (Unreacted Core Model) ที่อุณหภูมิมากกว่า 850 องศาเซลเซียส และอธิบายได้ดีด้วยแบบจำลองต่อเนื่อง (Continuous Model) ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 850 องศาเซลเซียส

(16) D. Khummongkol and W. Arunlaksadamrong⁽²⁹⁾ ศึกษาการแก๊สซิไฟเอชันไม้โกงกางในเตาผลิตแก๊สแบบ Updraft gasifier โดยศึกษาขนาดของไม้โกงกางที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ความยาว 2, 3, 4 และ 5 เซนติเมตร และอัตราการป้อนอากาศ 0.37, 0.44, 0.5 และ 0.98 กิโลกรัม ต่อ นาที แก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้วิเคราะห์โดยเครื่อง gas chromatography ค่า energy content ที่เหมาะสม, อัตราการผลิตแก๊สที่เหมาะสม, ความเข้มข้น

ชั้นของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เหมาะสม และความเข้มข้นของแก๊สมีเทนที่เหมาะสมในแต่ละ การทดลองมาสร้างเป็นเส้นชั้นความสูงเพื่อหาเส้นชั้นความสูงสำหรับค่าความร้อนต่ำสุดที่เหมาะสมสำหรับแก๊สเชื้อเพลิง คือที่ค่า energy content สูงสุด 3.666 เมกะจูล ต่อ ลูกบาศก์เมตร ค่ากำลังที่เกิดขึ้นในทางเคมีมากที่สุดที่ค่า 2.721 กิโลจูล ต่อ นาที่ ซึ่งภาวะในการทดลองที่ อัตรา การไหลของอากาศ 0.51 กิโลกรัม ต่อ นาที่ และขนาดไม้โคงกางยาว 3 เซนติเมตร โดยค่าความ เข้มข้นของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จะมีค่าสูงกว่าร้อยละ 28.77 โดยปริมาตร เมื่ออัตราการไหล ของอากาศ 0.44 และ 0.51 กิโลกรัม ต่อ นาที่ และขนาดของไม้โคงกางยาว 2 และ 3 เซนติเมตร และ ค่าความเข้มข้นของแก๊สมีเทนจะสูงกว่าร้อยละ 4.98 โดยปริมาตร เมื่ออัตรา การไหลของอากาศสูงกว่า 0.58 กิโลกรัม ต่อ นาที่ และขนาดไม้โคงกางสั้นกว่า 2 เซนติเมตร

(17) Li Shufen and Xiao Xinyan ⁽³⁰⁾ ศึกษาผลของความดัน และอุณหภูมิที่มีต่อ อัตราการแกสซิฟิเคชันถ่านชาร์จากค่าการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอน, อัตราการแกสซิฟิเคชันจำเพาะ และค่าคงที่อัตราเร็ว ใน packed bed balance reactor โดยใช้ภาวะที่ความดัน 0.098, 0.98, 1.96, 2.45 เมกะพาสคัล, ขนาดของถ่านชาร์ 180 ถึง 250 ไมโครเมตร, น้ำหนักถ่านชาร์ 650 มิลลิกรัม, อัตราการไหลของแก๊สผสมระหว่างปริมาณไอน้ำร้อยละ 25 กับแก๊สไนโตรเจน 50 ลิตร ต่อ ชั่วโมง และที่อุณหภูมิ 1023, 1073, 1123, 1173, 1223 และ 1273 องศาเซลเซียส พบว่า ผลของการเพิ่มความดัน และอุณหภูมิจะมีผลทำให้การเปลี่ยนแปลงของคาร์บอน, อัตราการแกสซิ ฟิเคชัน และค่าคงที่อัตราเร็วมีค่าเพิ่มขึ้น

(18) P. K. Chatterlee, A. B. Datta and K. M. Kundu ⁽³¹⁾ ศึกษาการแกสซิฟิเคชันถ่านหินอินเดียนที่มีปริมาณเถ้าสูง คือ บิทูมินัส และ coke - breeze โดยใช้อากาศกับไอน้ำใน การทำให้เกิดสภาวะฟลูอิดไรซ์เบด ภายใต้ความดันบรรยากาศ ศึกษาผลกระทบของไอน้ำ และ อากาศที่มีต่อองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง, การเปลี่ยนแปลงของคาร์บอน และไอน้ำ, calorific value, อุณหภูมิเฉลี่ยของเบด และเปรียบเทียบปริมาณแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ คำนวณได้ในทางคณิตศาสตร์ โดยภาวะที่ใช้ในการทดลองที่ความสูงของเบด 600 มิลลิเมตร, อุณหภูมิของเบด 750 ถึง 1000 องศาเซลเซียส, ความเร็วของการฟลูอิดไรซ์ 0.5 ถึง 1.0 เมตร ต่อ วินาที, อัตราการไหลของอากาศ 10 ถึง 35 กิโลกรัม ต่อ ชั่วโมง, อัตราการไหลของไอน้ำ 3 ถึง 12 กิโลกรัม ต่อ ชั่วโมง และอัตราการป้อนถ่านหิน 10 กิโลกรัม ต่อ ชั่วโมง พบว่าผลของอัตรา การไหลของไอน้ำที่มีต่อองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง, อุณหภูมิของเบด และ calorific value คือ ที่อัตราการไหลของไอน้ำต่ำ ปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์จะมากกว่าปริมาณของ ไฮโดรเจน การเพิ่มอัตราการไหลของไอน้ำจะไปลดอุณหภูมิของเบดทำให้ calorific value ต่ำลง

แต่ที่อุณหภูมิสูงๆจะมีผลทำให้ค่า calorific value ลดลง อุณหภูมิที่เหมาะสมในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่ดี คือ ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส สำหรับ coke - breeze และที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส สำหรับ ถ่านหินบิทูมินัส ปริมาณออกซิเจนมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอน คือ เมื่อปริมาณออกซิเจนเพิ่มขึ้นมีผลทำให้การเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนเพิ่มขึ้น อัตราการไหลของไอน้ำมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคาร์บอน และไอน้ำ คือ เมื่ออัตราการไหลของไอน้ำเพิ่มขึ้น ทำให้อุณหภูมิของเบดลดลงเป็นผลให้การเปลี่ยนแปลงของคาร์บอน และไอน้ำลดลง จากค่า calorific value ของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้มีค่า 4 เมกะจูล ต่อ ลูกบาศก์เมตร (ที่อุณหภูมิ และความดันมาตรฐาน) ปริมาณแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากการทดลองเทียบกับค่าที่คำนวณได้ในทางคณิตศาสตร์มีค่าแตกต่างกันร้อยละ 12

(19) จิระศักดิ์ แสงพุ่ม ⁽³²⁾ ศึกษาภาวะที่เหมาะสมของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่ออกแบบขึ้นในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงด้วยเทคนิคฟลูอิดเซชันเพื่อให้ได้โปรดิวเซอร์แก๊สปริมาณสูงพอที่จะนำไปใช้ในเครื่องยนต์แบบสันดาปภายใน โดยศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศ, ขนาดของถ่านไม้ ที่ขนาด 2 ถึง 4 มิลลิเมตร และ ขนาด 4 ถึง 6 มิลลิเมตร และอัตราการป้อนถ่านไม้โดยที่ขนาดของถ่านไม้ 2 ถึง 4 มิลลิเมตร อัตราการป้อนถ่านไม้เป็น 130, 162 และ 280 กรัม ต่อ นาที และถ่านไม้ขนาด 4 ถึง 6 มิลลิเมตร อัตราการป้อนถ่านไม้เป็น 88, 99, 132, 157 และ 195 กรัม ต่อ นาที จากการทดลองพบว่า อุณหภูมิในช่วง 900 ถึง 1100 องศาเซลเซียส สามารถผลิตปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ดีที่สุด ภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงด้วยเทคนิคฟลูอิดเซชัน คือ ถ่านไม้ขนาด 4 ถึง 6 มิลลิเมตร, อัตราการป้อนถ่านไม้ 99 กรัม ต่อ นาที, อัตราการป้อนอากาศ 0.29 ลูกบาศก์เมตร ต่อ นาที, ความสูง 60 เซนติเมตร, อุณหภูมิของเบดประมาณ 1100 องศาเซลเซียส จะทำให้สามารถผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่มี แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นองค์ประกอบร้อยละ 27.5 โดยปริมาตร สามารถนำไปใช้กับเครื่องยนต์สันดาปภายในขนาด 1600 ลูกบาศก์เซนติเมตรได้อย่างดี แรงงานที่ได้ประมาณ 4.6 แรงม้า ใช้หมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 5 กิโลวัตต์ โดยไม่เกิดปัญหาขัดข้อง

(20) วรเดช เพริศพรายวงศ์ ⁽³³⁾ ศึกษาการทำงานของเครื่องมือฟลูอิดซ์เบดสำหรับการเผาไหม้ถ่านลิกไนต์ และศึกษาถึงผลของความเร็วของอากาศ และผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการเผาไหม้เพื่อนำความร้อนที่เกิดไปใช้ประโยชน์โดยตรง โดยใช้ถ่านหินขนาด 1 ถึง 2 มิลลิเมตร อัตราการไหลของอากาศ 0.06 ถึง 0.36 ลูกบาศก์เมตร ต่อ นาที หรือ ด้วยความเร็วของอากาศ 76.08 ถึง 98.20 เซนติเมตร ต่อ วินาที จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า อัตราการป้อนถ่านลิกไนต์จะมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิของการเผาไหม้ และปริมาณอากาศที่ป้อนเข้า

สู่ระบบเพื่อจะทำให้การเผาไหม้เกิดขึ้นได้ดีและต่อเนื่อง คือ เมื่ออุณหภูมิของการเผาไหม้ หรือ ปริมาณอากาศเพิ่มขึ้น อัตราการป้อนถ่านลิกไนต์ต้องเพิ่มขึ้นเช่นกัน ความเร็วของอากาศที่ทำให้ เกิดฟลูอิดซ์ 76.08 ถึง 98.02 เซนติเมตร ต่อ วินาที หรือประมาณ 1.55 ถึง 2.00 เท่าของ ความเร็วต่ำสุดในการทำให้เกิดฟลูอิดซ์ ภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ประสิทธิภาพของการเผาไหม้สูง สุดร้อยละ 89.57 ที่อุณหภูมิของการเผาไหม้ 900 องศาเซลเซียส และความเร็วของอากาศ 98.20 เซนติเมตร ต่อ วินาที



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย