

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

กระบวนการเปลี่ยนรูปทางด้านเคมีความร้อน (Thermochemical Conversion) ที่เกิดขึ้นกับเชื้อเพลิงแข็งส่วนใหญ่จะเป็นชีวมวล ซึ่งจะเปลี่ยนรูปพลังงานจากสถานะของแข็งให้เป็นสถานะก๊าซ โดยทั่วไปจะมีอยู่ 4 กระบวนการ ได้แก่ กระบวนการเผาไหม้ (Combustion) กระบวนการกลั่นสลาย (Pyrolysis) กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) และกระบวนการทำให้เป็นของเหลว (Liquefaction)

ตารางที่ 2-1 การเปรียบเทียบกระบวนการการเปลี่ยนรูปทางด้านเคมีความร้อน

กระบวนการ	อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (MPa)	ตัวเร่งปฏิกิริยา	การไล่ความชื้น
ทำให้เป็นของเหลว	250-330	5-20	จำเป็น	ไม่จำเป็น
กลั่นสลาย	380-530	0.1-0.5	ไม่จำเป็น	จำเป็น
เผาไหม้	700-1400	> 0.1	ไม่จำเป็น	ไม่จำเป็น
แก๊สซิฟิเคชัน	500-1300	> 0.1	ไม่จำเป็น	จำเป็น

(Adapted from Demirbas, 2009)

กระบวนการทั้ง 4 มีความแตกต่างกันด้านความร้อนหรืออุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการ ซึ่งกระบวนการเผาไหม้จะใช้อุณหภูมิสูงสุดทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงและปริมาณอากาศที่มากจนได้ผลิตเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ส่วนกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจะมีการจำกัดอากาศให้ไม่เพียงพอต่อการเผาไหม้ กระบวนการกลั่นสลายจะไม่ใช้อากาศในการทำปฏิกิริยา และกระบวนการทำให้เป็นของเหลวจะทำให้เชื้อเพลิงจำพวกชีวมวลสลายตัวเป็นของเหลว โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำ

2.1 กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification)

กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเป็นกระบวนการแปลงสภาพทางความร้อนของเชื้อเพลิงแข็ง โดยการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ หรือปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วน (Partial oxidation) ด้วยอากาศหรือไอน้ำที่อุณหภูมิสูง ประมาณ 500–1,300 °C ทำให้เชื้อเพลิงแข็งเกิดการแตกตัวมาเป็นก๊าซ เรียกว่า ก๊าซเชื้อเพลิง (Producer gas) มีองค์ประกอบของ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ก๊าซไฮโดรเจน (H₂) ก๊าซมีเทน (CH₄) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ซึ่งจะมีสัดส่วนมาก

หรือน้อยขึ้นอยู่กับสถานะของการเกิดปฏิกิริยา ค่าความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิงประมาณ 3–10 MJ/m³ (นคร ทิพยาวงศ์, 2553) ก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เช่น การเผาไหม้โดยตรง กับหม้อไอน้ำ หรือระบบอบแห้ง การนำไปใช้กับเครื่องยนต์สันดาป ภายในเพื่อเป็นต้นกำลังในการเกษตร หรือการผลิตพลังงานไฟฟ้า เป็นต้น

กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันและการเผาไหม้เป็นกระบวนการทางความร้อนที่คล้ายกัน แต่ก็มีสิ่งที่แตกต่างกัน คือกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจะเก็บพลังงานไว้ในรูปพันธะเคมีที่อยู่ในก๊าซผลิตภัณฑ์ ส่วนการเผาไหม้จะสลายพันธะเคมีเพื่อผลิตพลังงาน กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจะมีการเพิ่มขึ้นของก๊าซไฮโดรเจน โดยเกิดปฏิกิริยากับธาตุคาร์บอนที่อยู่ในเชื้อเพลิงแข็ง ส่วนการเผาไหม้จะทำการเผาไฮโดรเจนและคาร์บอนให้กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ โดยกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันมีขั้นตอนดังนี้

- การไล่ความชื้น (Drying)
- การสลายตัวทางความร้อน หรือไพโรไลซิส (Pyrolysis)
- การเผาไหม้บางส่วน (Partial combustion)
- การเกิดปฏิกิริยาของก๊าซผลิตภัณฑ์ (Gasification)

จากขั้นตอนทั้ง 4 มี 2 ขั้นตอนที่ทำหน้าที่ทำให้เชื้อเพลิงแข็งกลายเป็นก๊าซเชื้อเพลิงได้ คือไพโรไลซิส และแก๊สซิฟิเคชัน

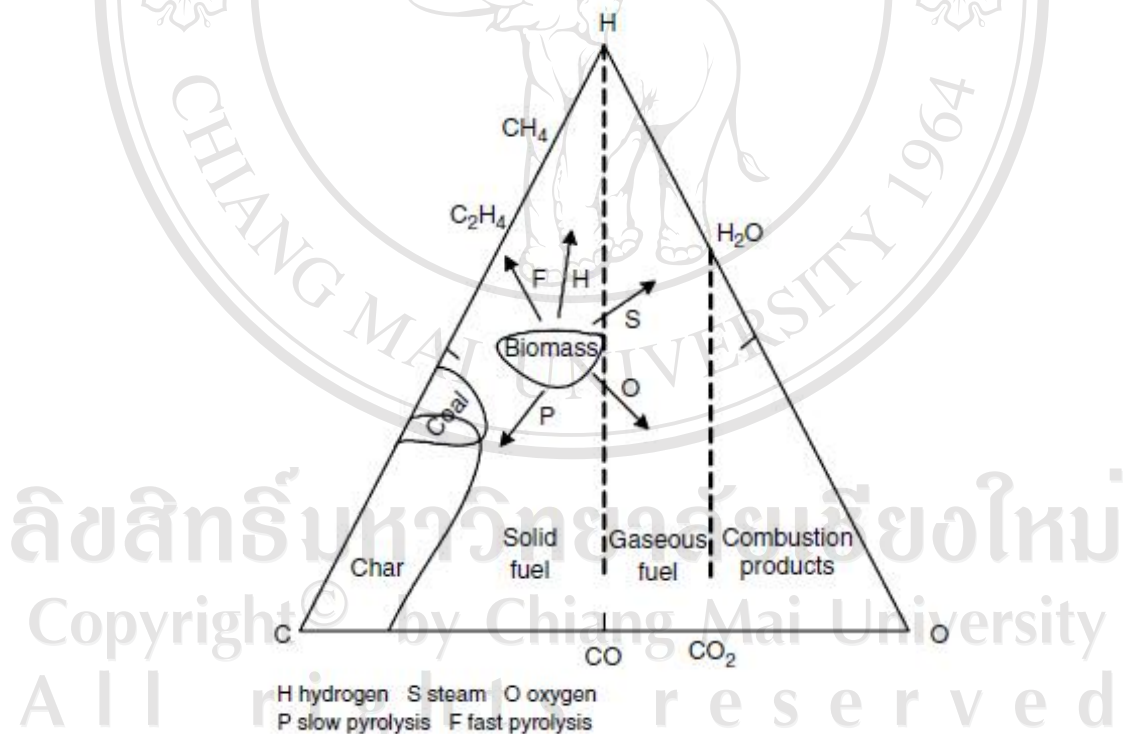
ไพโรไลซิสเป็นการสลายตัวทางความร้อนทำให้คาร์บอนบางส่วนที่เป็นองค์ประกอบของเชื้อเพลิงแข็งสลายตัวกลายเป็นก๊าซที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ เช่น ก๊าซมีเทน (CH₄) ก๊าซอีเทน (C₂H₆) เอทิลีน (C₂H₄) เป็นต้น แต่ไม่มีการเพิ่มขึ้นของไฮโดรเจนในก๊าซผลิตภัณฑ์ ส่วนขั้นตอนของแก๊สซิฟิเคชัน หรือการเกิดปฏิกิริยาของก๊าซผลิตภัณฑ์จำเป็นต้องมีตัวกลางมาทำปฏิกิริยากับก๊าซที่ได้จากขั้นตอนไพโรไลซิสและการเผาไหม้บางส่วน ซึ่งตัวกลางที่ใช้ทำปฏิกิริยาโดยทั่วไป ได้แก่ อากาศ ออกซิเจน และไอน้ำ ซึ่งตัวกลางเหล่านี้จะเข้าไปทำปฏิกิริยาทำให้เกิดการจัดเรียงโมเลกุลของก๊าซทำให้ก๊าซผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นสามารถนำไปใช้ประโยชน์ตามที่ต้องการได้ หรือควรเลือกใช้สารตัวกลางในการทำปฏิกิริยาให้เหมาะสมกับงานที่จะนำก๊าซผลิตภัณฑ์ไปใช้ต่อไป

2.1.1 สารตัวกลางที่ใช้ในปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน (Gasifying mediums)

สารตัวกลางจะทำปฏิกิริยาการธาตุคาร์บอนที่อยู่ในเชื้อเพลิงหรือถ่าน (Char) และก๊าซไฮโดรคาร์บอนที่ได้จากขั้นตอนไพโรไลซิส ให้กลายเป็นก๊าซที่มีขนาดของมวลโมเลกุลเล็กลง ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และก๊าซไฮโดรเจน (H_2) โดยสารตัวกลางที่นิยมใช้กันทั่วไปมีดังนี้

- อากาศ
- ก๊าซออกซิเจน
- ไอน้ำ

ก๊าซออกซิเจน (O_2) เป็นสารตัวกลางที่นิยมใช้กันมากในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ซึ่งออกซิเจนจะถูกใช้ในขั้นตอนการเผาไหม้เพื่อใช้เป็นแหล่งความร้อนของกระบวนการ ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันมีทั้งการใช้ก๊าซออกซิเจนบริสุทธิ์และก๊าซออกซิเจนจากอากาศซึ่งก๊าซออกซิเจนทั้ง 2 แหล่งสามารถใช้ได้ขึ้นอยู่กับคุณภาพก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ ซึ่งการทำปฏิกิริยาดังกล่าวสามารถอธิบายได้จากรูปที่ 2-1



รูปที่ 2-1 การเปลี่ยนรูปของสารตั้งต้น และการเกิดผลิตภัณฑ์ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

(Biomass Gasification and Pyrolysis Practical Design, Prabir Basu, 2010)

จากรูปที่ 2-1 จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นตัวกลางในการเกิดปฏิกิริยา เชื้อเพลิงที่ประกอบด้วยธาตุคาร์บอนในสถานะของแข็งเมื่อเกิดปฏิกิริยาจะมีการเคลื่อนที่ของ ปฏิกิริยาจากมุมสามเหลี่ยม C ไปยังมุมสามเหลี่ยม O กรณีเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันกราฟจะ เคลื่อนที่มายังจุด CO หมายถึงปริมาณก๊าซออกซิเจนไม่เพียงพอต่อการเผาไหม้ที่สมบูรณ์จึงทำ ให้ก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ แต่เมื่อปริมาณก๊าซออกซิเจนมากเกิดก็จะ ทำให้เกิดปฏิกิริยาเผาไหม้สมบูรณ์ทำให้ได้ก๊าซผลิตภัณฑ์เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) สารตัวกลางอีกตัวหนึ่งที่นิยมใช้นั้นก็คือไอน้ำ สำหรับไอน้ำจะทำให้การเคลื่อนที่ของ ปฏิกิริยาเคลื่อนจากมุมสามเหลี่ยม C ไปยังมุมสามเหลี่ยม H และก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็น ก๊าซจำพวกก๊าซไฮโดรคาร์บอนไปจนถึงก๊าซไฮโดรเจน ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดจากไอน้ำที่มากหรือน้อยจะสังเกตจากอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอน (H/C ratio) ของก๊าซผลิตภัณฑ์

สำหรับการเลือกใช้สารตัวกลางจะต้องดูผลของปฏิกิริยาและผลิตภัณฑ์ที่ได้จาก กระบวนการทั้งหมด เนื่องจากสารตัวกลางจะส่งผลไปยังคุณภาพของก๊าซผลิตภัณฑ์โดยเฉพาะ ค่าความร้อน ดังแสดงในตารางที่ 2-2

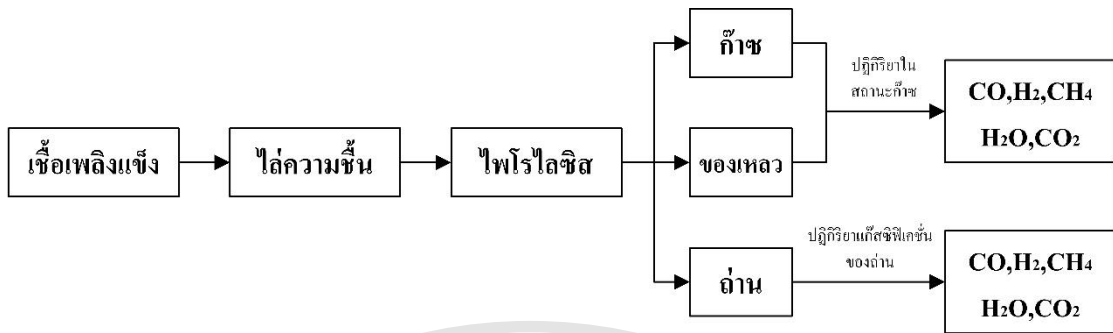
ตารางที่ 2-2 ค่าความร้อนของก๊าซผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันที่ใช้สารตัวกลางต่างกัน

สารตัวกลาง	ค่าความร้อน (MJ/Nm ³)
อากาศ	4-7
ไอน้ำ	10-18
ก๊าซออกซิเจน	12-28

2.1.2 ขั้นตอนในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

โดยทั่วไปกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจะมีอยู่ 4 ขั้นตอนซึ่งสามารถจำแนกได้โดย อุณหภูมิที่เกิดในแต่ละขั้นตอนจากมากไปหาน้อยได้ ดังนี้

- การไล่ความชื้น (Drying)
- การสลายตัวทางความร้อน หรือไพโรไลซิส (Pyrolysis)
- การเผาไหม้บางส่วน (Partial combustion)
- การเกิดปฏิกิริยาของก๊าซผลิตภัณฑ์ (Gasification)



รูปที่ 2-2 ขั้นตอนในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

(Biomass Gasification and Pyrolysis Practical Design, Prabir Basu, 2010)

1) การไล่ความชื้น (Drying)

ความชื้นมีอยู่ในเชื้อเพลิงแข็งทุกประเภทซึ่งจะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อเพลิง เช่น ชีวมวลมีความชื้นประมาณ 30-60% ถ่านหินมีความชื้นประมาณ 10-30% เป็นต้น ซึ่งความชื้นเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้สูญเสียพลังงานเชื้อเพลิง เนื่องจากการไล่ความชื้นเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน ทำให้เชื้อเพลิงที่มีความชื้นสูงจะต้องการพลังงานในการระเหยของน้ำที่สะสมอยู่ในเชื้อเพลิงออกเป็นปริมาณมาก จึงจะสามารถเกิดปฏิกิริยาในขั้นตอนต่อไปได้ และอาจทำให้ความร้อนไม่เพียงพอต่อการเกิดก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ต้องการได้

เชื้อเพลิงที่เหมาะสมกับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันควรมีความชื้นประมาณ 10-20% ซึ่งการไล่ความชื้นจะเกิดขึ้นขณะเชื้อเพลิงถูกป้อนเข้าสู่เตาปฏิกรณ์อุณหภูมิที่ใช้ในการไล่ความชื้นประมาณ 100-200 °C จากนั้นอุณหภูมิของเชื้อเพลิงแข็งจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เพื่อใช้ในการเกิดปฏิกิริยาในขั้นตอนถัดไปคือไพโรไลซิส

2) ไพโรไลซิส (Pyrolysis)

ขั้นตอนนี้ไม่จำเป็นต้องใช้สารตัวกลางในการเกิดปฏิกิริยาใช้เพียงความร้อนที่อุณหภูมิ 200-500 °C ทำให้เกิดการสลายตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนให้เป็นสารระเหยในสถานะก๊าซ และส่วนของแข็งที่เหลือจะกลายเป็นถ่าน จากรูปที่ 2-1 ปฏิกิริยาไพโรไลซิสจะเกิดจากมุม C ไปยังมุม H ทำให้เกิดก๊าซที่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีทั้งก๊าซที่สามารถควบแน่นและไม่สามารถควบแน่นผสมอยู่

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากขั้นตอนนี้คือก๊าซไฮโดรคาร์บอนที่สามารถควบแน่นได้ ก่อนที่จะนำก๊าซผลิตภัณฑ์ไปใช้ประโยชน์มักจะต้องผ่านกระบวนการทำความสะอาดก๊าซก่อน โดยเฉพาะการนำไปใช้กับเครื่องยนต์ ทำให้ก๊าซเกิดการควบแน่นกลายเป็น

น้ำมันดินหรือทาร์ (Tar) ซึ่งทำให้เกิดของเหลวเหนียวติดตามอุปกรณ์ต่างๆ และส่งผลเสียถึงประสิทธิภาพของการใช้งาน การกำจัดทาร์คือการทำให้ก๊าซที่สามารถควบแน่นได้มีปริมาณลดลง ซึ่งเรียกรวมกันว่า Tar Cracking และ Tar Reforming

3) การเผาไหม้บางส่วน (Partial combustion)

การเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 500-1200 °C ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่ให้ความร้อนกับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน เนื่องจากปฏิกิริยาในทุกขั้นตอนเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อนที่ต้องการพลังงานในการเกิดปฏิกิริยา จากรูปที่ 2-1 ปฏิกิริยาการเผาไหม้จะเกิดขึ้นจากมุม C ไปยังมุม O ซึ่งปฏิกิริยาที่สำคัญคือปฏิกิริยา R5 (ในตารางที่ 2-3) เป็นปฏิกิริยาที่ปล่อยพลังงานสูงถึง 394 kJ/mol แต่ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจำเป็นต้องควบคุมปริมาณของก๊าซออกซิเจนหรืออากาศที่ใช้เป็นตัวกลางในการเกิดปฏิกิริยา เนื่องจากปฏิกิริยาการเผาไหม้สามารถเกิดขึ้นได้เร็วกว่าปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน อีกทั้งยังส่งผลไปยังคุณภาพของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการอีกด้วย

4) การเกิดปฏิกิริยาของก๊าซผลิตภัณฑ์ (Gasification)

หลังจากเกิดก๊าซที่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนและถ่าน (Char) จากขั้นตอนไพโรไลซิส และความร้อนที่ได้จากขั้นตอนการเผาไหม้ ทำให้เกิดปฏิกิริยาแปลงเป็นก๊าซเชื้อเพลิงเกิดขึ้น (ตารางที่ 2-3) ที่อุณหภูมิ 500-1300 °C

2.1.3 ปฏิกิริยาในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification reaction)

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาที่มีความหลากหลายมาก ทั้งปฏิกิริยาที่เกิดจากเชื้อเพลิงและปฏิกิริยาที่เกิดจากก๊าซในกระบวนการ ซึ่งในทางปฏิบัติไม่สามารถทราบได้แน่ชัดว่าปฏิกิริยาไหนเกิดขึ้นเท่าไร แต่สามารถบอกปฏิกิริยาหลักๆ ที่เกิดขึ้นได้ ดังแสดงในตารางที่ 2-2

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

ตารางที่ 2-3 ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

Carbon Reaction	
R1	$C + CO_2 \leftrightarrow 2CO + 172 \text{ kJ/mol}$
R2	$C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2 + 131 \text{ kJ/mol}$
R3	$C + CO_2 \leftrightarrow 2CO + 172 \text{ kJ/mol}$
R4	$C + 0.5O_2 \rightarrow CO - 111 \text{ kJ/mol}$
Oxidation Reaction	
R5	$C + O_2 \rightarrow CO_2 - 394 \text{ kJ/mol}$
R6	$CO + 0.5O_2 \rightarrow CO_2 - 284 \text{ kJ/mol}$
R7	$CH_4 + 2O_2 \leftrightarrow CO_2 + 2H_2O - 803 \text{ kJ/mol}$
R8	$H_2 + 0.5O_2 \rightarrow H_2O - 242 \text{ kJ/mol}$
R9	$CH_4 + 0.5O_2 \rightarrow CO + 2H_2 - 36 \text{ kJ/mol}$
Shift Reaction	
R10	$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2 - 41.2 \text{ kJ/mol}$
Methanation Reaction	
R11	$2CO + 2H_2 \rightarrow CH_4 + CO_2 - 247 \text{ kJ/mol}$
R12	$CO + 3H_2 \leftrightarrow CH_4 + H_2O - 206 \text{ kJ/mol}$
R13	$CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O - 165 \text{ kJ/mol}$
Steam-Reforming Reaction	
R14	$CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3H_2 + 206 \text{ kJ/mol}$
R15	$CH_4 + 2H_2O \leftrightarrow CO_2 + 4H_2 + 165 \text{ kJ/mol}$

1) ปฏิกิริยาการเผาไหม้ (Oxidation reaction)

คือปฏิกิริยาคายความร้อนที่คาร์บอน (C) และไฮโดรเจน (H) ที่มีอยู่ในเชื้อเพลิง

แข็งทำปฏิกิริยากับก๊าซออกซิเจน (O₂) ในอากาศ



2) ปฏิกริยารีดักชัน (Reduction reaction)

คือปฏิกิริยาคูดความร้อนที่ก๊าซผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาเผาไหม้ทำปฏิกิริยากับถ่านร้อน ทำให้ก๊าซเปลี่ยนสภาพเป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และก๊าซไฮโดรเจน (H₂) ซึ่งเป็นก๊าซที่เผาไหม้ได้ ประกอบด้วย 2 ปฏิกิริยาหลัก 2 ดังนี้

ปฏิกิริยาบูดูอาร์ด (Boudouard reaction)



ปฏิกิริยาน้ำเปล่งก๊าซ (Water gas reaction)



3) ปฏิกริยาชิฟต์ (Water gas shift reaction)

คือปฏิกิริยาคายความร้อนที่มีก๊าซเป็นสารตั้งต้นทำปฏิกิริยากับไอน้ำ ปฏิกิริยานี้จะทำให้ค่าความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้ลดลง เนื่องจากมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นปฏิกิริยานี้จึงเหมาะสำหรับการผลิตก๊าซไฮโดรเจน



4) ปฏิกริยาการแปลงมีเทน (Methanation reaction)

คือปฏิกิริยาคายความร้อนที่ก๊าซไฮโดรเจนทำปฏิกิริยากับถ่านร้อนจนเปลี่ยนสภาพเป็นก๊าซมีเทน (CH₄) แต่ปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น



5) ปฏิกริยาการแปลงก๊าซด้วยไอน้ำ (Steam reforming reaction)

คือปฏิกิริยาคูดความร้อนที่ก๊าซมีเทนทำปฏิกิริยากับไอน้ำ ภายในเตาปฏิกรณ์ภายใต้สภาวะความร้อนสูง และต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา จึงจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นก๊าซไฮโดรเจนมากที่สุด



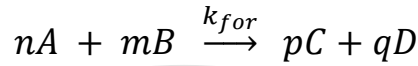
6) การสลายตัวของคาร์บอเนต (Carbonate decomposition)

คาร์บอเนตเป็นสารอนินทรีย์ ที่พบมากที่สุดในหินน้ำมัน เมื่อได้รับความร้อน จะเกิดการสลายตัวให้ผลิตภัณฑ์เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งสามารถนำไปทำปฏิกิริยาต่อไป



2.2 สมดุลเคมี (Chemical Equilibrium)

การคำนวณเกี่ยวกับสมดุลเคมีช่วยในการกำหนดปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการนั้นๆ จากการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นว่าปฏิกิริยานั้นเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์หรือไม่ ซึ่งสามารถอธิบายได้ขณะที่ปฏิกิริยาอยู่ในสภาวะสมดุลว่าปฏิกิริยานั้นเกิดขึ้นได้เร็วหรือช้า ดังนี้



เมื่อ n , m , p และ q เป็นสัมประสิทธิ์ปริมาณสัมพันธ์ (Stoichiometric coefficient) การเกิดปฏิกิริยาข้างต้นกำหนดให้ r_1 คืออัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้า โดยจะขึ้นอยู่กับ C_A และ C_B ที่เป็นการเข้มข้นของสารตั้งต้น A และ B ตามลำดับ

$$r_1 = k_{for} C_A^n C_B^m$$

สำหรับปฏิกิริยาย้อนกลับจะได้ว่า



กำหนดให้ r_2 คืออัตราการเกิดปฏิกิริยาไปย้อนกลับ โดยจะขึ้นอยู่กับ C_C และ C_D ที่เป็นการเข้มข้นของสารตั้งต้น C และ D ตามลำดับ

$$r_2 = k_{back} C_C^p C_D^q$$

เมื่อปฏิกิริยาเริ่มเกิดขึ้นความเข้มข้นของสารตั้งต้น A และ B สูง ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าสูงกว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ ปฏิกิริยานี้จึงยังไม่อยู่ในสภาวะสมดุล ($r_1 > r_2$) เมื่อปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องทำให้ความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์ C และ D เพิ่มขึ้น ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับเพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าและย้อนกลับเท่ากัน ($r_1 = r_2$) ปฏิกิริยานี้จะเข้าสู่สภาวะสมดุล โดยมีข้อสังเกต ดังนี้

- ความเข้มข้นของสารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์ไม่มีการเปลี่ยนแปลง
- อัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้ามีค่าเท่ากับปฏิกิริยาย้อนกลับ
- พลังงานอิสระของกิบส์มีค่าต่ำ
- เอนโทรปีของระบบมีค่าสูง

จากสภาวะสมดุลจะได้

$$r_1 = r_2$$
$$k_{for} C_A^n C_B^m = k_{back} C_C^p C_D^q$$

ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา (Reaction rate Constant: k) จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของปฏิกิริยา สามารถเขียนในรูปแบบของอาร์เรเนียส (Arrhenius)

$$k = A_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$$

โดยที่ A_0 คือค่า Pre exponential constant

R คือค่าคงที่สากลของก๊าซ (Universal gas constant)

E คือพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยา (Activated energy)

อัตราส่วนระหว่างค่าคงที่ของปฏิกิริยาไปข้างหน้า (k_{for}) กับปฏิกิริยาย้อนกลับ (k_{back}) ถูกเรียกว่า ค่าคงที่ของสมดุล (Equilibrium constant: K_e)

$$K_e = \frac{k_{for}}{k_{back}} = \frac{C_C^p C_D^q}{C_A^n C_B^m}$$

ซึ่งค่าคงที่ของสมดุลจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิแต่ไม่ขึ้นกับความดัน ตัวอย่างปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน มีค่าคงที่สมดุลและเอนทาลปีของการเกิด (Heat of formation) ดังตารางที่ 2-4

ตารางที่ 2-4 ค่าสมดุลของปฏิกิริยาและเอนทาลปีของการเกิดของปฏิกิริยาในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

Reaction	Equilibrium constant ($\log_{10} K$)			Heat of formation (kJ/mol)	
	298 K	1000 K	1500 K	1000 K	1500 K
$C + 1/2 O_2 \rightarrow CO$	24.065	10.483	8.507	-111.9	-116.1
$C + O_2 \rightarrow CO_2$	69.134	20.677	13.801	-394.5	-395.0
$C + 2H_2 \rightarrow CH_4$	8.906	-0.999	-2.590	-89.5	-94.0
$2C + 2H_2 \rightarrow C_2H_4$	-11.940	-6.189	-5.551	38.7	33.2
$H_2 + 1/2 O_2 \rightarrow H_2O$	40.073	10.070	5.733	-247.8	-250.5

(Probst and Hicks, 2006)

2.3 พลังงานอิสระของกิบส์ (Gibbs Free Energy)

พลังงานอิสระของกิบส์ถือว่าเป็นฟังก์ชันที่สำคัญในการคำนวณทางอุณหพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเคมี โดยคำนวณจากการเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปี (Entropy: S) และเอนทาลปี (Enthalpy: H) ดังสมการ

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

โดยสามารถคำนวณจากเอนโทรปีและเอนทาลปีของสารแต่ละตัวในปฏิกิริยา ซึ่งจะอ้างอิงที่สภาวะความดัน 1 บรรยากาศ 298 K

$$\Delta G_{f,T}^0 = \Delta h_{298}^0 - a'T \ln(T) - b'T^2 - \left(\frac{c'}{2}\right)T^3 - \left(\frac{d'}{3}\right)T^4 + \left(\frac{e'}{2T}\right) + f' + g'T \frac{kJ}{mol}$$

$$\Delta H_{f,T}^0 = \Delta h_{298}^0 + a'T + b'T^2 + c'T^3 + d'T^4 + \left(\frac{e'}{T}\right) + f' \text{ kJ/mol}$$

ตารางที่ 2-5 ค่าคงที่ที่ใช้ในการคำนวณพลังงานอิสระของกิบส์

Product	HHV (kJ/mol)	$\Delta_f G_{298}^0$ (kJ/mol)	$\Delta_f H_{298}^0$ (kJ/mol)	Empirical Coefficients							
				a'	b'	c'	d'	e'	f'	g'	
C	393.5	0	0								
CO	283	-137.3	-110.5	5.619×10^{-3}	-1.19×10^{-5}	6.383×10^{-9}	-1.846×10^{-12}	-4.891×10^2	0.868	-6.131×10^{-2}	
CO ₂	0	-394.4	-393.5	-1.949×10^{-2}	3.122×10^{-5}	-2.448×10^{-8}	6.946×10^{-12}	-4.891×10^2	5.27	-0.1207	
CH ₄	890.3	-50.8	-74.8	-4.62×10^{-2}	1.13×10^{-5}	1.319×10^{-8}	-6.647×10^{-12}	-4.891×10^2	14.11	0.2234	
C ₂ H ₄	1411	68.1	52.3	-7.281×10^{-2}	5.802×10^{-5}	-1.861×10^{-8}	5.648×10^{-13}	-9.782×10^2	20.32	-0.4076	
CH ₃ OH	763.9	-161.6	-201.2	-5.834×10^{-2}	2.07×10^{-5}	1.491×10^{-8}	-9.614×10^{-12}	-4.891×10^2	16.88	-0.2467	
H ₂ O (steam)	0	-228.6	-241.8	-8.95×10^{-2}	-3.672×10^{-6}	5.209×10^{-9}	-1.478×10^{-12}	0	2.868	-0.0172	
H ₂ O (water)	0	-237.2	-285.8								
O ₂	0	0	0								
H ₂	285.8	0	0								

(Probdtein and Hicks, 2006)

ค่าคงที่ของสมมูลสามารถคำนวณได้จากพลังงานอิสระของกิบส์ ดังสมการ

$$K_e = \exp\left(-\frac{\Delta G}{RT}\right)$$

โดยที่ R คือ ค่า Universal gas constant = 0.008314 kJ/mol.K

2.4 ค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง (A/F)

ในการเผาไหม้ มักจะใช้ค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง (A/F) ในการบอกการผสมกันในปฏิกิริยาการเผาไหม้ระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง เพื่อใช้เป็นค่าอ้างอิงในการทำปฏิกิริยาในการทดลองจริง อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงของการเผาไหม้ที่สมบูรณ์คือ (A/F)_{stoi}

$$(A/F)_{stoi} = \frac{\text{ปริมาณอากาศที่ใช้}}{\text{ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้}}$$

2.4.1 อัตราส่วนสมมูลของอากาศ (Equivalence ratio: ER, ϕ)

เป็นค่าที่บอกอัตราส่วนผสมของอากาศกับเชื้อเพลิงในการเผาไหม้จริง เทียบกับอัตราส่วนทางสโตยคิโอเมตรีของการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ อัตราส่วนสมมูลมี 2 ชนิด คือ อัตราส่วนสมมูลของออกซิไดเซอร์ (Oxidizer equivalence ratio: ϕ_{oxi}) และอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิง (Fuel equivalence ratio: ϕ_{fuel})

$$\phi_{oxi} = \frac{(A/F)_{act}}{(A/F)_{stoi}}$$

หรือ

$$\phi_{fuel} = \frac{1}{\phi_{oxi}}$$

$(A/F)_{act}$ คือค่าอัตราส่วนสมมูลที่ใช้งานจริง

ถ้า $\phi_{oxi} > 1$ หรือ $\phi_{fuel} < 1$ คือมีปริมาณอากาศในปฏิกิริยาจริงมากกว่าปริมาณอากาศทางสโตยคิโอเมตรีของการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ (Fuel lean mixture)

ถ้า $\phi_{oxi} < 1$ หรือ $\phi_{fuel} > 1$ คือมีปริมาณอากาศในปฏิกิริยาจริงน้อยกว่าปริมาณอากาศทางสโตยคิโอเมตรีของการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ (Fuel rich mixture)

ถ้า $\phi_{oxi} = \phi_{fuel} = 1$ คือมีปริมาณอากาศในปฏิกิริยาจริงเท่ากับปริมาณอากาศทางสโตยคิโอเมตรีของการเผาไหม้ที่สมบูรณ์

2.5 อัตราส่วนไอน้ำต่อเชื้อเพลิง (S/F)

ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันมักจะใช้ไอน้ำร่วมกับการเกิดปฏิกิริยาชิฟต์ (Water gas shift reaction) เพื่อผลิตแก๊สไฮโดรเจน ซึ่งการใช้ไอน้ำจะถูกเทียบอัตราส่วนกับเชื้อเพลิงด้วยอัตราส่วนโดยโมล ดังสมการ

$$S/F = \frac{\dot{m}_{steam}}{\dot{m}_{fuel}}$$

2.6 ค่าความร้อน (Heating Value)

ค่าความร้อนเชื้อเพลิง (Heating Value) หมายถึง ปริมาณความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงนั้นๆ 1 หน่วยมวล (สำหรับเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งและของเหลว) หรือ 1 หน่วยปริมาตร (สำหรับเชื้อเพลิงที่เป็นแก๊ส) เมื่อเผาไหม้หมดอย่างสมบูรณ์ ค่าความร้อนมี 2 ประเภท ได้แก่

2.6.1 ค่าความร้อนต่ำ (Low Heating Value: LHV) คือค่าความร้อนที่ให้ออกมาหลังจากการเผาไหม้สมบูรณ์ เมื่อน้ำที่อยู่ในเชื้อเพลิงและที่เกิดจากการเผาไหม้อยู่ในสถานะไอ

2.6.2 ค่าความร้อนสูง (High Heating Value: HHV) คือค่าความร้อนที่ให้ออกมาหลังจากการเผาไหม้สมบูรณ์ เมื่อน้ำที่อยู่ในเชื้อเพลิงและที่เกิดจากการเผาไหม้อยู่ในสถานะของเหลว

ซึ่งก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองจะมีค่าความร้อนมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับสัดส่วนของก๊าซเชื้อเพลิงที่เป็นองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์ ค่าความร้อนสูง (HHV) จึงคำนวณจากผลรวมของค่าความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิงแต่ละชนิดที่มีอยู่ในองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์ ค่าความร้อนสูงเป็นค่าที่เหมาะสมแก่การคำนวณประสิทธิภาพของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเพราะเป็นการคิดค่าพลังงานรวมของเชื้อเพลิงเมื่อเกิดการเผาไหม้ (ค่าความร้อนสูงได้คิดความร้อนของไอน้ำที่เป็นผลิตภัณฑ์ควบแน่นเป็นน้ำด้วย)

ตารางที่ 2-6 ค่าความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิง

ก๊าซเชื้อเพลิง	LHV		HHV	
	MJ/m ³	MJ/kg	MJ/m ³	MJ/kg
ไฮโดรเจน	10.78	120.09	12.74	142.09
คาร์บอนมอนอกไซด์	12.63	10.16	12.63	10.16
มีเทน	35.88	49.86	39.82	55.39

$$HHV = \sum_{i=H_2,CO,CH_4} X_i \cdot HHV_i$$

โดยที่

HHV = ค่าความร้อนสูงของก๊าซก๊าซผลิตภัณฑ์ (MJ/m³)

X_i = สัดส่วนองค์ประกอบก๊าซเชื้อเพลิง (%vol)

HHV_i = ค่าความร้อนสูงของก๊าซเชื้อเพลิงที่เป็นองค์ประกอบในก๊าซผลิตภัณฑ์ (MJ/m³)

2.7 ประสิทธิภาพแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification efficiency)

คือค่าที่บอกถึงการเปลี่ยนแปลงพลังงานของเชื้อเพลิงแข็งไปเป็นก๊าซเชื้อเพลิง โดยใช้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงแข็งและค่าความร้อนของก๊าซผลิตภัณฑ์เป็นตัววัดประสิทธิภาพของกระบวนการ ซึ่งก๊าซที่ได้ออกมาจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

ประสิทธิภาพก๊าซเย็น (Cold gas efficiency) คืออัตราส่วนระหว่างพลังงานที่ได้รับจากก๊าซผลิตภัณฑ์กับพลังงานของเชื้อเพลิงแข็งที่ใช้เป็นสารตั้งต้น ใช้งบมากกว่าระบบการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงนี้มีคุณภาพมากหรือน้อยเพียงใด

$$\eta_{cg} = \frac{Q_g M_g}{LHV_f M_f}$$

โดยที่

η_{cg} = ประสิทธิภาพก๊าซเย็น

Q_g = พลังงานจากก๊าซเชื้อเพลิง (kJ/kg)

M_g = มวลก๊าซผลิตภัณฑ์ (kg)

LHV_f = ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงแข็ง (kJ/kg)

M_f = มวลเชื้อเพลิงแข็ง (kg)

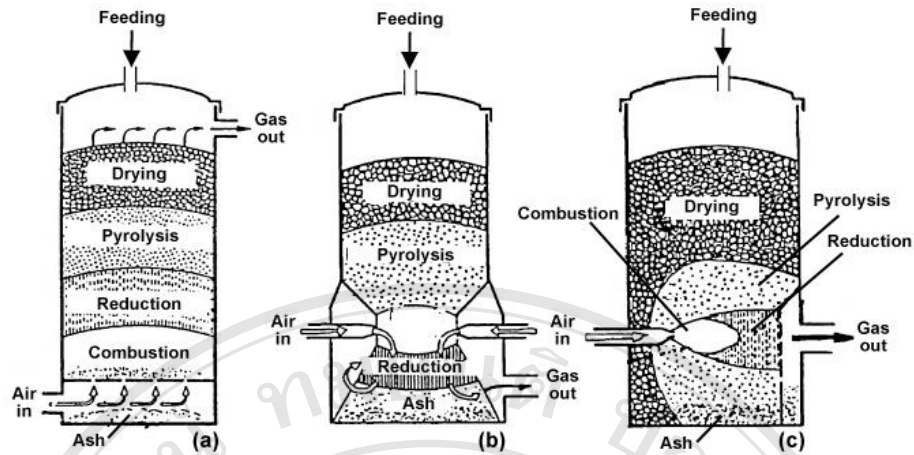
2.8 ประเภทของเตาปฏิกรณ์

เตาปฏิกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน เรียกว่า แก๊สซิฟายเออร์ (Gasifier) ซึ่งมีอยู่หลายรูปแบบในปัจจุบัน สามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ โดยอ้างอิงจากชั้นของเชื้อเพลิง ดังนี้

2.8.1 เตาปฏิกรณ์แบบชั้นเชื้อเพลิงนิ่ง (Fixed bed gasifier)

เตาปฏิกรณ์แบบชั้นเชื้อเพลิงนิ่ง หรือเบดนิ่ง คือเตาปฏิกรณ์ที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน ใช้งาน และราคาไม่สูงมากนัก โดยทั่วไปเตาปฏิกรณ์เบดนิ่งจะมีการออกแบบหลักๆ อยู่ 3 แบบ ได้แก่ เตาปฏิกรณ์ชนิดก๊าซเชื้อเพลิงไหลขึ้น (Up draft gasifier) เตาปฏิกรณ์ชนิดก๊าซเชื้อเพลิงไหลลง (Down draft gasifier) และเตาปฏิกรณ์ชนิดก๊าซเชื้อเพลิงไหลขวาง (Cross draft gasifier) ดังรูปที่ 2-3

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 2-3 เตาปฏิกรณ์แบบแบบชั้นเชื้อเพลิงนิ่ง

(a) เตาปฏิกรณ์ชนิดก๊าซเชื้อเพลิงไหลขึ้น

(b) เตาปฏิกรณ์ชนิดก๊าซเชื้อเพลิงไหลลง

(c) เตาปฏิกรณ์ชนิดก๊าซเชื้อเพลิงไหลขวาง

1) เตาปฏิกรณ์แบบก๊าซไหลขึ้น (Updraft gasifier)

เป็นเตาที่ผลิตใช้เริ่มแรกและเป็นแบบที่ง่ายที่สุด เชื้อเพลิงจะถูกป้อนเข้าทางส่วนบนของเตา และอากาศจะถูกส่งผ่านตะแกรงเข้ามาด้านล่าง บริเวณเหนือตะแกรงจะเป็นบริเวณการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง เกิดปฏิกิริยาขึ้นได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ก๊าซร้อนที่ผ่านจากบริเวณการเผาไหม้จะมีอุณหภูมิสูง และถูกส่งไปยังบริเวณปฏิกิริยารีดักชันซึ่งเป็นบริเวณที่มีปริมาณของก๊าซคาร์บอนมากเพียงพอที่จะก่อให้เกิดปฏิกิริยากับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ได้เป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน หลังจากนั้นก๊าซที่ได้จะไหลเข้าสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าในชั้นของชีวมวล และแตกตัวในช่วงอุณหภูมิ 200–500 °C หลังจากนั้นก๊าซก็จะไหลเข้าสู่ชั้นของชีวมวลใหม่ที่เพิ่งป้อน ก๊าซยังคงมีอุณหภูมิสูงอยู่จึงระเหยความชื้นที่อยู่ในชีวมวลเหล่านั้นออก ทำให้ก๊าซที่ออกจากเตาชีวมวลมีอุณหภูมิต่ำลง ดังรูปที่ 2-3a

เตาปฏิกรณ์ประเภทนี้เหมาะสมกับชีวมวลหลากหลายชนิด ง่ายต่อการเตรียมเชื้อเพลิง มีประสิทธิภาพสูง เพราะได้อุณหภูมิก๊าซออกต่ำ ติดตั้งง่ายและสะดวก แต่มีข้อเสียคือมีปริมาณน้ำมันดินออกมามาก เพราะน้ำมันดินที่ผลิตได้ในบริเวณไพโรไลซิส ไม่ได้ผ่านบริเวณปฏิกิริยาการเผาไหม้ก่อนออก จึงเกิดการสลายตัวทางความร้อนของน้ำมันดินน้อย การกำจัดน้ำมันดินที่ควบแน่นออกมาเป็นปัญหาใหญ่ของแก๊สซิฟายเออร์ประเภทนี้ การปรับการออกแบบบางอย่างสามารถลดปริมาณน้ำมันดินได้ เช่น

การดึงก๊าซที่ผลิตได้ออกที่เหนือบริเวณรีดักชัน อีกวิธีการหนึ่งที่นิยมใช้ คือ การเติมไอน้ำร้อนผสมเข้ากับอากาศเพื่อส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยา water gas และจะได้ก๊าซเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพดีขึ้น ซึ่งการออกแบบมักจะรวมการสร้างไอน้ำไว้ในตัวเตาด้วย เพื่อใช้ในการแก้ปัญหานี้โดยเฉพาะ

2) เตาปฏิกรณ์แบบก๊าซไหลลง (Downdraft gasifier)

ดังรูปที่ 2-3b ออกแบบขึ้นมาเพื่อจัดน้ำมันดินที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงแข็ง โดยเฉพาะ อากาศจะถูกดูดผ่านจากด้านบนลงสู่ด้านล่างของเตาผ่านกลุ่มของหัวฉีดซึ่งเรียกว่า Tuyers บริเวณหัวฉีดจะเป็นบริเวณการเผาไหม้ ก๊าซที่ได้จากบริเวณนี้จะเกิดรีดักชันในขณะที่ไหลลงสู่ด้านล่างและผ่านชั้นของคาร์บอนร้อนซึ่งอยู่เหนือตะแกรงขณะเดียวกันในชั้นของชีวมวลที่อยู่ทางด้านบนของบริเวณการเผาไหม้จะมีปริมาณออกซิเจนน้อยมาก ทำให้เกิดการสลายตัวทางความร้อนและไอน้ำของน้ำมันดินที่เกิดขึ้นจะไหลผ่านชั้นของคาร์บอนที่ร้อนทำให้น้ำมันดินเกิดการแตกตัวเป็นก๊าซ ซึ่งการแตกตัวนี้จะเกิดที่อุณหภูมิในช่วงระหว่าง 800-1,000 °C ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 1,000 °C ปฏิกิริยาคายความร้อนจะทำให้ก๊าซที่ได้มีอุณหภูมิต่ำลง แต่ถ้าอุณหภูมิต่ำกว่าช่วงอุณหภูมิดังกล่าว ปฏิกิริยาคายความร้อนจะทำให้ก๊าซที่ได้มีอุณหภูมิสูงขึ้น ก๊าซที่ผ่านบริเวณการเผาไหม้จะมีส่วนประกอบของน้ำมันดินและน้ำมันที่มีปริมาตรลดลงเหลือน้อยกว่า 10% ของน้ำมันดินและน้ำมันที่ได้จากเตาแบบก๊าซไหลขึ้น และก๊าซที่ได้จะมีความสะอาดมากกว่า ทำให้ใช้การกรองน้อยลง เตาแบบก๊าซไหลขึ้นและไหลลงจะมีความเร็วของอากาศไหลผ่านต่ำ และถ้าจะอยู่บริเวณตะแกรง ดังนั้นจึงมีปริมาณถ่านติดออกมากับก๊าซเชื้อเพลิงน้อยมาก

3) เตาปฏิกรณ์แบบไหลขวาง (Crossdraft gasifier)

ดังรูปที่ 2-3c อากาศจะถูกดูดผ่านหัวฉีดซึ่งอยู่ในแนวราบบริเวณการเผาไหม้และถัดออกไปจะเป็นบริเวณรีดักชัน ก๊าซชีวมวลจะออกสู่ภายนอกโดยผ่านตะแกรงรอบเตาซึ่งอยู่ในแนวตั้ง โดยรอบ ไอสารระเหยและน้ำมันดินที่ได้จากการไพโรไลซิสจะผ่านบริเวณรีดักชันที่อุณหภูมิสูงก่อนจะออกจากเตา ซึ่งทำให้น้ำมันและน้ำมันดินเกิดการแตกตัวเป็นก๊าซก่อนทำให้ก๊าซชีวมวลที่ได้มีปริมาณน้ำมันและน้ำมันดินต่ำ เตาแบบนี้ได้ทำการออกแบบให้สามารถใช้กับยานพาหนะได้ เนื่องจากมีน้ำหนักเบาและมีผลตอบสนองเร็วต่อการเปลี่ยนแปลงของภาระที่กระทำอยู่ เชื้อเพลิงที่ควรนำมาใช้กับเตาประเภทนี้ควรเป็นถ่านไม้ที่มีคุณภาพสูง

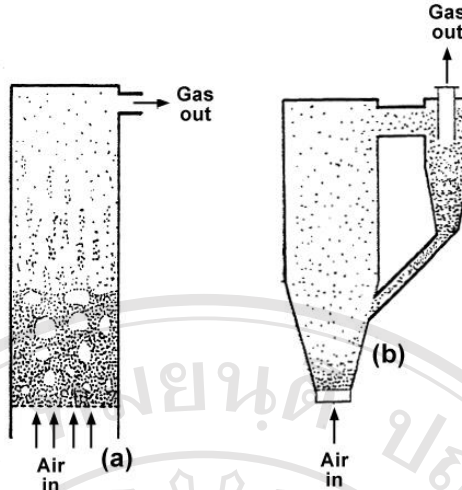
2.8.2 เตาปฏิกรณ์แบบชั้นของไหล (Fluidized bed gasifier)

การทำให้มีสถานะเสมือนของไหล (fluidization) หมายถึง การทำให้กลุ่มเม็ดของแข็งขนาดเล็กเปลี่ยนไปมีสถานะคล้ายของไหลโดยการสัมผัสกับก๊าซหรือของเหลว ในชั้นของเหลว (fluidized bed) แรงโน้มถ่วงกระทำต่อน้ำหนักเม็ดของแข็งจะถูกต้านด้วยแรงจากการไหลขึ้นของก๊าซ ทำให้เม็ดของแข็งอยู่ในสถานะกึ่งแขวนลอย พิจารณาการไหลของก๊าซหรืออากาศผ่านชั้นกลุ่มเม็ดของแข็งที่กองอยู่บนตะแกรงพอร์นภายในช่องท่อเมื่อความเร็วของก๊าซเพิ่มสูงขึ้นจะเกิดการเคลื่อนที่ของเม็ดของแข็งเหล่านี้ โดยที่ความเร็วก๊าซต่ำๆ กลุ่มเม็ดของแข็งจะอยู่นิ่งกับที่ตามปกติบนพื้นตะแกรง แต่เมื่อความเร็วสูงขึ้นเรื่อยๆ แรงยกบนเม็ดของแข็งจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งทำให้เม็ดของแข็งยกตัว ชั้นเม็ดของแข็งขยายตัวออกอยู่ในสถานะกึ่งแขวนลอยคล้ายของเหลวที่กำลังเดือด หากเพิ่มความเร็วก๊าซขึ้นไปอีก ก็จะมีแรงมากพอที่จะเป่าเม็ดของแข็งเหล่านี้ให้หลุดออกไปได้

ในเตาแบบชั้นของไหลนี้ ก๊าซจะไหลผ่านชั้นของเม็ดวัสดุเฉื่อย ส่วนใหญ่ใช้เม็ดทรายขนาดเล็กหรือวัสดุเร่งปฏิกิริยา เช่น หินปูน ซึ่งจะช่วยในการถ่ายเทความร้อนและช่วยทำความสะอาดก๊าซที่ได้ ในขณะที่เริ่มติดไฟนั้นชั้นเม็ดวัสดุเฉื่อยจะเริ่มร้อนขึ้นจนมีอุณหภูมิสูงถึงจุดติดไฟของเชื้อเพลิงได้ หลังจากนั้นเม็ดเชื้อเพลิงแข็งขนาดเล็กจึงจะถูกป้อนเข้าเตาอย่างสม่ำเสมอ

เตาปฏิกรณ์แบบนี้มีข้อดี คือ การควบคุมอุณหภูมิในเตาสามารถกระทำได้ง่าย จึงสามารถรักษาอุณหภูมิให้ต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของถ่านได้ ทำให้ไม่เกิดการจับตัวของถ่านหลอมที่เกิดขึ้น จึงสามารถใช้เชื้อเพลิงที่มีถ่านมากได้ โดยที่ถ่านเป็นเตาปฏิกรณ์แบบอื่นจะเกิดปัญหาข้อเสียของเตาเผาแบบนี้ คือ ก๊าซชีวมวลที่ออกจากเตา จะมีปริมาณถ่านและฝุ่นถ่านออกมาด้วยมาก เนื่องจากความเร็วของอากาศภายในเตามีค่าสูง จึงต้องมีการนำถังไซโคลนหรือถุงกรองมาใช้กับระบบด้วย

เตาปฏิกรณ์แบบชั้นของไหลยังแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ แบบฟองอากาศ (bubbling) และแบบหมุนวน (circulating) ชั้นของไหลแบบฟองอากาศเกิดที่ความเร็วก๊าซต่ำ ในขณะที่ชั้นของไหลหมุนวนถูกพัฒนาเพื่อลดปริมาณถ่านที่หลุดรอดจากปฏิกิริยา (carbon carryover) โดยการนำกลับมาวนเข้าปฏิกรณ์ซ้ำ ชั้นของไหลแบบนี้จะมีความเร็วของก๊าซสูงกว่าแบบฟองอากาศธรรมดา ทำให้มีระดับความปั่นป่วนสูง อนุภาคถูกพัดออกไปนอกชั้นของไหลและถูกดักด้วยลมวนไซโคลนดังกล่าวกลับเข้าไปในห้องเผาไหม้อีกครั้ง ดังรูปที่ 2-4



รูปที่ 2-4 เตาปฏิกรณ์แบบชั้นเชื้อเพลิงไหล

- (a) เตาปฏิกรณ์ชั้นเชื้อเพลิงไหลแบบฟองอากาศ (Bubbling Fluidized Bed gasifier)
- (b) เตาปฏิกรณ์ชั้นเชื้อเพลิงไหลแบบหมุนวน (Circulating Fluidized Bed gasifier)

2.9 การลำเลียงวัสดุด้วยสกรูขนถ่าย

2.9.1 หลักการทำงานและการใช้งาน

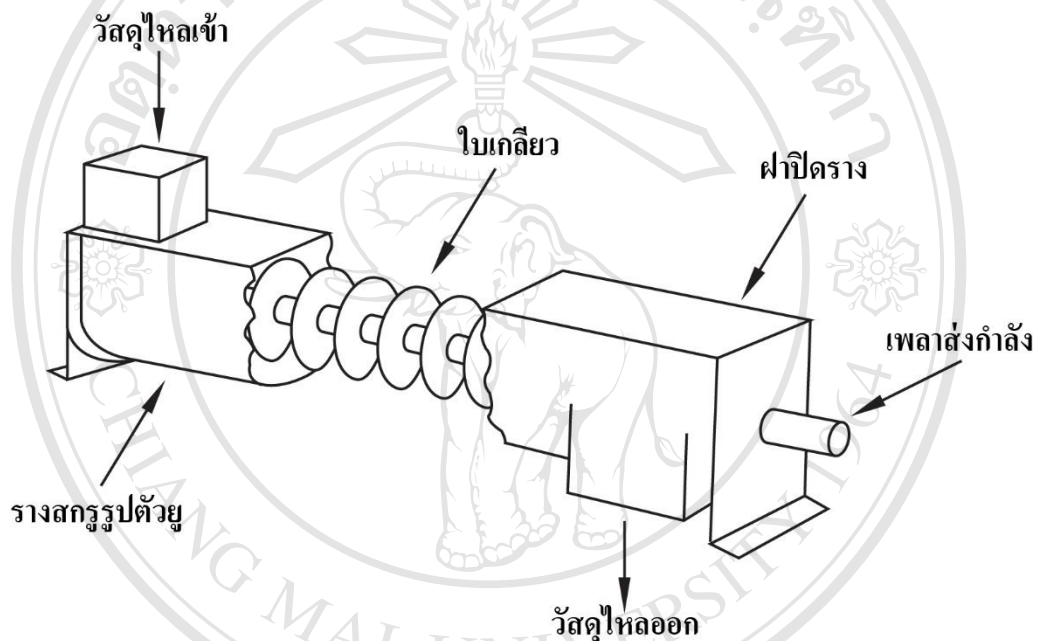
สกรูขนถ่ายวัสดุเป็นอุปกรณ์ในการขนถ่ายวัสดุที่เหมาะสมสำหรับขนถ่ายวัสดุที่มีคุณสมบัติในการไหลดี คุณสมบัติในการไหลของวัสดุนี้มีความสำคัญมากต่อการทำงานของสกรูขนถ่ายวัสดุ เนื่องจากใบเกลียวของสกรูที่ติดตั้งอยู่กับเพลลา หรือท่อตรงหมุนอยู่ภายในรางหรือท่อที่อยู่กับที่ผลักดันวัสดุไปตามส่วนล่างของรางดังรูปที่ 2-5 การหมุนของใบเกลียวจะทำให้เกิดการยกวัสดุขึ้นเหมือนลักษณะของลิ้ม การเคลื่อนที่ขึ้นของวัสดุจะทำให้วัสดุเกิดการเลื่อนไหลไปข้างหน้าได้ และการหมุนของใบเกลียวจะทำงานเสมือนลิ้มที่ทำหน้าที่ผลักดันและตัดเฉือนวัสดุจากการหมุนของใบเกลียวทำให้วัสดุเคลื่อนที่ไปข้างหน้าได้อย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 2-5 ลักษณะการเคลื่อนที่ของวัสดุบนใบเกลียว

ตัวร่างของสกรูขนถ่ายวัสดุโดยทั่วไป สามารถแบ่งเป็นสองชนิด คือ รางแบบกลม และ รางรูปตัวยู ซึ่งรางแบบกลมจะเป็นสกรูที่ใช้ความเร็วรอบสูง เป็นแบบที่เคลื่อนที่ได้ สามารถนำไปใช้ในสถานที่ต่างๆ ได้ และยังใช้สำหรับการขนถ่ายวัสดุตามแนวตั้ง ได้อีกด้วย ซึ่งการขนถ่ายวัสดุตามแนวตั้งนั้นจะต้องขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุด้วย โดยวัสดุจะต้องมีน้ำหนักเบาและมีคุณสมบัติในการไหลได้ดี ส่วนรางแบบตัวยูจะใช้ความเร็วต่ำกว่า และเป็นแบบที่ติดตั้งอยู่กับที่

สกรูขนถ่ายวัสดุเป็นอุปกรณ์ขนถ่ายวัสดุที่สามารถจ่ายวัสดุและรับวัสดุได้หลายตำแหน่ง โดยการใช้วาล์วเป็นตัวควบคุมทิศทางการไหลของวัสดุ และยังเป็นอุปกรณ์ขนถ่ายวัสดุที่สามารถควบคุมปริมาณการขนถ่ายวัสดุได้เป็นอย่างดีอีกด้วย



รูปที่ 2-6 ส่วนประกอบของสกรูขนถ่าย

สกรูขนถ่ายวัสดุเป็นอุปกรณ์ขนถ่ายวัสดุที่สามารถจ่ายวัสดุและรับวัสดุได้หลายตำแหน่ง โดยการใช้วาล์วเป็นตัวควบคุมทิศทางการไหลของวัสดุ และยังเป็นอุปกรณ์ขนถ่ายวัสดุที่สามารถควบคุมปริมาณการขนถ่ายวัสดุได้เป็นอย่างดีอีกด้วย

2.9.2 การพิจารณาออกแบบ

จากประสบการณ์พบว่าความสำเร็จในการออกแบบอุปกรณ์ขนถ่ายวัสดุ จะขึ้นอยู่กับความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับคุณสมบัติของวัสดุที่จะขนถ่าย และหลักการทำงานของอุปกรณ์ขนถ่ายวัสดุชนิดต่างๆ ข้อสำคัญในการออกแบบของอุปกรณ์ขนถ่ายวัสดุใดๆ ก็คือ ความรู้ความเข้าใจถึงทิศทางที่วัสดุจะไหลผ่านและผลกระทบอื่นๆ ต่อการไหลของวัสดุ

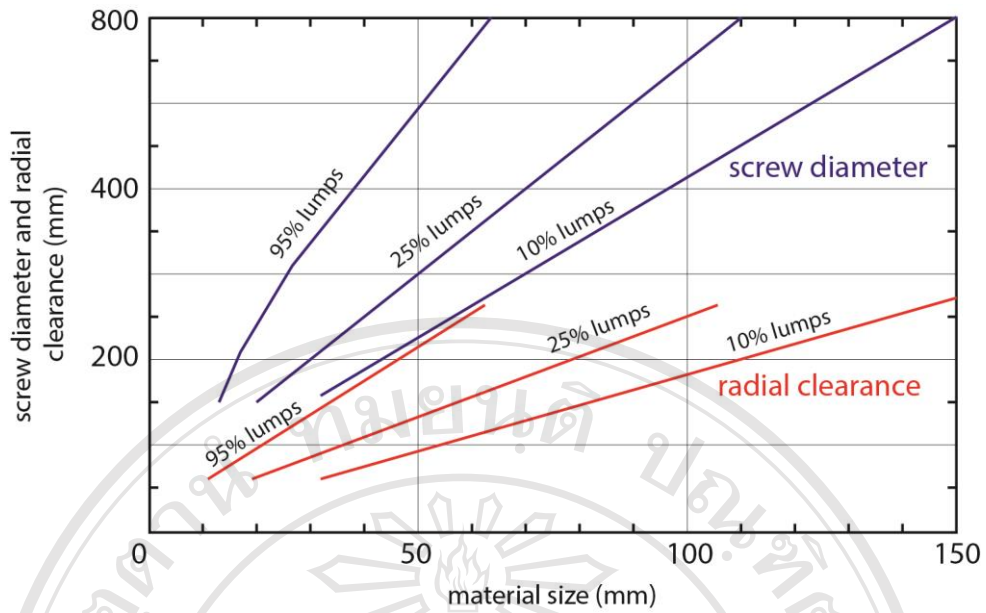
อัตราการขนถ่ายวัสดุปริมาณมวลส่วนมากมักจะมีหน่วยเป็นตันต่อชั่วโมง อัตราขนถ่ายวัสดุสูงสุดมักจะมากกว่าอัตราการขนถ่ายวัสดุเฉลี่ยต่อวันหรือต่อชั่วโมง เนื่องจากในบางเวลาอาจมีอัตราการขนถ่ายวัสดุมากหรือน้อยกว่าค่าเฉลี่ยได้ เช่น ในตอนเริ่มต้นและช่วงสุดท้ายของการขนถ่ายวัสดุอาจมีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากขณะที่วัสดุกำลังเคลื่อนที่ จะมีอากาศเข้าไปผสมกับวัสดุทำให้ปริมาตรของวัสดุเพิ่มขึ้น เป็นผลให้ความหนาแน่นของวัสดุลดลง ซึ่งอัตราการขนถ่ายวัสดุเชิงปริมาตรจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของวัสดุขณะขนถ่าย ดังนั้นการกำหนดอัตราการขนถ่ายวัสดุสูงสุดควรกำหนดจากความหนาแน่นของวัสดุในขณะขนถ่าย

ในระบบขนถ่ายวัสดุหลายๆ ระบบ การจ่ายวัสดุเข้าไปในอุปกรณ์ขนถ่ายวัสดุอาจมีค่าไม่คงที่ได้ เช่น ประตูลิ้นด้านล่างของถังเก็บวัสดุ วัสดุจะไหลจากด้านล่างของถังเก็บวัสดุอย่างสม่ำเสมอไม่ตลอดเวลา ทำให้เกิดความไม่แน่นอน จึงทำให้อัตราการขนถ่ายวัสดุมีค่าไม่คงที่

2.9.3 ข้อจำกัดเกี่ยวกับขนาดของวัสดุ

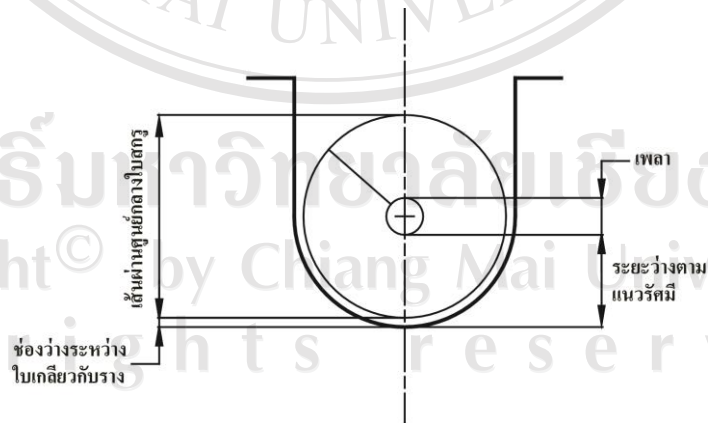
ขนาดของสกรูขนถ่ายวัสดุไม่เพียงแต่จะขึ้นอยู่กับอัตราการขนถ่ายวัสดุที่ต้องการเท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับขนาดของวัสดุที่จะขนถ่ายด้วย วัสดุบางชนิดมีก้อนแข็งไม่แตกตัวขณะผ่านสกรูขนถ่ายวัสดุ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีข้อจำกัดเรื่องขนาดของวัสดุที่จะขนถ่ายด้วย ส่วนในกรณีที่ก้อนวัสดุสามารถแตกตัวได้ง่ายขณะผ่านสกรูขนถ่ายวัสดุ ซึ่งไม่จำเป็นต้องมีข้อจำกัดเรื่องขนาดก้อนวัสดุที่จะขนถ่าย ขนาดของก้อนวัสดุสามารถแบ่งเป็นสามชนิดดังต่อไปนี้

- 1) วัสดุที่มีลักษณะเป็นก้อนปนอยู่กับวัสดุละเอียด โดยที่วัสดุก้อนใหญ่สุดถึงขนาดครึ่งหนึ่งของขนาดวัสดุก้อนใหญ่สุดไม่เกิน 10% ของวัสดุทั้งหมด และเป็นวัสดุก้อนเล็กกว่าครึ่งหนึ่งของวัสดุขนาดก้อนใหญ่สุดอีก 90% ของวัสดุทั้งหมด (เรียกว่า 10% lump)
- 2) วัสดุที่มีลักษณะเป็นก้อนปนอยู่กับวัสดุละเอียด โดยที่วัสดุก้อนใหญ่สุดถึงขนาดครึ่งหนึ่งของขนาดวัสดุก้อนใหญ่สุดไม่เกิน 25% ของวัสดุทั้งหมด และเป็นวัสดุก้อนเล็กกว่าครึ่งหนึ่งของวัสดุขนาดก้อนใหญ่สุดอีก 75% ของวัสดุทั้งหมด (เรียกว่า 25% lump)
- 3) วัสดุที่มีลักษณะเป็นก้อนปนอยู่กับวัสดุละเอียด โดยที่วัสดุก้อนใหญ่สุดถึงขนาดครึ่งหนึ่งของขนาดวัสดุก้อนใหญ่สุดไม่น้อยกว่า 95% ของวัสดุทั้งหมด และเป็นวัสดุก้อนเล็กกว่าครึ่งหนึ่งของวัสดุขนาดก้อนใหญ่สุดอีก 5% ของวัสดุทั้งหมด (เรียกว่า 95% lump)



รูปที่ 2-7 การเลือกขนาดของสกรูให้เหมาะสมกับขนาดของวัสดุ

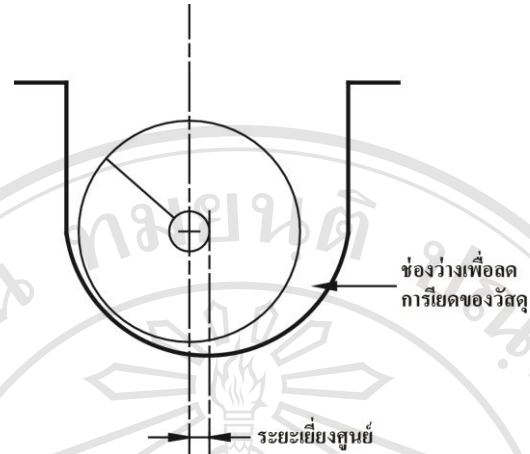
รูปที่ 2-7 เป็นขนาดวัสดุก้อนใหญ่สุดที่ทางสมาคมผู้ผลิตอุปกรณ์ลำเลียงของอเมริกา (CEMA) ที่มีความสัมพันธ์กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบสกรู และระยะว่างตามแนวรัศมี (radial clearance) ของสกรู ขนถ่ายวัสดุ เช่น วัสดุขนาดใหญ่สุดเท่ากับ 50 มิลลิเมตร ประเภท 25% lump จะต้องใช้สกรูขนถ่ายวัสดุขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบสกรู 300 มิลลิเมตร (ประมาณ 12 นิ้ว) และมีระยะว่างตามแนวรัศมี (radial clearance) 125 มิลลิเมตร (ประมาณ 5 นิ้ว) ดังนั้นในกรณีที่สกรูขนถ่ายวัสดุทำการขนถ่ายวัสดุที่มีลักษณะเป็นก้อน จะสามารถใช้รูปที่ 2-7 สำหรับกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบสกรูได้ โดยที่ช่องว่างระหว่างใบสกรูกับรางสกรูจะมีค่าประมาณ 12–15 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 2-8



รูปที่ 2-8 สกรูขนถ่ายแบบที่ใช้รางรูปตัวยู

ในขณะที่สกรูขนถ่ายวัสดุทำการขนถ่ายวัสดุที่มีลักษณะเป็นก้อนจากถังเก็บวัสดุ วัสดุที่เป็นก้อนจะถูกบีบคั้นให้ติดกับผนังราง ซึ่งอาจจะทำให้เกิดการเสียดสีกับผนังของรางสกรู ทำ

ให้เกิดการสีกหรือ และอาจทำให้วัสดุถูกเบียดจนติดอยู่กับผนังของรางสกรูด้วย ดังนั้นเพื่อลดการเบียดของวัสดุกับผนังของรางสกรู จึงต้องทำตัวสกรูให้มีระยะเยื้องศูนย์กลางกับรางสกรูขนาดประมาณ 38-50 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 2-9



รูปที่ 2-9 รางสกรูสำหรับการขนถ่ายวัสดุที่มีขนาดเป็นก้อน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved