



วารสารปริทัศน์

2.1 ก๊าซซิฟิเคชัน (Gasification)

2.1.1 วิวัฒนาการของกระบวนการก๊าซซิฟิเคชัน (2)

แรกเริ่มประมาณปี ค.ศ. 1800 มีการนำเอาก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเชื้อเพลิงแข็ง เช่น ถ่านหินหรือชีวมวลมาใช้งาน กรรมวิธีที่ใช้ในการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงก็คือ การไพโรไลซิส (pyrolysis) เชื้อเพลิงแข็งที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก

เตาผลิตก๊าซในระยะแรกเป็นแบบใช้อากาศ (air blown type) โดยที่ใส่ถ่านโค้ก ถ่านหินหรือถ่านไม้ ลงไปในท่อทรงกระบอกเหนือแผ่นรองรับที่มีรูพรุน (perforated grate) และเป่าอากาศผ่านขึ้นไป ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ที่ได้เป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ นอกนั้นจะเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจนและมีเทนอีกเล็กน้อย เครื่องมือนี้มีปัญหาสำคัญในการใช้งานคือ น้ำมันทาร์ (tar) จำนวนมากที่ปะปนอยู่กับก๊าซผลิตภัณฑ์ ทำให้ไม่สามารถนำก๊าซนั้นไปใช้กับเครื่องยนต์ได้ จึงมีการพัฒนารูปแบบเตาผลิตก๊าซเป็น down-draught unit กล่าวคือ การดึงก๊าซผลิตภัณฑ์ ออกจากด้านล่างของเตา โดยผ่านเบดของคาร์บอน (bed of carbon) หรือถ่านที่เป็นเชื้อเพลิงเพื่อกำจัดน้ำมันทาร์ ทำให้ก๊าซที่ได้สะอาดขึ้น

ในช่วงปี ค.ศ. 1880-1920 ที่ประเทศเยอรมัน มีการปรับปรุงเครื่องมือให้สามารถใช้งานกับถ่านหินเกรดต่ำได้ โดยการออกแบบเตาผลิตก๊าซที่พิจารณาถึงการนำเอาแก๊สออกด้วย การพัฒนาครั้งนี้ทำให้เกิดรูปแบบเตาที่มีชื่อเสียงคือ Rotating grid type ซึ่งออกแบบโดย Kerpely ในปี ค.ศ. 1904

ระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 2 เกิดการขาดแคลนน้ำมันเชื้อเพลิง ทำให้มีการหันมาค้นคว้าพัฒนารูปแบบของเตาผลิตก๊าซให้ดีขึ้น ในช่วงนั้นก๊าซเชื้อเพลิงถูกนำไปใช้แทนน้ำมันในรถยนต์ รถบรรทุก รถแทรกเตอร์ เรือยนต์ รถมอเตอร์ไซด์ และเครื่องสับเปลี่ยนแรงรถไฟ เตาผลิตก๊าซได้รับการพัฒนา เพื่อให้สามารถนำไปใช้ได้ทั้งเครื่องยนต์ดีเซลและเครื่องยนต์ Otto โดยมากเตาผลิตก๊าซที่นำไปใช้กับรถยนต์ มีขนาดเล็กและส่วนใหญ่จะใช้ Fischer Tropsch Process เป็นขั้นตอนในการผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากถ่านหิน

หลังสงครามโลก ในทศวรรษที่ 1950-1960 ผลิตภัณฑ์ทางด้านปิโตรเลียมหาได้ง่ายขึ้นอีกทั้งยังมีราคาถูก การใช้งานก็สะดวก เป็นเหตุให้การใช้ก๊าซเชื้อเพลิงจากกระบวนการ

ก๊าซซิณีเคชันลดลงจนแทบจะหมดไป ที่ยังเหลือให้อยู่ ก็ไม่มีการพัฒนากระบวนการให้ดีขึ้นแต่อย่างใด
ปี ค.ศ. 1973-1974 เกิดวิกฤตการณ์การขาดแคลนน้ำมันขึ้นอีก เนื่องจากการ
ไม่ส่งออกน้ำมันของกลุ่มประเทศผู้ผลิต ประเทศที่พัฒนาแล้วและกำลังพัฒนา จึงเริ่มหันมาสนใจฟื้นฟู
กระบวนการก๊าซซิณีเคชัน สำหรับประเทศที่พัฒนาแล้ววัตถุประสงค์หลักคือ ผลิตก๊าซสังเคราะห์โดย
กระบวนการก๊าซซิณีเคชันที่ใช้ออกซิเจนหรืออากาศเท่านั้น เพื่อนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการขนส่ง
และเครื่องทำความร้อน จึงเป็นเหตุให้ความสนใจทั้งหมดมุ่งไปสู่ air blown gasifier ที่มี
ขนาดเล็ก

2.1.2 ทฤษฎีก๊าซซิณีเคชัน (3,4,5)

ก๊าซซิณีเคชัน (Gasification) หรือกระบวนการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง เป็น
กระบวนการแปรสภาพเชื้อเพลิงแข็งเช่น ถ่านหิน ถ่านไม้ เป็นต้น ให้อยู่ในรูปเชื้อเพลิงที่เป็นก๊าซ
ดังเช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ไฮโดรเจน (H_2) มีเทน (CH_4) กระบวนการดังกล่าวเป็น
กระบวนการเปลี่ยนแปลงทางเทอร์โมเคมีคอล (Thermochemical conversion process)
ได้จากปฏิกิริยาของคาร์บอนกับออกซิเจนและ/หรือไอน้ำ ที่อุณหภูมิสูงๆ ความดันตั้งแต่ 1 บรรยากาศ
ขึ้นไป ปฏิกิริยาเกิดขึ้นหลายขั้นตอนมีทั้งปฏิกิริยาคูดความร้อนและคายความร้อน ก๊าซเชื้อเพลิง
ประกอบด้วยก๊าซผสมของ CO และ H_2 เรียกว่า โพรดิวเซอร์ก๊าซ (Producer gas)

โพรดิวเซอร์ก๊าซ เกิดจากปฏิกิริยาการเผาไหม้แบบไม่สมบูรณ์ (Incomplete
combustion) ของคาร์บอนไปเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ และปฏิกิริยารีดักชันของคาร์บอนไดออกไซด์
และไอน้ำ ไปเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน

ปฏิกิริยาการเผาไหม้พื้นฐาน (Fundamental combustion reactions)

เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างคาร์บอนกับอากาศและ/หรือไอน้ำ ดังแสดงในตารางที่ 2.1
ปฏิกิริยาเหล่านี้มีการศึกษามานานแล้ว นับได้ว่าเป็นปฏิกิริยาพื้นฐานที่สามารถนำมาอธิบายกระบวนการ
การเผาไหม้ต่าง ๆ ได้

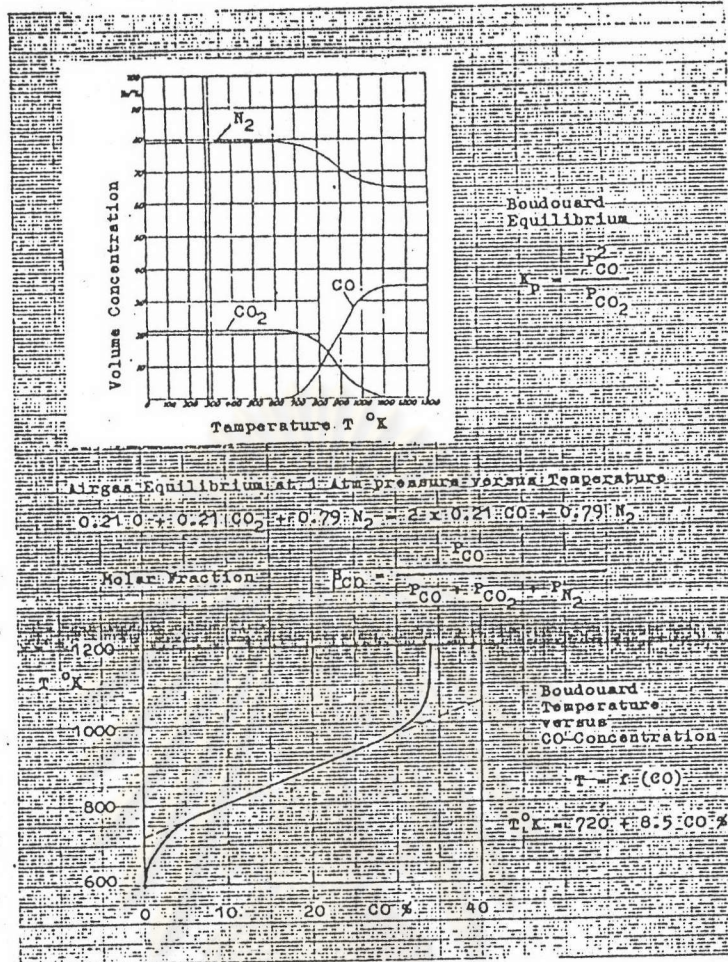
ตารางที่ 2.1 ปฏิกิริยาการเผาไหม้พื้นฐาน (4)

ปฏิกิริยา	เครื่องหมาย	ΔH		
		cal/gmole	KJ/Kgmole	Btu/lbmole
1. $C + O_2 \rightarrow CO_2$	-	94,410	408,632	169,938
2. $C + 1/2O_2 \rightarrow CO$	-	27,056	123,092	48,701
3. $C + CO_2 \rightarrow 2CO$	+	40,298	162,448	72,536
4. $CO + 1/2O_2 \rightarrow CO_2$	-	67,355	285,540	121,239
5. $C + H_2O \rightarrow CO + H_2$	+	32,454	118,905	58,917
6. $C + 2H_2O \rightarrow CO_2 + 2H_2$	+	24,610	75,362	44,298
7. $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$	-	7,844	43,543	14,119

- หมายเหตุ 1. ปฏิกิริยาทดลองที่สภาวะ 1200°K (1700°F, 927°C) ความดัน 1 บรรยากาศ
คาร์บอนที่ใช้เป็นมาตรฐาน อยู่ในรูปของกราไฟท์
2. เครื่องหมายลบ หมายถึง ปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic reaction)
เครื่องหมายบวก หมายถึง ปฏิกิริยาดูดความร้อน (Endothermic reaction)

ปฏิกิริยาที่ 1 เป็นการเผาไหม้คาร์บอนในบริเวณที่มีออกซิเจนมากเกินพอ เกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนปฏิกิริยาที่ 2 เป็นการเผาไหม้คาร์บอนที่กำลังลุกแดงภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนไม่เพียงพอ

ปฏิกิริยาที่ 3 เรียกว่า "Boudouard reaction" เป็นปฏิกิริยาพื้นฐานของการผลิตโปรดิวเซอร์ก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนที่มากเกินพอ (Excess carbon) ในอนุภาคของแข็งเกิดเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ มีการศึกษาเกี่ยวกับความสามารถในการเข้าทำปฏิกิริยา (reactivity) ของเชื้อเพลิงต่าง ๆ พบว่าอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยา ขึ้นกับธรรมชาติของเชื้อเพลิงและลักษณะเฉพาะของผิว (surface characteristic) ของเชื้อเพลิง อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่ออุณหภูมิมากกว่า 950°ซ (รูปที่ 2.1) เนื่องจากมีการแตกตัวของคาร์บอนเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของเชื้อเพลิง เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่านี้

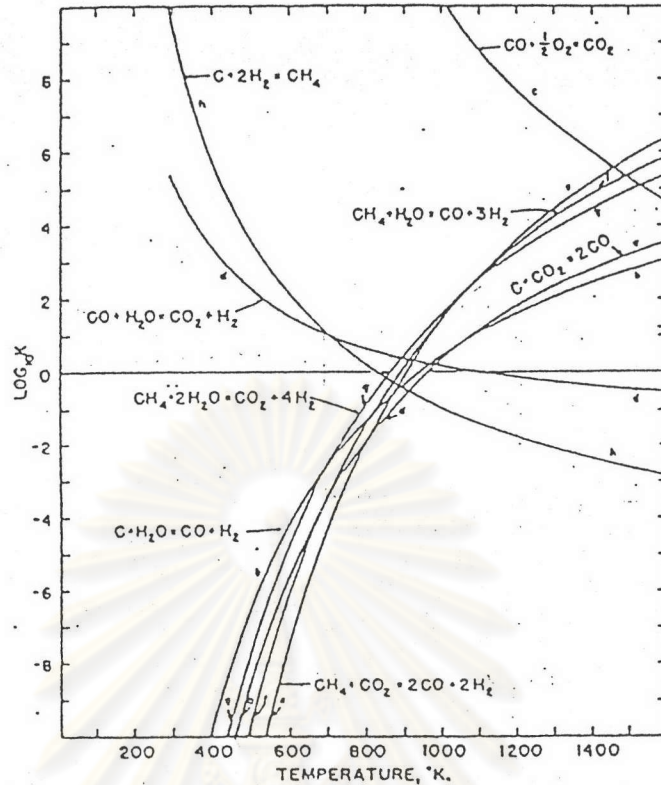


รูปที่ 2.1 แสดงกราฟของ Boudouard Equilibrium และอุณหภูมิในเตาผลิตก๊าซ (5)

ปฏิกิริยาที่ 4 จะเกิดขึ้นเมื่อมีออกซิเจนเหลืออยู่ คาร์บอนมอนอกไซด์จะรวมตัวกับออกซิเจนได้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์

ส่วนปฏิกิริยาที่ 5 และ 6 เป็นกรณีที่มีไอน้ำเข้าไปพร้อมอากาศ เกิดการแตกตัวของไอน้ำเข้าทำปฏิกิริยากับคาร์บอน และปฏิกิริยาที่ 7 เป็นปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนมอนอกไซด์กับไอน้ำได้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์กับไฮโดรเจน ปฏิกิริยานี้เรียกว่า Water gas shift reaction

ปฏิกิริยาเหล่านี้เป็นปฏิกิริยาผันกลับได้ (reversible) ถึงแม้ปัจจัยทางเวลาและสมดุลเกือบจะไม่มีผลเลยในการปฏิบัติงานจริง แต่ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่สมดุล (equilibrium constants) กับอุณหภูมิ ยังคงเป็นที่น่าสนใจมาก เพราะค่าคงที่ของสมดุลสามารถแปรค่าได้มากมาย เห็นได้ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของค่าคงที่ของสมดุล กับอุณหภูมิในแต่ละปฏิกิริยา

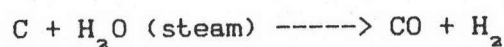
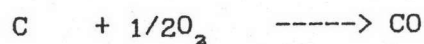


รูปที่ 2.2 กราฟระหว่างลอการิทึมของค่าคงที่ของสมดุล สำหรับปฏิกิริยาการเผาไหม้พื้นฐาน กับอุณหภูมิ (4)

2.1.3 ระบบการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง (6)

ในปัจจุบันกระบวนการก๊าซซิฟิเคชัน มีการทดลองอยู่ 3 ระบบคือ

1. การผลิตก๊าซเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำ (Low heating value gas or Low Btu gas) ก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้มีค่าความร้อนประมาณ $3.3-5.6 \text{ MJ/m}^3$ (90-150 Btu/SCF) เกิดจากการเผาไหม้บางส่วนของถ่านกับอากาศ โดยมากมักจะมีไอน้ำอยู่ด้วย ปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดขึ้นดังนี้

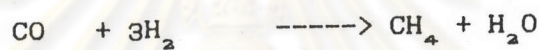


องค์ประกอบที่สามารถเผาไหม้ได้ (combustible components) ของก๊าซผลิตภัณฑ์คือคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน ซึ่งเจือจางอยู่ในคาร์บอนไดออกไซด์และไนโตรเจน

ก๊าซจะมีอุณหภูมิเปลวไฟ (flame temperature) ต่ำ ในปัจจุบันได้มีการนำมาใช้อย่างกว้างขวางในการผลิตไฟฟ้า สำหรับความต้องการของอุตสาหกรรมขนาดเล็ก

2. การผลิตก๊าซเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนปานกลาง (Medium heating value gas หรือ Medium Btu gas) ก๊าซเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนประมาณ 9.3-20.5 MJ/m³ (250-550 Btu/scf) กระบวนการนี้ใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ที่ได้จากการแยกออกจากอากาศ เพื่อใช้ในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วน (Partial oxidation) การที่ไม่มีไนโตรเจนจะทำให้ค่าความร้อนสูงขึ้น

3. การผลิตก๊าซเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนสูง (High heating value gas หรือ High Btu gas) ค่าความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้เทียบเท่ากับ Synthesis gas (SNG) ส่วนประกอบของก๊าซนี้มักเป็นก๊าซมีเทนเกือบบริสุทธิ์ ซึ่งจาก Medium Btu gas สามารถเปลี่ยนเป็น SNG ได้โดยกระบวนการเมทาเนชัน (Methanation) ที่อุณหภูมิต่ำ Catalytic Process เกิดปฏิกิริยาของก๊าซ CO และ H₂ เป็นก๊าซมีเทนและน้ำ ดังสมการ

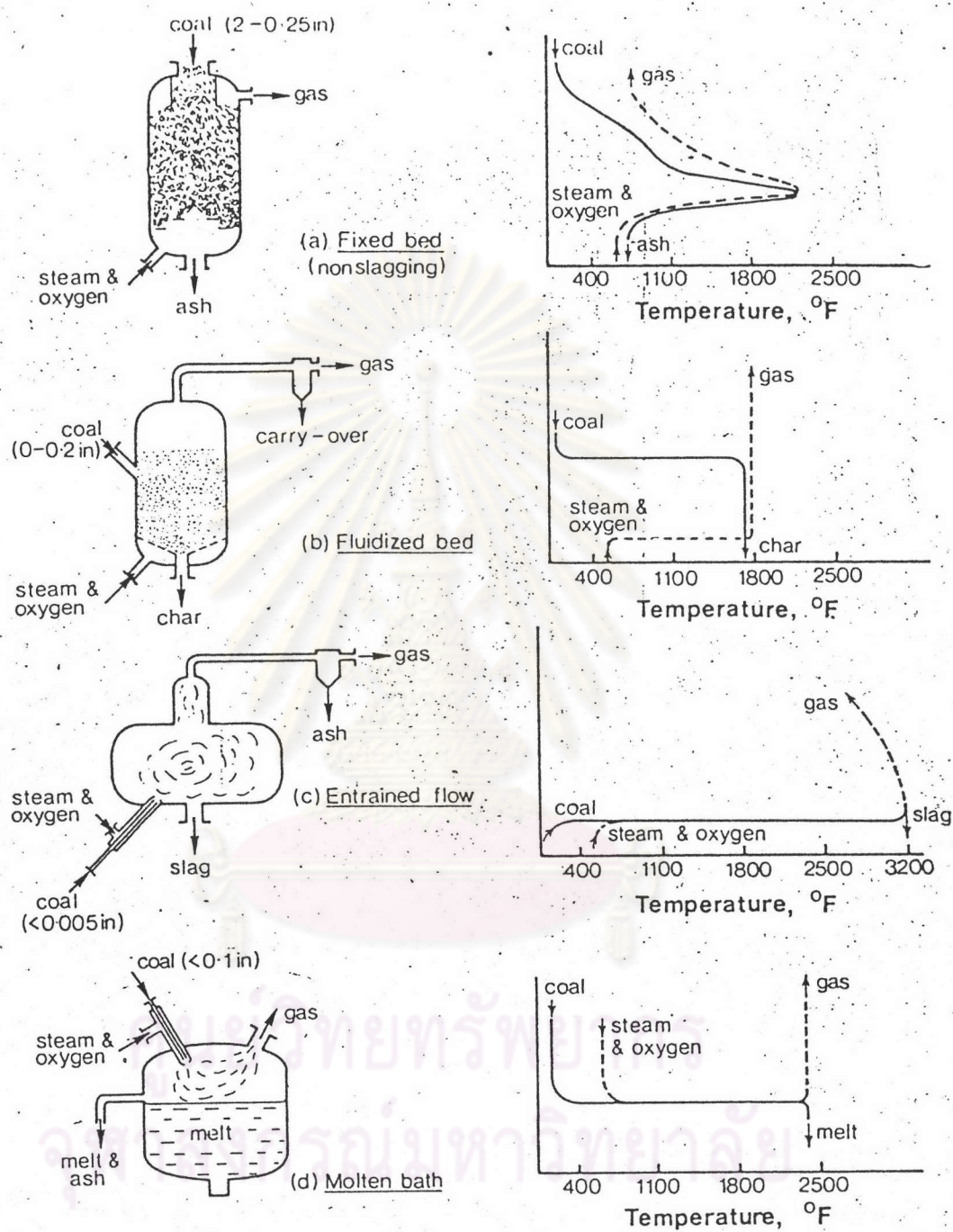


เมื่อผ่านการทำให้แห้ง ก็จะได้ก๊าซซึ่งมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับก๊าซบริสุทธิ์

2.1.4 ประเภทของกระบวนการก๊าซซิเคชัน (Classification of Gasification Process) (7)

ประเภทของกระบวนการก๊าซซิเคชันสามารถแบ่งได้เป็น 4 กลุ่มใหญ่ ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งได้แก่

1. Fixed Bed Gasifier หรือ Moving Bed Gasifier วัตถุประสงค์จะเข้าสู่เตาผลิตก๊าซโดยการนำเข้าทางด้านบน และจะเคลื่อนตัวตลอดเวลาในแนวของเตา ไอน้ำและอากาศที่เข้าทางด้านล่างจะเคลื่อนตัวขึ้นด้านบน บริเวณส่วนล่างของเบด คาร์บอนจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเกิดเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ต่อจากช่วงนี้ปฏิกิริยาคูดความร้อนทั้งหลายก็เกิดขึ้น ก๊าซร้อนจากปฏิกิริยาเหล่านี้ลอยตัวขึ้นผ่านเบดของคาร์บอน คาร์บอนมอนอกไซด์เกิดขึ้นโดยปฏิกิริยาของ CO₂ กับ C ซึ่งพอสรุปได้ว่า ขณะที่วัตถุดิบเคลื่อนตัวลงมา สิ่งที่จะเกิดขึ้นคือ
 - การ Drying เมื่อสัมผัสกับก๊าซร้อนที่ลอยตัวขึ้น
 - การ Devolatilization สารระเหยในวัตถุดิบจะระเหยออกมา แยกตัวให้ก๊าซไฮโดรเจน มีเทนและไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลหนักอื่น ๆ ลอยปะปนไปกับก๊าซผลิตภัณฑ์
 - เกิดปฏิกิริยากับออกซิเจน มีทั้ง Oxidation และ Reduction ส่วนที่ไม่เกิดปฏิกิริยาที่เหลือ ก็จะถูกปล่อยออกมาทางส่วนล่างของเบด



รูปที่ 2.3 แสดงเตาผลิตก๊าซทั้ง 4 ประเภท (8)

2. Fluidization Bed Gasifier ในบรรดาระบบที่กล่าวมาแล้วนั้น ระบบนี้มีการพัฒนาน้อยที่สุด ในสมัยก่อนสงครามโลกครั้งที่ 2 เตาผลิตก๊าซนี้ใช้ในการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า และเดินเครื่องยนต์ Gas Engines ที่ใช้ในโรงงานการสังเคราะห์แอมโมเนีย เตาผลิตก๊าซนี้ ผงถ่านเล็ก ๆ จะถูกฟลูอิด์โดยความเร็วของก๊าซที่มีทิศทาง เมื่อเปรียบเทียบกับ Entrained Flow Gasifier พบว่า จะมีความร้อนและฝุ่นเล็ก ๆ ซึ่งสูญเสียไปกับ Flue Gas ที่ออกจากตัวเตา ผลเสียอันนี้ถูกชดเชยด้วยความสามารถในการเดินเครื่องได้อย่างต่อเนื่องที่ปริมาณการป้อนสูง การใช้ถ่านต่อเวลาและปริมาตรของเตาสูงกว่า อีกทั้งการถ่ายเทมวลสารและความร้อนดี ทำให้สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ง่ายและทั่วถึงกว่า

ระบบนี้สามารถทำงานได้ทั้งในภาวะที่แห้ง หรือมีการเกิดชี้เถ่าเหลวได้ การฟลูอิด์แบบแห้งสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดอ่อนตัวของชี้เถ่า อุณหภูมิของเศษถ่าน และชี้เถ่า จะถูกดึงออกจากด้านล่างโดยกรรมวิธีทางกล ในขณะที่บางส่วนถูกพัดพามาติดกับฟลูอิด์ทางด้านบน ทำให้ต้องมีการติดตั้งไซโคลน (cyclone) เพื่อดักเก็บไว้ การผลิตก๊าซที่มีชี้เถ่าอยู่ และอุณหภูมิสูงกว่าจุดอ่อนตัวของชี้เถ่า ทำให้ชี้เถ่ารวมตัวกันมีขนาดใหญ่ขึ้น ก็จะตกลงมายังส่วนล่างของเบดและถูกดึงออก

3. Entrained Flow Gasifier เป็นการใช้ส่วนผสมของวัตถุดิบกับก๊าซ (อากาศ/ไอน้ำหรือออกซิเจน/ไอน้ำ) เพื่อนำเอาผงละเอียดเล็ก ๆ ของวัตถุดิบเข้าสู่เตาผลิตก๊าซ โดยที่ขนาดของวัตถุดิบและความเร็วของก๊าซที่เข้าจะต้องพอดีกัน เพื่อรักษาสภาพของ Suspension ไว้ การทดลองเรื่องนี้ได้รับการพัฒนามาจากระบบการเผาไหม้ของ Pulverized-coal ชี้เถ่า และ Char จะออกจากเตาร่วมกับก๊าซผลิตภัณฑ์ ซึ่งต้องมีการแยกออกอีกครั้งหนึ่ง อัตราการเกิดปฏิกิริยาของถ่านและอุณหภูมิ สูงมากเมื่อเทียบกับเบดนิ่ง และเมื่ออุณหภูมิสูงเกินสภาวะเกิด Slag การก๊าซซิฟิเคชันจะสามารถเกิดขึ้นสำเร็จด้วยการผ่านเข้าเพียงครั้งเดียว ซึ่งในระบบแห้งมักจะมีการนำ Char กลับ เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในปริมาณสูง

4. Molten Salt Gasifier สารหลอมเหลวสามารถใช้ในการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง เพื่อที่จะถ่ายเทความร้อนและเป็นคะตะลิสต์ของกระบวนการ สารที่เป็นสารหลอมเหลว นอกจากเกลือแล้ว อาจจะเป็นเหล็กหรือโลหะอื่น ๆ รวมทั้งชี้เถ่าของถ่านเอง การผลิตก๊าซที่ใช้ตัวกลางที่หลอมเหลวได้นั้น ทำให้ผลิตก๊าซได้มากขึ้น เพราะการเร่งปฏิกิริยาของสารหลอมเหลว กัมมะถันจะอยู่ในส่วนที่หลอมเหลว ทำให้กรรมวิธีที่ใช้ในการทำความสะอาดก๊าซน้อยลง

ผลเสียที่สำคัญคือเกิดการกัดกร่อน เนื่องจากการใช้สารหลอมเหลวที่อุณหภูมิสูง โดยการผสมกระเบื้อง alumina ที่มีความบริสุทธิ์ลงในเกลือที่ใช้ เป็นเพียงการแก้ปัญหาอย่างชั่วคราว

2.1.5 เตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิง (Gasifier) (3,9)

สามารถแบ่งตามทิศทางการไหลของอากาศเป็น 3 แบบ ดังแสดงในรูป 2.4

คือ

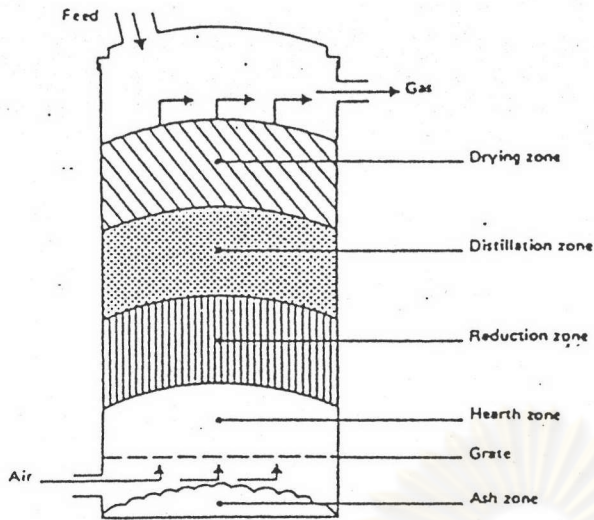
1. Up-draught Gasifier ในเตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงนี้ ป้อนอากาศหรือไอน้ำ เข้าทางด้านล่างที่มีการสันดาป (Hearth Zone) อุณหภูมิอยู่ในช่วง 900 °C หรือมากกว่าตามความต้องการ ในกรณีที่เป็นอุตสาหกรรมใหญ่ การเติมไอน้ำเข้าไปเป็นการลดอุณหภูมิในบริเวณสันดาปหรืออาจทำการหล่อเย็นบริเวณนี้ด้วยน้ำตลอดเวลา เป็นการยืดอายุการใช้งานของเครื่องได้ ก๊าซที่ได้จากบริเวณการเผาไหม้ (Combustion Zone) จะผ่านไปยัง Reduction Zone เข้าไป Distillation Zone และ Drying Zone ตามลำดับ

กระบวนการชนิดนี้ได้มีการพัฒนาเป็นเตาผลิตก๊าซแบบผสม (Hybrid Up-draught Reactor) หรือเป็นเตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบ 2 ชั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ผลิตออกมาครั้งแรกโดยบริษัท U Gas Integrate เมืองมิลาน ประเทศอิตาลี (สมาคมวิจัยและพัฒนาพลังงานแห่งสหรัฐอเมริกา, 1976) (10) ได้ใช้งานมามากกว่า 20 ปี ก๊าซที่เกิดขึ้นออกมา 2 ระดับคือ ระดับแรกได้มาจาก Gasification Zone ในช่วง Reduction Zone ซึ่งให้ก๊าซที่สะอาดใส (Clear gas) ออกมา ระดับต่อมาได้จาก Distillation Zone หรือ Drying Zone ได้ Top gas อุณหภูมิของ Top gas ถูกควบคุมโดยการปรับสัดส่วนของ Clear gas ซึ่งไหลออกจากเตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิง

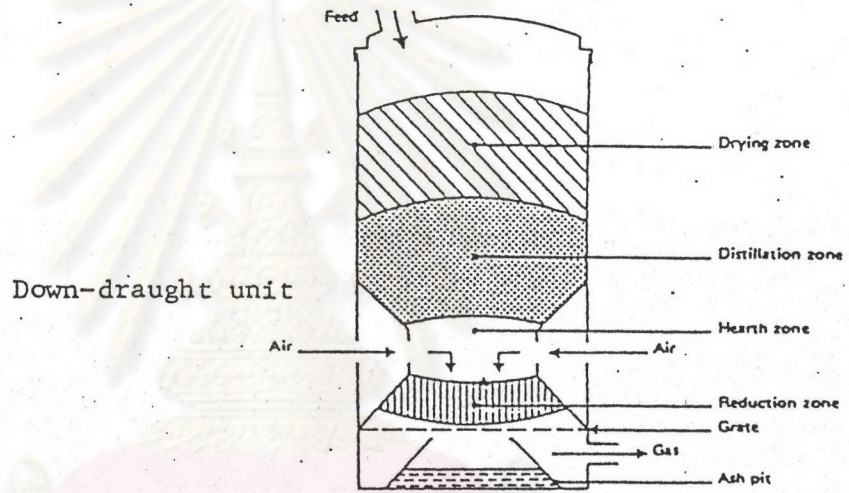
Top Gas ไหลผ่าน Condenser เพื่อดึงหยดของน้ำมันทาร์ออก ในขณะที่ Clear gas ไหลผ่านไซโคลนเพื่อกำจัดฝุ่นก๊าซทั้งสองระดับมารวมกัน ความร้อนจาก Clear gas ทำให้ละอองน้ำมัน (oil mist) ใน Top Gas ระเหยออกไป อุณหภูมิสุดท้ายประมาณ 350 °C

กระบวนการนี้สามารถผลิตโปรดิวเซอร์ก๊าซ โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการทำให้อุณหภูมิลดลง ก๊าซที่ยังร้อนมีค่าความร้อนประมาณ 7,500 KJ/m³ สำหรับก๊าซที่ทำความสะอาดและเย็นลงแล้วมีค่าความร้อนลดลง เหลือประมาณ 6,300 KJ/m³

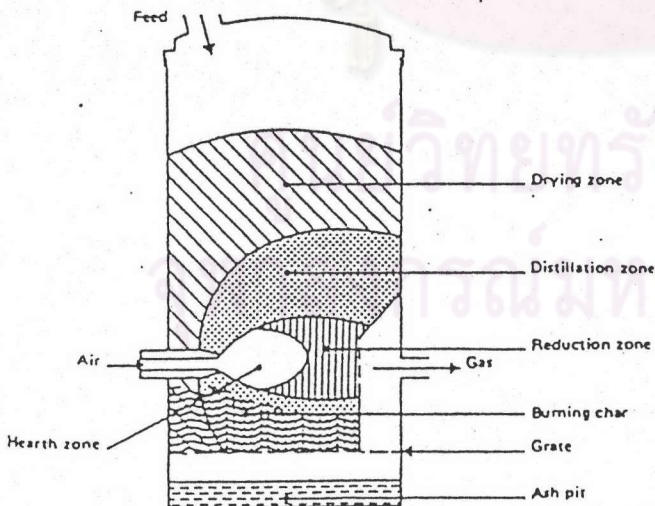
2. Down-draught Gasifier ระบบนี้ได้รับการพัฒนาโดยมีจุดมุ่งหมายที่เปลี่ยนน้ำมันทาร์ (tar) ที่เกิดขึ้นในเตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงไปเป็นก๊าซ ซึ่งมีความสำคัญมาก กรณีส่งก๊าซเชื้อเพลิงไปตามท่อระยะทางไกล ๆ จากเตา และยังสามารถประยุกต์ใช้กรณีเป็นเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ได้ด้วย เตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงมี Distillation Zone และ Drying Zone อยู่เหนือ Hearth Zone และมี Reduction Zone อยู่ด้านล่าง บริเวณที่สำคัญที่สุดก็คือ Combustion Zone



Up-draught unit

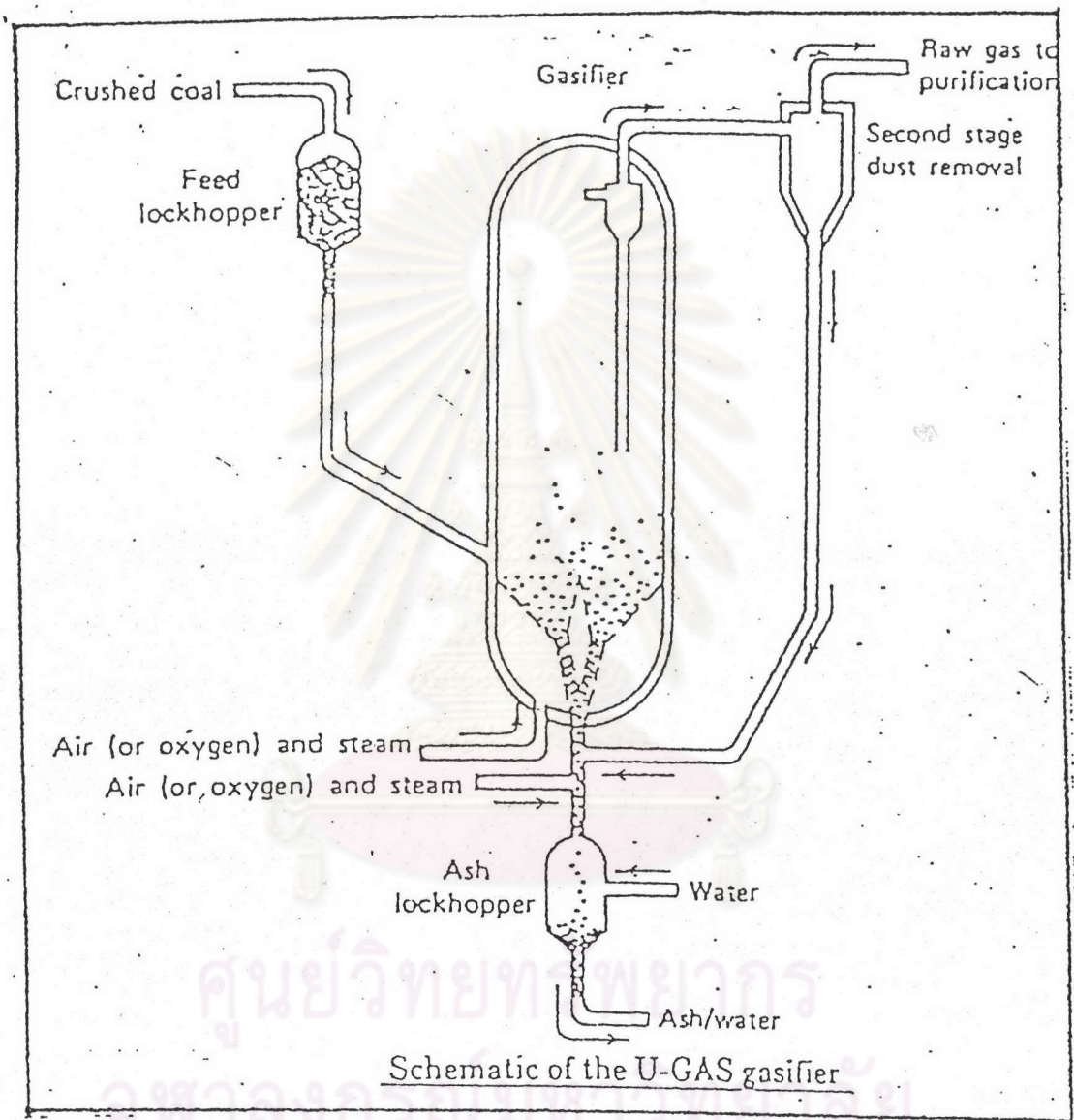


Down-draught unit



Cross-draught unit

รูปที่ 2.4 แสดงถึงเตาผลิตก๊าซในรูปแบบต่าง ๆ (10)



รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะของ U-GAS Gasifier (6)

ระบบ Down-draught นี้มีการใช้กันอย่างกว้างขวางสำหรับการก๊าซซิฟิเคชัน ถ่านไม้พืทและลิกไนต์ ตัวอย่างคือเตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงของอิมเบิร์ต (Imbert) และรอก (Roth) (10) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งได้พัฒนาขึ้นในเยอรมันนีและสวิสเซอร์แลนด์ ตามลำดับ เตาดังกล่าวทำงานมีประสิทธิภาพสูง มีรูปร่างเป็นกรวยอยู่ภายใน Hearth Zone ข้างล่างทางเข้าของอากาศ ส่วนคอดเข้าจะเป็นส่วนที่ช่วยเพิ่มความเร็วของอากาศ และทำให้อุณหภูมิของการทำงานสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นจึงเป็นการง่ายที่เปลี่ยนน้ำมันทาร์ไปเป็นก๊าซ

ระบบ Down-draught ได้รับการพัฒนาสำหรับใช้กับไม้และเศษวัสดุ ก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้มีไฮโดรเจนสูงกว่าใช้ถ่านไม้หรือถ่านหิน

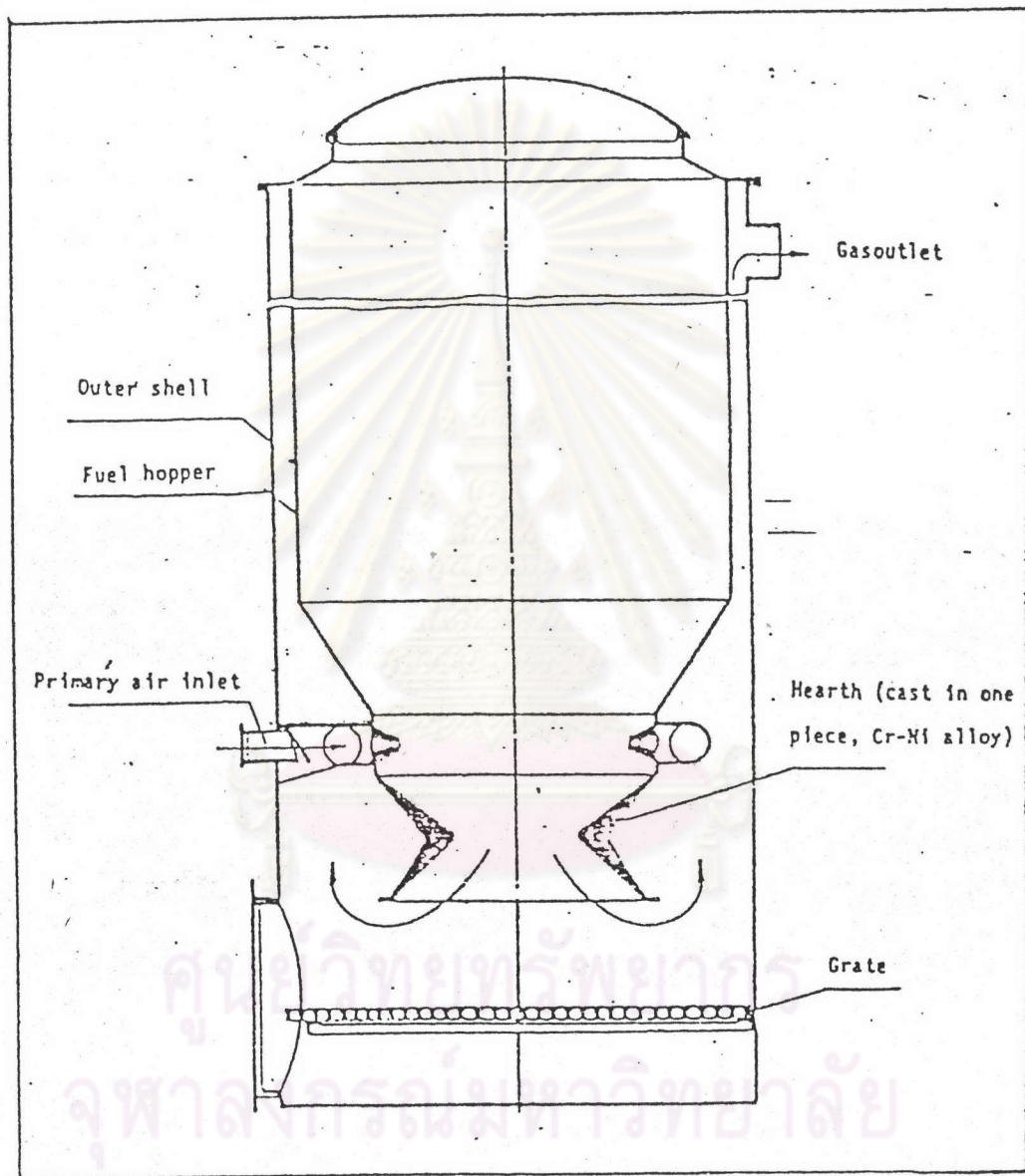
ประโยชน์ที่สำคัญของระบบนี้ก็คือ สามารถใช้วัสดุที่ไม่ได้ผ่านการคาร์บอนไนซ์ (Uncarbonised Materials) และสามารถลดน้ำมันทาร์ในผลิตภัณฑ์ได้ แต่เป็นระบบที่มีเวลาในการสัมผัส (Contact time) ของอากาศและเชื้อเพลิงน้อย เป็นระบบที่ให้เชื้อเพลิงก๊าซสม่ำเสมอดีกว่าระบบ Up-draught เมื่อนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ อย่างไรก็ตามระบบนี้ต้องการเชื้อเพลิงที่มีความสม่ำเสมอของขนาดวัตถุดิบมากกว่าสำหรับการทำงาน และวัตถุดิบที่มีขนาดใหญ่กว่า 15 ซม. ไม่เหมาะสมในการใช้เป็นวัตถุดิบของเตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงที่ Imbert และ Roth ออกแบบไว้ เตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงบางเตาจะไม่เหมาะสมในการใช้เชื้อเพลิงที่มีขนาดเล็กกว่า 1.5 ซม. และมากกว่า 5 ซม. เครื่องเหล่านี้จะทำงานที่อุณหภูมิต่ำกว่าเครื่องในระบบ Cross-draught และยังไม่เหมาะสมกับการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงปริมาณต่ำ

3. Cross-draught Gasifier ในระบบนี้การไหลของอากาศและเชื้อเพลิงที่ได้ จะขวางกับตัวเตา แต่ก็ไม่จำเป็นจะต้องขนานในแนวอนเสมอ เตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบนี้จะทำงานที่อุณหภูมิสูงมาก ให้มี Combustion Zone และ Reduction Zone จำกัด โดยใช้ท่ออากาศตรงทางเข้าที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก อุณหภูมิจะสูงถึง 2000 °C จึงต้องมีน้ำหล่อเย็นอยู่ข้างนอก

เนื่องจากเวลาในการทำปฏิกิริยาล้น จึงต้องใช้เชื้อเพลิงที่มีน้ำมันทาร์ต่ำ และขนาดเล็กเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6-1 ซม. เป็นขนาดที่ดี เชื้อเพลิงใน hopper จะประพฤติตัวเป็นเกราะป้องกันความร้อนจากการแผ่รังสีความร้อน และเมื่อทำงานโดยใช้ถ่านไม้เป็นเชื้อเพลิง เตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงก็ไม่จำเป็นต้องก่อปูนทนไฟ (Refractory line)

พื้นที่ส่วนใหญ่สัมผัสกับอุณหภูมิสูง ที่ซึ่งเป็นปลายท่อมีความเร็วของอากาศสูงถึง 80 เมตร/วินาที เตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงนี้มีลักษณะพิเศษคือ มีรูปทรงง่าย ๆ และเริ่มเดินเครื่องได้เร็ว ใช้ได้ดีด้วยเครื่องยนต์ขนาดเล็กตอบสนองต่อความต้องการก๊าซที่ไม่คงที่

เตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงทั้ง 3 แบบ บ้อนวัตถุดิบเข้าทางด้านบนของเตา ครั้งแรก



รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะของ Imbert Gasifier (11)

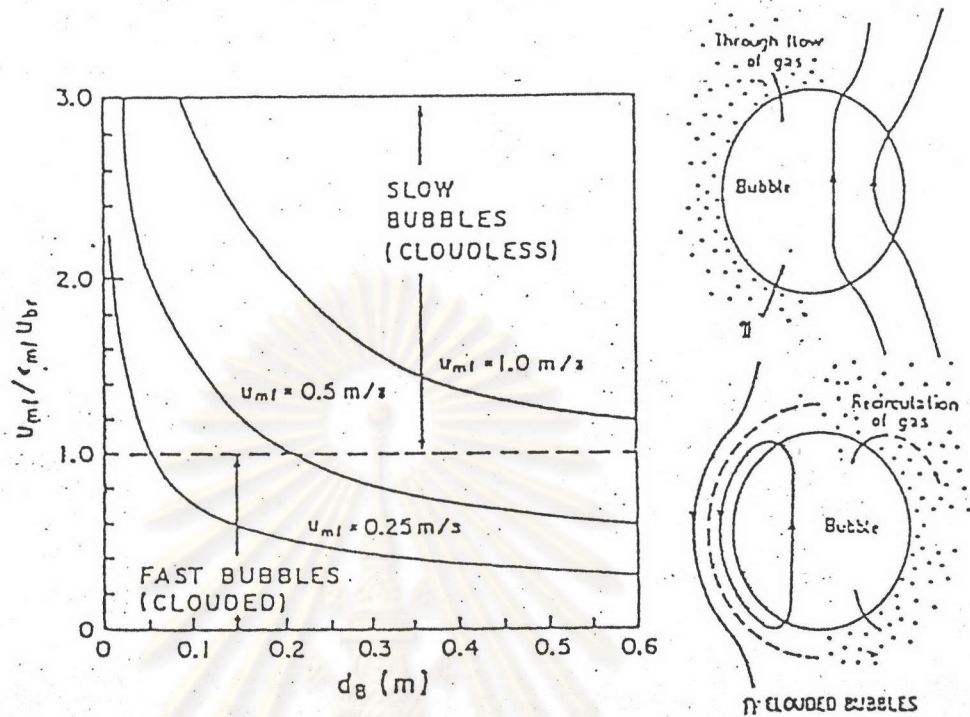
วัตถุดิบถูกทำให้แห้ง แล้วถูกกลั่นสลายด้วยความร้อน (Pyrolyse) เนื่องมาจากความร้อนที่บริเวณที่ร้อนกว่าข้างล่างเตา เรียงลำดับคือ Combustion Zone และ Reduction Zone องค์กรประกอบที่เป็นน้ำมันทาร์และถ่านแดง ถูกออกซิไดซ์บางส่วนให้ความร้อนมา และทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นไปอีกประมาณ 500 °C ปริมาณคาร์บอนที่เหลือทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ได้คาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนในช่วงสุดท้าย เถ้าร่วงหล่นผ่านตะแกรงลงไปสู่ส่วนล่าง อากาศร้อนถูกแยกออกในส่วนตรงข้ามกับอากาศเข้า อาจเป็นส่วนบนหรือส่วนล่างขึ้นกับแบบของเตา องค์กรประกอบของก๊าซที่แน่นอนที่ได้จากเตาผลิตเชื้อเพลิงที่ใช้อากาศขึ้นกับชนิดของชีวมวลที่ใช้

2.2 ก๊าซซิฟิเคชันในฟลูอิดไรซ์เบด

2.2.1 ไฮโดรไดนามิกในเตาเผาแบบฟลูอิดไรซ์เบด (12,13)

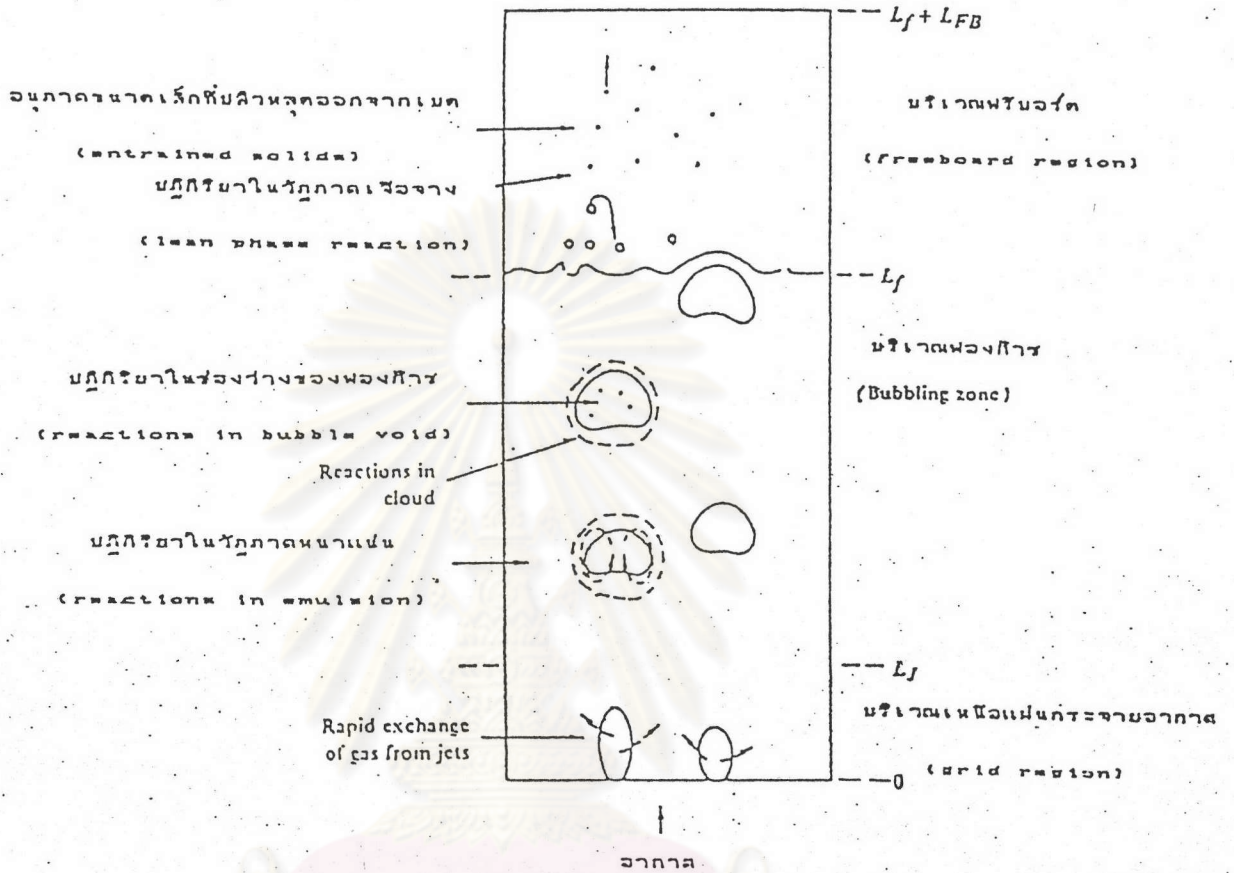
ในระบบฟลูอิดไรซ์เบดแบบระบบก๊าซ-ของแข็งนั้น ก๊าซหรืออากาศที่ป้อนเข้าสู่เบดจะทำหน้าที่เป็นตัวพองของแข็งภายในเบดให้เคลื่อนที่อย่างอิสระและมีคุณสมบัติเหมือนของไหลช่วยให้การผสมผสานและสัมผัสกันระหว่างของแข็งและก๊าซดีขึ้น ภายในเบดของระบบฟลูอิดไรซ์เบดนี้ สามารถแบ่งได้เป็น 2 วัฏภาค (Two phase theory) (13,14) คือวัฏภาคฟองก๊าซ (bubble phase หรือ dilute phase) และวัฏภาคหนาแน่น (dense phase หรือ emulsion phase) ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจะมีคุณลักษณะสำคัญตามสมมติฐานของ Davidson คือ ภายในฟองก๊าซจะไม่มีของแข็งอยู่เลย, ฟองก๊าซจะวิ่งขึ้นสู่เบื้องบนของเบด และความดันในฟองก๊าซมีค่าสม่ำเสมอ

เนื่องจากการก๊าซซิฟายถ่านไม้ในฟลูอิดไรซ์เบดเป็นระบบฟลูอิดไรซ์เบดโดยใช้ก๊าซ ทำให้ไฮโดรไดนามิกในเตาเผามีความซับซ้อน ขึ้นอยู่กับความเร็วของก๊าซที่ป้อนเข้าสู่เบด และขนาดของเม็ดของแข็งที่ใช้ในเบด ลักษณะการเคลื่อนที่ของฟองก๊าซจะเป็นอย่างไรขึ้นกับความเร็วสัมพัทธ์ของฟองก๊าซ (ความเร็วของฟองก๊าซเมื่อเทียบกับวัฏภาคหนาแน่น, U_{mf}) และความเร็วของก๊าซในเบดหนาแน่น ที่สภาวะเริ่มต้นของการเกิดฟลูอิดไรซ์ ($U_g = U_{mf} / E_{mf}$) เมื่อฟองก๊าซเคลื่อนที่ด้วยความเร็วมากกว่าความเร็วของก๊าซในเบดหนาแน่น ($U_{mf} / E_{mf} U_b < 1$) การไหลของก๊าซในเบดจะเสมือนว่าไหลสวนทางกับฟองก๊าซ โดยไหลวนกลับทางด้านล่างและออกทางด้านบนของฟองก๊าซ ทำให้เกิดการปกคลุมของอนุภาครอบ ๆ ฟองก๊าซคล้ายหมอก (cloud) ดังรูปที่ 2.7 ก ถ้าความเร็วของฟองก๊าซมีค่าน้อยกว่าความเร็วของก๊าซในเบดหนาแน่น ($U_{mf} / E_{mf} U_b > 1$) ก๊าซในเบดหนาแน่นจะไหลผ่านฟองก๊าซจากทางด้านล่างออกทางด้านบน ทำให้ฟองก๊าซปราศจากหมอกปกคลุม ดังรูปที่ 2.7 ข



รูปที่ 2.7 แสดงการเปลี่ยนแปลงของฟองก๊าซเคลื่อนที่ช้าเป็นฟองก๊าซเคลื่อนที่เร็ว (15)

ลักษณะการเคลื่อนที่ของฟองก๊าซดังกล่าวยังขึ้นกับขนาดของอนุภาคในเบด เนื่องจากความเร็วอากาศต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไรซ์ (u_{mf}) เป็นฟังก์ชันกับขนาดหรือมวลของแต่ละอนุภาค ในระบบฟลูอิดไรซ์ความเร็วของก๊าซปกติอยู่ระหว่างขอบเขตของฟองก๊าซเคลื่อนที่ช้าและเร็ว (transition) ในการเผาไหม้ถ่านไม้ขนาดของอนุภาคมีการเปลี่ยนแปลงโดยขนาดจะเล็กลง จึงทำให้ฟองก๊าซภายในเบดเคลื่อนที่จากความเร็วช้าไปสู่ความเร็วที่สูงขึ้น ปฏิกริยาเกิดขึ้นที่ส่วนต่าง ๆ ของเบดมีแบบจำลองของปฏิกริยาในเตาเผาแบบฟลูอิดไรซ์ในอุดมคติ (idealized fluid bed) ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงการเกิดปฏิกิริยาในส่วนต่างๆของฟลูอิโดร์เบดในอุดมคติ (15)

ขอบเขตของการเกิดปฏิกิริยาแบ่งเป็น 3 บริเวณคือ บริเวณเหนือแผ่นกระจายอากาศ (grid region) ประกอบด้วยฟองก๊าซขนาดเล็กที่เริ่มก่อตัวขึ้น บริเวณที่สองถัดจากส่วนแรกขึ้นมา ประกอบด้วยฟองก๊าซขนาดใหญ่มากมายเรียกบริเวณนี้ว่า bubbling region บริเวณสุดท้ายเป็นบริเวณเหนือเบดมีอนุภาคขนาดเล็กแขวนลอยอยู่เรียกว่า freeboard region ปฏิกิริยาการเผาไหม้ในแต่ละส่วนขึ้นกับความเข้มข้นของก๊าซ กรณีที่อัตราของปฏิกิริยาเกิดมากไฮโดรไดนามิกในเบดได้แก่ คุณสมบัติของฟองก๊าซจะเป็นส่วนสำคัญ ในกรณีปฏิกิริยาเกิดช้าระยะเวลาที่ก๊าซอยู่ในเบด (resident time) เป็นส่วนสำคัญ

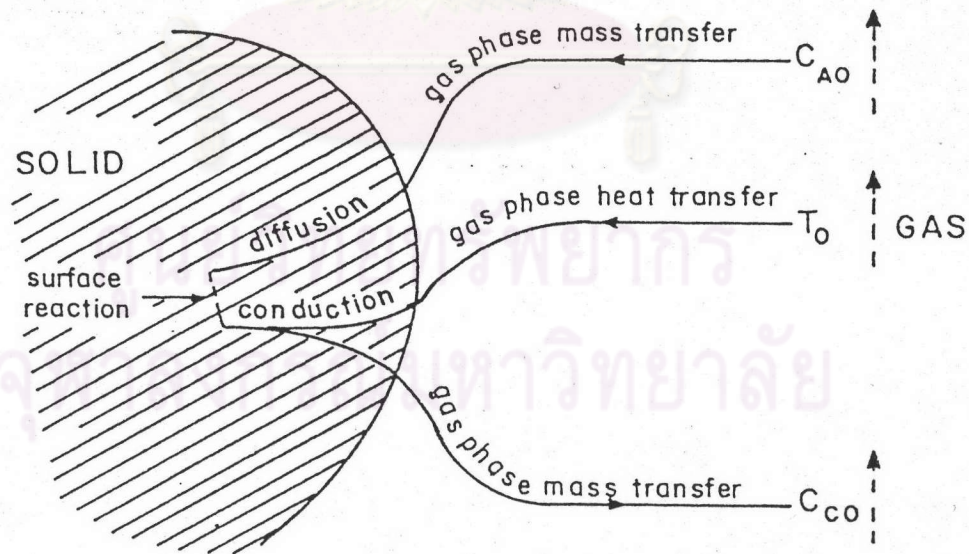
2.2.2 กลไกการเกิดปฏิกิริยาก๊าซซีเคชั่น (2,5)

ปฏิกิริยาพื้นฐานที่เกิดขึ้นภายในเตาผลิตก๊าซส่วนใหญ่เป็นปฏิกิริยา heterogeneous ของคาร์บอน ยกเว้นปฏิกิริยา water gas shift กลไกของปฏิกิริยา heterogeneous มีความซับซ้อนมาก Levenspiel (5) เสนอว่ากระบวนการเกิดปฏิกิริยาทั้งหมด เกิดขึ้นเป็นขั้นตอนที่ต่อเนื่องกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.9

จากรูป ปฏิกิริยาการแพร่กระจายระหว่างก๊าซกับของแข็ง ได้แก่

1. เกิดการถ่ายเทมวลสารของสารตั้งต้นที่เป็นก๊าซ (gaseous reactant) จากกลุ่มของก๊าซ (bulk of gas stream) ไปยังผิวหน้าของอนุภาคของแข็ง
2. การแพร่กระจายของสารตั้งต้นที่เป็นก๊าซ เข้าสู่รูพรุนของอนุภาคของแข็ง
3. เกิดการดูดซึม (adsorption) ของสารตั้งต้นที่เป็นก๊าซบนผิวของของแข็ง
4. ปฏิกิริยาเคมีเกิดที่ผิวของของแข็ง
5. เกิดการปล่อยก๊าซผลิตภัณฑ์จากผิวของของแข็ง
6. การแพร่กระจายของก๊าซผลิตภัณฑ์ผ่านรูของของแข็ง
7. เกิดการถ่ายเทมวลสารของก๊าซผลิตภัณฑ์ จากผิวด้านนอกของของแข็ง ไปสู่กลุ่มของก๊าซ

สู่กลุ่มของก๊าซ



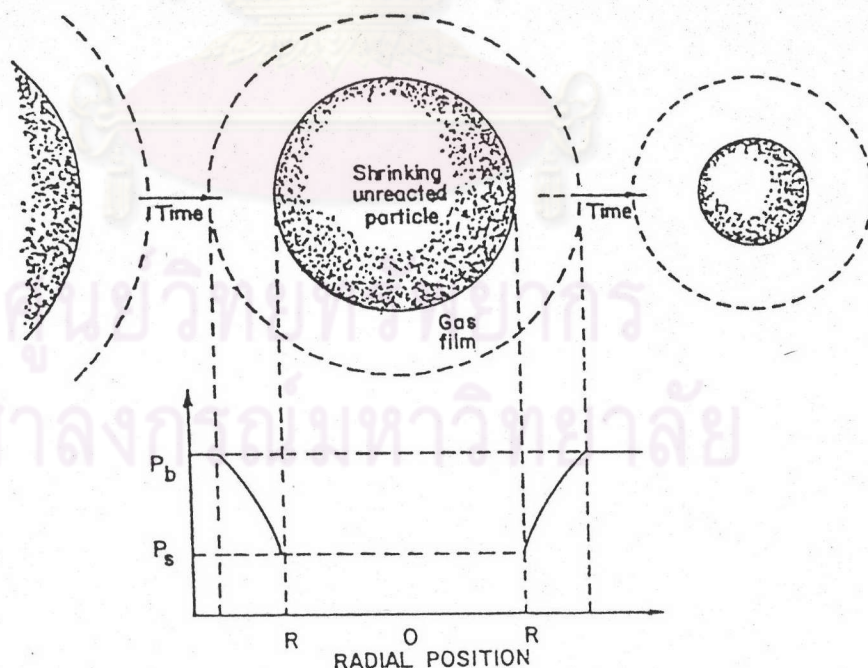
รูปที่ 2.9 แสดงถึงปฏิกิริยาการถ่ายเทความร้อนระหว่างก๊าซกับของแข็ง (5)

การถ่ายเทความร้อน สำหรับปฏิกิริยาดูดและคายความร้อน การแพร่กระจาย และขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยา จะเกิดควบคู่ไปกับ

1. การถ่ายเทความร้อนโดยการพาและแผ่รังสี ระหว่างกลุ่มของก๊าซและอนุภาคของแข็ง
2. การถ่ายเทความร้อนโดยการนำภายในของแข็ง

2.2.3 แบบจำลองของปฏิกิริยา (2,16)

แบบจำลองอย่างง่ายของปฏิกิริยา heterogeneous ก็คือ แบบจำลอง shrinking sphere unreacted core model จากการศึกษาของ WEN & DUTTA (16) ได้แบบจำลองที่ชื่อว่า "surface reaction model" ดังแสดงในรูปที่ 2.10 แบบจำลองนี้ ปฏิกิริยาแรกเกิดขึ้นที่ผิวหน้าของอนุภาคเชื้อเพลิง จากนั้นบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาจะเล็กลงเข้าไป เกิดได้ชั้นของอนุภาคที่ได้เกิดปฏิกิริยาไปแล้วอย่างสมบูรณ์หรือชั้นของแก่นนั่นเอง แก่นที่อยู่ผิวหน้าของอนุภาคจะถูกพัดพาออกไปพร้อมกับก๊าซผลิตภัณฑ์ ขนาดของอนุภาคจะเล็กลงตลอดการเกิดปฏิกิริยา อนุภาคที่เหลือเป็นอนุภาคส่วนที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยา (unreacted core) นั่นเอง



รูปที่ 2.10 แสดงถึงแบบจำลอง Shrinking sphere unreacted core (16)

จากกลไกการเกิดปฏิกิริยาที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.2.2 สามารถสรุปขั้นตอนที่เกิดขึ้นเหลือเพียง 3 ขั้นตอนคือ

1. การแพร่กระจายของสารตั้งต้นจากกลุ่มของก๊าซที่ป้อนเข้ามา ผ่านชั้นของก๊าซ (gas film) ไปยังผิวของของแข็ง
2. ปฏิกิริยาเกิดบนผิวของของแข็งระหว่าง สารตั้งต้นที่เป็นก๊าซกับของแข็ง
3. การแพร่กระจายของก๊าซผลิตภัณฑ์ จากผิวของของแข็งผ่านชั้นของก๊าซ (gas film) กลับไปยังกลุ่มของก๊าซ

ขั้นตอนที่ 1 และ 3 เกิดการแพร่กระจาย ส่วนขั้นตอนที่ 2 เกิดปฏิกิริยา ถ้าปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว การแพร่กระจายมวลสารจะเป็นขั้นตอนที่ควบคุมอัตราการเกิดในทางตรงกันข้าม ถ้าปฏิกิริยาเคมีเกิดช้า ขั้นตอนที่ 2 จะเป็นตัวควบคุม

2.2.4 กลไกการแบ่งแยกโซนภายในเตาผลิตก๊าซชนิดฟลูอิดไธด์เบด

ภายในเตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงมีกระบวนการที่สามารถเกิดขึ้นได้ถึง 4 กระบวนการ คือ การทำให้เชื้อเพลิงแห้ง, การไพโรไลซิส (Pyrolysis), การเผาไหม้ และ การรีดักชัน (Reduction) แต่ไม่จำเป็นที่จะต้องเกิดกระบวนการทั้งหมดนี้ในทุกเตาผลิตก๊าซ เพราะขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ซึ่งจะเป็นตัวชี้ว่ากระบวนการไหนไม่เกิดขึ้น บริเวณที่เกิดแต่ละกระบวนการเรียกว่า โซน (Zone)

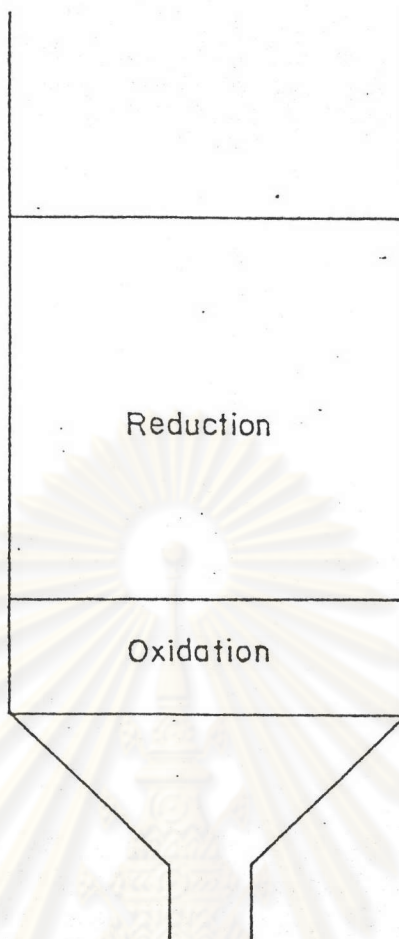
สำหรับเตาผลิตก๊าซชนิดฟลูอิดไธด์เบด มีผู้เสนอกลไกการแบ่งแยกโซนดังนี้ Campbell (17) ได้เสนอกลไกสำหรับ Fluidized bed charcoal gasifier ว่าสามารถแบ่งเบดอย่างหยาบ ๆ ได้เป็น 2 โซน ดังแสดงในรูปที่ 2.11 โดยพิจารณาจากอุณหภูมิที่แตกต่างกัน คือ

1. บริเวณที่อยู่เหนือแผ่นกระจายอากาศ (Distributor) ขึ้นไป คือ Oxidation Zone หรือ Combustion Zone ซึ่งเป็นบริเวณที่อากาศเข้า เกิดการเผาไหม้เชื้อเพลิงส่วนใหญ่ ปฏิกิริยาเริ่มแรกที่เกิดขึ้น คือ



ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน อุณหภูมิภายใน Combustion Zone จึงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

2. บริเวณที่เกิดปฏิกิริยารีดักชัน เรียกบริเวณนี้ว่า Reduction Zone เนื่องจากปริมาณอากาศที่ผ่านเข้ามามีจำกัด และทำปฏิกิริยาใน Combustion Zone จนเกือบหมด จึงมีออกซิเจนในโซนนี้น้อยมาก ก๊าซร้อนจากปฏิกิริยาการเผาไหม้จะลอยขึ้นผ่านเข้าไปในโซนที่มีปฏิกิริยาคูดความร้อน ปฏิกิริยาพื้นฐานที่เกิดขึ้น คือ คาร์บอนที่ลุกแดงทำปฏิกิริยากับคาร์บอน



รูปที่ 2.11 แสดงถึงโซนภายในเตาผลิตก๊าซโดย Campbell (17)

ไดออกไซด์ ปฏิกริยานี้เรียกว่า Boudouard reaction



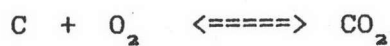
เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน พลังงานความร้อนที่ได้จากการสันดาปใน Combustion Zone จะถูกใช้ไปในปฏิกิริยาคูดความร้อนนี้ ทำให้อุณหภูมิในโซนนี้ลดลงอย่างรวดเร็ว

ดังนั้น สามารถแยกโซนทั้งสองได้จากอุณหภูมิที่ต่างกัน คือ Combustion Zone จะมีอุณหภูมิที่สูงกว่า Reduction Zone

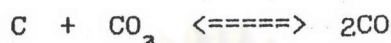
Foley & Barnard (18) เสนอว่ากลไกการแบ่งแยกโซนสำหรับเตาผลิตก๊าซชนิดฟลูอิโดร์เบคติน นอกจากจะพิจารณาจากแนวเส้นอุณหภูมิ (Temperature Profile) ภายในเบคแล้ว ยังสามารถพิจารณาได้จากก๊าซที่เกิดขึ้นของ ปฏิกิริยาเคมีพื้นฐานที่เกิดขึ้นในแต่ละโซน โดยปฏิกิริยาเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้ การออกแบบเตาผลิตก๊าซ สภาวะในการดำเนินการ และแนวเส้นของอุณหภูมิภายในเตาผลิตก๊าซ

ในกรณีที่ใช้ถ่านไม้เป็นวัตถุดิบ และ บ้อนไอน้ำเข้าไปพร้อมกับอากาศ
 Foley & Barnard ได้เสนอปฏิกิริยาเคมีพื้นฐานที่เกิดขึ้นใน Combustion Zone และ Reduc-
 tion Zone ดังนี้

Combustion reaction



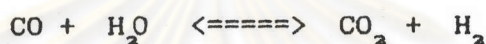
Boudouard reaction



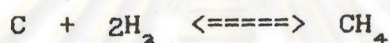
Water gas reaction



Water gas shift reaction



Methane forming reaction



ดังนั้นการแบ่งแยกโซนสำหรับ Fluidized bed charcoal gasifier
 จึงสามารถทำได้โดยการพิจารณาถึงอุณหภูมิที่แตกต่างและก๊าซที่เกิดขึ้นนั่นเอง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย