



บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

สำหรับในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย โดยแบ่งออก 2 ส่วนหลักๆ ด้วยกัน คือ ส่วนแรกเป็นหลักเกณฑ์ที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์เพื่อประเมินเทคโนโลยีการผลิตเชื้อเพลิง H_2 จากชีวมวล (Biomass) ที่จะประกอบด้วย เทคโนโลยีในการผลิตเชื้อเพลิง H_2 จากชีวมวล การวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์และผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมในแต่ละเทคโนโลยีการผลิตเชื้อเพลิง H_2 จากชีวมวล และส่วนที่สอง เป็นทฤษฎีที่จะนำมาใช้ในการประเมินเทคโนโลยีการผลิตเชื้อเพลิง H_2 ที่เรียกว่า กระบวนการจัดลำดับเชิงวิเคราะห์ (Analysis Hierarchy Process :AHP) โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.1 หลักเกณฑ์ที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์เพื่อประเมินเทคโนโลยีการผลิตเชื้อเพลิง H_2 จากชีวมวล (Biomass)

2.1.1 เทคโนโลยีในการผลิตเชื้อเพลิง H_2 จากชีวมวล

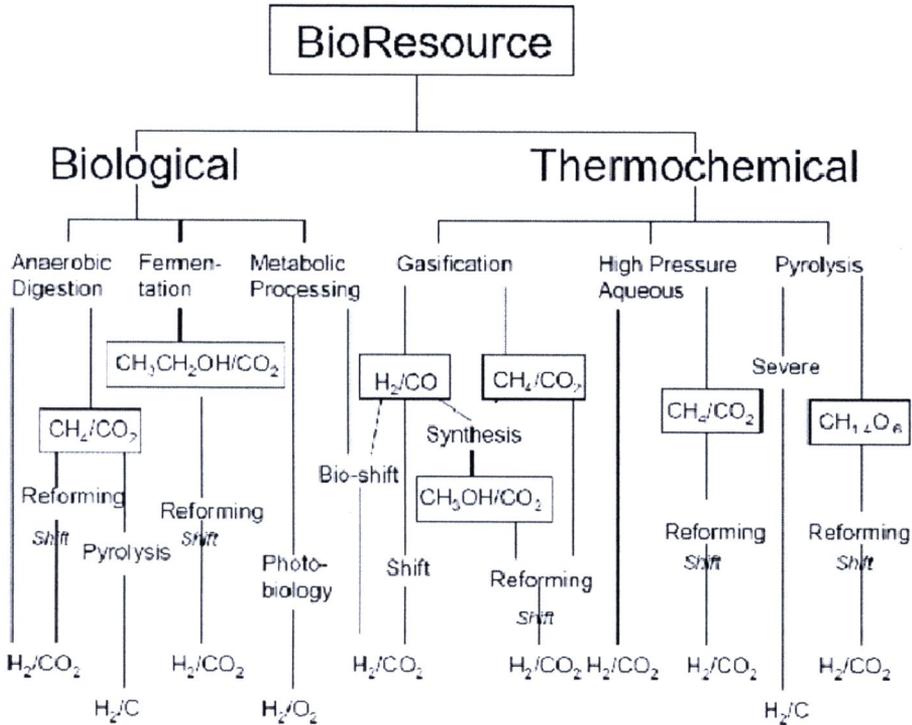
จากรายงาน Prospects for Hydrogen from Biomass ของ IEA Hydrogen Implementing Agreement ใน Annex 16 subtask B Final Report, June 2006 ได้มีกล่าวถึง กระบวนการในการเปลี่ยนชีวมวลให้เป็นเชื้อเพลิง H_2 โดยแบ่งเทคโนโลยีในการผลิตเชื้อเพลิง H_2 หลักได้ 2 เทคโนโลยี คือ

1. Thermochemical H_2 production process (เทคโนโลยีทางด้านเคมีความร้อน)
 - Pyrolysis
 - Gasification
 - High pressure (supercritical) aqueous conversion
2. Biological H_2 production process (เทคโนโลยีทางด้านชีววิทยา)
 - Anaerobic digestion



- Fermentation
- Photo-biological

โดยมีแผนภาพแสดงการแบ่งเทคโนโลยีในการผลิตเชื้อเพลิง H_2 ดังนี้



รูปภาพที่ 2.1 แผนภาพแสดงเทคโนโลยีการผลิตเชื้อเพลิง H_2 ด้วยชีวมวล จาก Milne et al., 2002

Boxes indicate storable intermediates.

โดยเมื่อพิจารณาจากการรวบรวมข้อมูลงานวิจัยเกี่ยวกับเทคโนโลยีการผลิตเชื้อเพลิง H_2 จากชีวมวลถึงการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตเชื้อเพลิง H_2 ในด้านของปริมาณผลผลิตไฮโดรเจนที่ได้ , การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตเชื้อเพลิง H_2 , จำนวนของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตเชื้อเพลิง H_2 จากชีวมวล และการพัฒนาเทคโนโลยีในการผลิตเชื้อเพลิง H_2 จากชีวมวลอย่างต่อเนื่อง พบว่าเทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงจะใช้วิธีทางด้านเคมีความร้อน คือ ใช้กระบวนการ Gasification และในบางส่วนของกระบวนการทางด้านชีววิทยาจะใช้วิธีการของ Anaerobic digestion, Fermentation และ Photo-biological

1. Thermo-chemical H₂ production process (เทคโนโลยีทางด้านเคมีความร้อน)

1.1 กระบวนการ Gasification

กระบวนการ gasification เป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนที่สำคัญและถูกใช้กันอย่างกว้างขวางสำหรับการเปลี่ยนแปลงชีวมวลให้เป็นพลังงาน กระบวนการ gasification ถือว่าเป็นพื้นฐานในการเปลี่ยนชีวมวลที่เป็นของแข็ง เช่น ไม้ กากตะกอน ขยะชุมชน เป็นต้น เพื่อผลิตแก๊สผสม กระบวนการ gasification เป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบอินทรีย์ของถ่านหินและเชื้อเพลิงอื่นให้เป็นแก๊ส โดยเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วนกับอากาศ ออกซิเจน ไอน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจนหรือแก๊สผสม ผลิตภัณฑ์จะประกอบด้วย ไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สมีเทน ไฮโดรคาร์บอน น้ำมันทาร์ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ แอมโมเนีย โดยกระบวนการจะเกิดที่ช่วงอุณหภูมิประมาณ 1,100 -1,200 °C

กระบวนการหลักของการ Gasification

กระบวนการหลักของการ gasification เกิดได้ 2 ขั้นตอนดังนี้

1. ขั้นตอนการไพโรลิซิส

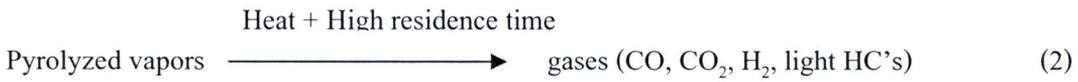
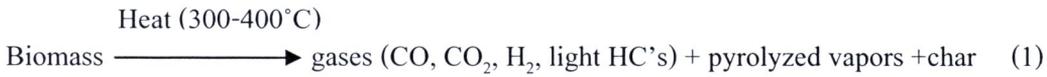
ในช่วงอุณหภูมิที่มากกว่า 400 °C ขั้นตอนนี้จะมีอัตราการเกิดที่เร็วมากและจะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ของกระบวนการไพโรลิซิสโดยที่อุณหภูมิที่เหมาะสมจะอยู่ระหว่าง 400-700 °C ในการเปลี่ยนแปลงความร้อนทางเคมีนั้น โมเลกุลที่มีขนาดใหญ่หรือสายโซ่ที่ยาวนั้นจะเกิดการแตกตัวของพันธะ C-C, C-S และ C-O พร้อมทั้งเกิดสารผลผลิตระหว่างปฏิกิริยา (Intermediate) จากนั้นสารผลผลิตเหล่านี้จะตั้งไฮโดรเจนจากสารอื่นและกลั่นตัวเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันได้ถ่านโค้ก ในขณะที่ถ่านโค้กนี้ไม่เกิดปฏิกิริยา ก็จะกลายเป็นถ่านชาร์ไปในที่สุด

2. ขั้นตอนการเกิด gasification

เป็นขั้นตอนที่เกิดในช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่า 700 °C ถ่านชาร์ และน้ำมันทาร์ เมื่อได้รับอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะผ่านกระบวนการแตกตัว (Cracking) และถูกทำให้เป็นแก๊ส (Gasified) ซึ่งทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สขึ้นคือ มีเทน (Methane) ไฮโดรเจน (Hydrogen) คาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide) และคาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide)

ปฏิกิริยาเคมีของกระบวนการ Gasification

กระบวนการ Gasification เป็นกระบวนการเคมีที่มีความซับซ้อนมาก โดย Bridgewater ได้อธิบายถึงปฏิกิริยาเคมีต่างๆ ที่เกิดขึ้นของชีวมวลในขั้นตอนของการ pyrolysis, oxidation และ reduction ดังแสดงในตาราง 2.1



ตารางที่ 2.1 ปฏิกิริยา Gasification

ปฏิกิริยา	ชื่อของปฏิกิริยา	Δh (Enthalpy) (kJ/kg mole)
$\text{C} + \text{O}_2 \longrightarrow \text{CO}_2$	Combustion	-408,632
$\text{C} + 1/2\text{O}_2 \rightleftharpoons \text{CO}$	Oxygasification	-123,092
$\text{C} + \text{CO}_2 \rightleftharpoons 2\text{CO}$	Carboxygasification	+162,448
$\text{CO} + 1/2\text{O}_2 \rightleftharpoons \text{CO}_2$	Oxygasification	-285,540
$\text{C} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO} + \text{H}_2$	Steam gasification	+118,905
$\text{C} + 2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + 2\text{H}_2$	Steam gasification	+75,362
$\text{C} + 2\text{H}_2 \rightleftharpoons \text{CH}_4$	Hydrogasification	-75,000
$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{H}_2$	Water gas shift	-43,543

หมายเหตุ

1. ปฏิกิริยาการทดลองที่สภาวะ 1,200 K (927 °C) ความดัน 1 บรรยากาศ คาร์บอนที่ใช้เป็นสารมาตรฐาน อยู่ในรูปแกรไฟต์
2. เครื่องหมายลบ หมายถึง ปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic reaction)
เครื่องหมายบวก หมายถึง ปฏิกิริยาดูดความร้อน (Endothermic reaction)

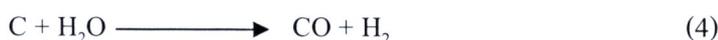
ปฏิกิริยาที่แสดงไว้ในตาราง 2.1 ประกอบด้วยปฏิกิริยาหลักๆ ที่เกิดภายใต้สภาวะที่ gasify มีการเรียกชื่อปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นตามลักษณะของแก๊สที่เข้าทำปฏิกิริยา เช่น

- Oxygasification เป็นการเผาไหม้คาร์บอนที่กำลังลุกแดงภายใต้ สภาวะที่มีออกซิเจนไม่เพียงพอ หรือจำกัดออกซิเจน เป็นปฏิกิริยาที่คาร์บอนทำปฏิกิริยากับออกซิเจน หรืออากาศ เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน โดยแก๊สที่เกิดขึ้นได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์
- Steam gasification เป็นปฏิกิริยาที่คาร์บอนทำปฏิกิริยากับไอน้ำเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน แก๊สที่ได้ส่วนใหญ่ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรเจน แก๊สเหล่านี้มีค่า ความร้อนสูงพอที่จะนำมาทำแก๊สเชื้อเพลิง
- Carboxygasification เป็นปฏิกิริยาที่คาร์บอนทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน
- Hydrogasification เป็นปฏิกิริยาที่คาร์บอนทำปฏิกิริยากับแก๊สไฮโดรเจนโดยตรง เพื่อผลิตมีเทน เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนและเกิดขี้เถ้าที่อุณหภูมิสูง ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือแก๊สมีเทน ซึ่งเป็นแก๊สที่มีค่าความร้อนสูงจึงเป็นแก๊สที่มีความต้องการให้เกิดในการ Gasify มากแต่ว่าปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นน้อยมาก นอกจากจะมีการป้อน ไฮโดรเจนซึ่งเป็นสารตั้งต้นสำคัญของปฏิกิริยาเข้าไปเพิ่มเติม
- Water gas shift reaction เป็นปฏิกิริยาย้อนกลับได้ของคาร์บอนมอนอกไซด์ กับไอน้ำดังตาราง 2.1 ได้แก๊สคาร์บอน ไดออกไซด์และไฮโดรเจนเป็นผลิตภัณฑ์

ระบบการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง

ในปัจจุบันกระบวนการ gasification มีการทดลองอยู่ 3 ระบบคือ

การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำ (Low heating value gas or low BTU gas) แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้มีค่าความร้อนประมาณ $3.3-5.6 \text{ MJ/m}^3$ (90-150 BTU/SCF) เกิดจากการเผาไหม้บางส่วนของถ่านกับอากาศ โดยมากมักจะมีไอน้ำอยู่ด้วย ปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดขึ้นดังนี้

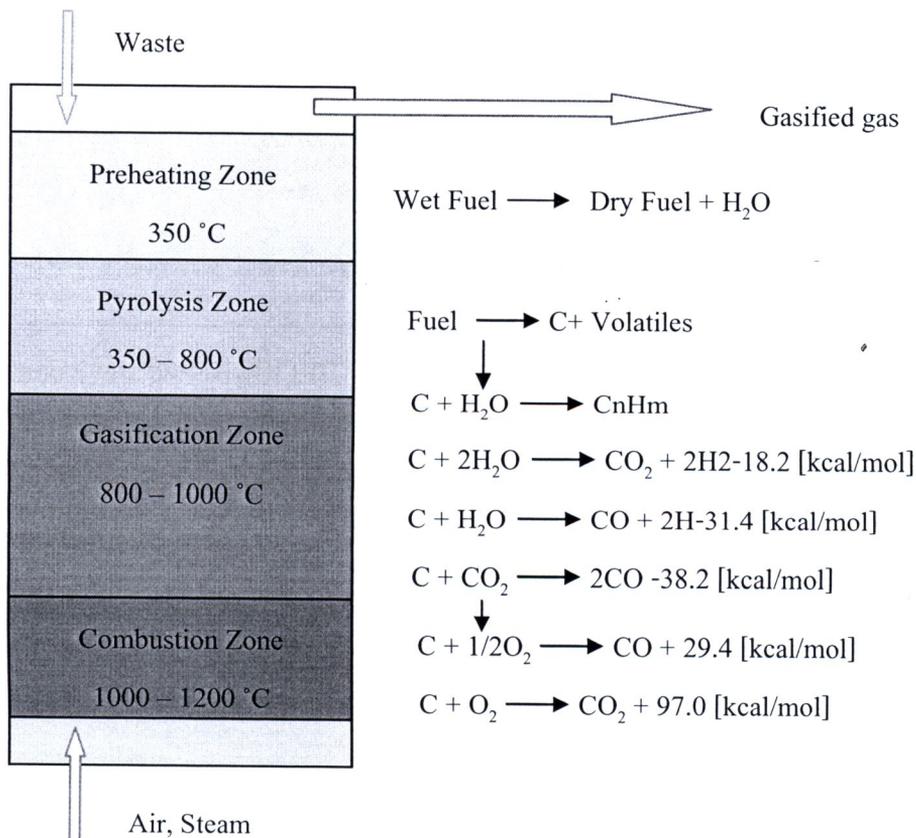


การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนปานกลาง (Medium heating value gas or medium BTU gas) แก๊สเชื้อเพลิงมีค่าความร้อนประมาณ $9.3-20.5 \text{ MJ/m}^3$ (250-550 BTU/SCF) กระบวนการนี้ใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ที่ได้จากการแยกออกจากอากาศ เพื่อใช้ในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วน (Partial oxidation) การไม่มีแก๊สไฮโดรเจนจะทำให้ค่าความร้อนสูงขึ้น การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนสูง (High heating value gas or high BTU gas) ค่า ความร้อนของแก๊ส

เชื้อเพลิงที่ได้เทียบกับแก๊สสังเคราะห์ (Synthesis gas) ส่วนประกอบของ แก๊สมักจะเป็นมีเทนเกือบบริสุทธิ์ ซึ่งจากแก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนปานกลางสามารถเปลี่ยนให้เป็นแก๊สสังเคราะห์ได้ โดยกระบวนการ Methanation ที่อุณหภูมิต่ำเกิดปฏิกิริยาของคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน เป็นแก๊สมีเทนและน้ำ

กลไกการเกิด Gasification (Gasification reaction)

ลำดับการเปลี่ยนแปลงอาจแสดงได้โดยตัวอย่างของ Moving bed gasifier ดังแสดงใน รูป 2.2



รูปที่ 2.2 แสดง Moving Bed Gasifier

หลักการใหญ่ๆ ของเครื่องปฏิกรณ์คือให้แก๊สตัวพาเคลื่อนที่ผ่านวัสดุดิบ ซึ่งทำหน้าที่เป็นเบดอยู่กับที่เมื่อให้ความร้อนกับส่วนที่เป็นเบด วัสดุจะเกิดปฏิกิริยาได้เป็นของผสมระหว่างแก๊สและไอระเหยซึ่งถูกแก๊สตัวพานำออกจากระบบโดยผ่านส่วนต่างๆ ดังนี้

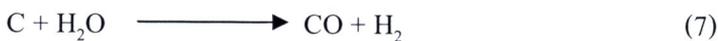
1. Drying ในส่วนนี้สารระเหยและน้ำจะถูกกำจัดออกจากเชื้อเพลิงหรือชีวมวลโดยการระเหย โดยความร้อนที่ใช้ในการระเหยสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 160-350 °C

2. Pyrolysis (Devolatilization) เป็นการคังสารระเหยที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงที่อุณหภูมิสูงขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 350-800 °C ในช่วงอุณหภูมิ 350-500 °C จะเกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นทาร์ ถ่านชาร์ และคาร์บอนไดออกไซด์ และระหว่างช่วงอุณหภูมิ 500-700 °C จะเกิดแก๊สที่เป็นไฮโดรเจนเกิดขึ้น ในส่วนนี้น้ำหนักของเชื้อเพลิงจะลดลงประมาณ 70%

3. Reaction zone (Gasification) จะเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 800-1,000 °C

ในส่วนนี้ถ่านชาร์จะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำ เพื่อผลิตแก๊สมอนอกไซด์และ

ไฮโดรเจนผ่านปฏิกิริยาต่าง ๆ ดังนี้



4. Combustion zone กระบวนการเผาไหม้จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 1,450 °C ในส่วนนี้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารระเหยและถ่านชาร์ที่หลงเหลืออยู่บางส่วนจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนหรือไอน้ำ เพื่อเกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สคือ คาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์ปฏิกิริยาหลักของกระบวนการเผาไหม้



ชนิดของเตาเผาเชื้อเพลิง Gasification

Warnecke ได้ทำการจำแนกชนิดของเตาเผาเชื้อเพลิง gasification ออกด้วยกัน 4 ประเภท ตามการเคลื่อนที่ของของแข็งภายในตัวเผาเชื้อเพลิง gasification

1. Quasi non-moving or self-moving feedstock

2. Mechanically-moved feedstock

a. Downdraft gasifier

b. Updraft gasifier

c. Cross-draft gasifier

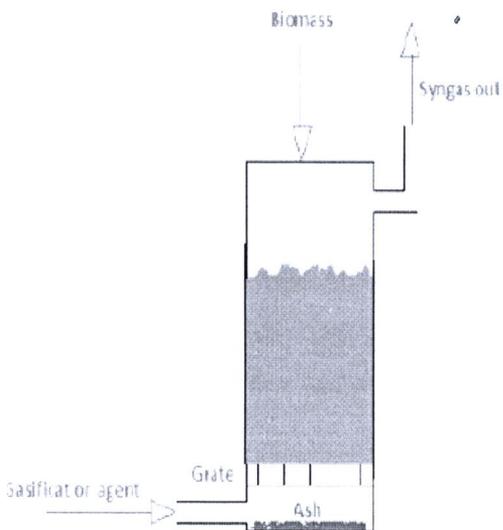
3. Fluidically-moved feedstock

- a. Bubbling-bed (BB) gasifier
- b. Circulating fluidized bed (CFB) gasifier
- c. Entrained-bed gasifier

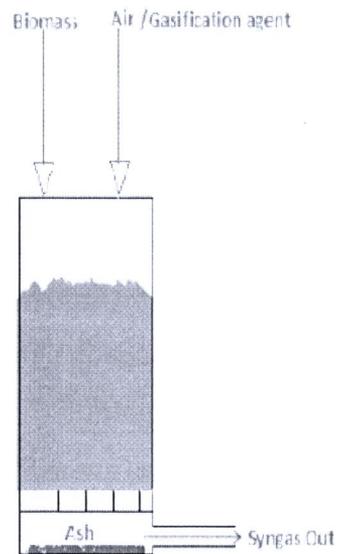
4. Special reactors

- a. Spouted bed gasifier
- b. Cyclone gasifier

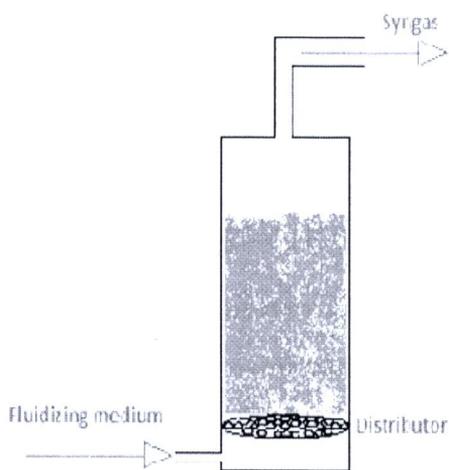
จากการแบ่งประเภทของเตาเผาเชื้อเพลิง gasifier ทั้ง 4 ประเภท พบว่า ตัว gasifier แบบ downdraft, updraft, BB และ CFB เป็นเตาเผาที่มีการศึกษากันอย่างมากที่มีการขายในทางการค้า โดยเป็นเตาเผาแบบ downdraft gasifier 75% , Fluidized bed 20%, updraft 2.5% และแบบอื่นๆ อีก 2.5% รูปภาพ 2.3- 2.6 แสดงชนิดของเตาเผาเชื้อเพลิง 4 แบบที่มีการขายในทางการค้า



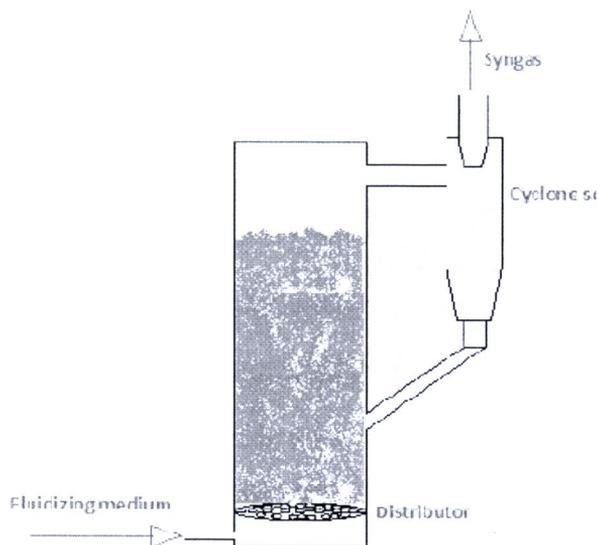
รูปที่ 2.3 Updraft gasifier



รูปที่ 2.4 Downdraft gasifier



รูปที่ 2.5 Bubbling bed fluidized gasifier



รูปที่ 2.6 Circulating fluidized bed gasifier

1. Updraft gasifier (Countercurrent moving bed reactor) ในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงนี้ป้อนอากาศ หรือไอน้ำเข้าทางด้านล่างที่มีการสันดาป (Hearth zone) อุณหภูมิอยู่ในช่วง 900 °C หรือมากกว่าตามความต้องการ ในกรณีที่ป้อนอุตสาหกรรมขนาดใหญ่การเติมไอน้ำเข้าไปเป็นการลดอุณหภูมิในการสันดาปหรืออาจทำการหล่อเย็นในบริเวณนี้ด้วยน้ำตลอดเวลาเป็นการยืดอายุการใช้งานของเครื่องได้ แก๊สที่ได้จากบริเวณการเผาไหม้ (Combustion zone) จะผ่านไปยัง reduction zone เข้าไปยัง distillation zone หรือ drying zone ตามลำดับกระบวนการชนิดนี้ได้มีการพัฒนาเป็นเตาผลิตแก๊สแบบผสม (Hybrid up-draught reactor) เป็นเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบ 2 ขั้นตอน ผลิตออกมาครั้งแรกโดยบริษัท US gas Integrate เมืองมิลานประเทศอิตาลี (สมาคมวิจัยและพัฒนาพลังงานแห่งสหรัฐอเมริกา 1976) ได้ใช้งานมากกว่า 20 ปี แก๊สที่เกิดขึ้นออกมา 2 ระดับคือ ระดับแรกได้มาจาก gasification zone ในช่วง reduction zone ซึ่งให้แก๊สที่สะอาดใส (Clear gas) ออกมา ระดับต่อมาได้จาก drying zone ได้ Top gas ถูกควบคุมโดยการปรับสัดส่วนของ clear gas ซึ่งไหลออกจากเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง Top gas ไหลผ่านคอนเดนเซอร์เพื่อดึงหยดน้ำมันทาร์ออก ในขณะที่ clear gas ไหลผ่านไซโคลนเพื่อกำจัดฝุ่นแก๊สทั้งสองระดับมารวมกัน ความร้อนจาก clear gas ทำให้ละอองไขมัน (Oil mist) ใน Top gas ระเหยออกไป อุณหภูมิสุดท้ายประมาณ 350 °C กระบวนการนี้สามารถผลิตโปรดิวซ์แก๊ส โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการทำให้อุณหภูมิลดลง แก๊สที่ยังร้อนมีค่าความร้อนประมาณ 7,500 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร สำหรับแก๊สที่ทำความสะอาดและเย็นลงแล้วมีค่าความร้อนลดลงเหลือประมาณ 6,300 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร

2. Down-draft gasifier (Co-current moving bed reactor) ระบบนี้ได้รับการพัฒนาโดยมีจุดมุ่งหมายที่เปลี่ยนน้ำมันทาร์ (Tar) ที่เกิดขึ้นในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงไปเป็นแก๊สที่มีความสำคัญมาก กรณีส่งแก๊สเชื้อเพลิงไปตามท่อระยะทางไกล ๆ จากเตา และยังสามารถประยุกต์ใช้กรณีเป็นเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ได้ด้วย เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงมี distillation zone และ drying zone อยู่เหนือ hearth zone และมี reduction zone อยู่ด้านล่าง บริเวณที่สำคัญที่สุดคือ combustion zone ระบบ downdraft นี้มีการใช้อย่างกว้างขวางสำหรับ gasification ถ่านไม้ฟืนและลิกไนต์ ตัวอย่างคือ เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงอิมเบอร์ต (Imbert) และรอต (Roth) ซึ่งได้พัฒนาขึ้นในเยอรมนีและสวีเดนเซอร์แลนด์ ตามลำดับ เตาดังกล่าวทำงานมีประสิทธิภาพสูง มีรูปร่างเป็นรูปกรวยอยู่ภายใน hearth zone ข้างล่างทางเข้าอากาศ ส่วนคอคดเข้าจะเป็นส่วนที่ช่วยเพิ่มความเร็วของอากาศ และทำให้อุณหภูมิของการทำงานสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นจึงเป็นการง่ายที่จะเปลี่ยนน้ำมันทาร์เป็นแก๊ส ระบบ downdraft ได้พัฒนาสำหรับการใช้กับไม้ และเศษวัสดุ แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้มีไฮโดรเจน สูงกว่าใช้ถ่านไม้ หรือถ่านหิน

ประโยชน์ที่สำคัญของระบบนี้ก็คือสามารถใช้วัสดุที่ไม่ได้ผ่านการคาร์บอนไนซ์ (Uncarbonised materials) และสามารถลดน้ำมันทาร์ในผลิตภัณฑ์ได้ แต่เป็นระบบที่มีเวลาในการสัมผัส (Contact time) ของอากาศและเชื้อเพลิงน้อยเป็นระบบที่ให้เชื้อเพลิงแก๊สสม่ำเสมอดีกว่า ระบบ updraft gasifier เมื่อนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ อย่างไรก็ตามระบบนี้ต้องการความสม่ำเสมอของขนาดวัตถุดิบมากกว่าสำหรับการทำงาน และวัตถุดิบที่มีขนาดใหญ่กว่า 15 cm ไม่เหมาะสมในการใช้เป็นวัตถุดิบของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่อิมเบอร์ตและรอตได้ออกแบบไว้ เตาเชื้อเพลิงที่มีขนาดเล็กกว่า 1.5 cm และมากกว่า 5 cm เครื่องเหล่านี้จะทำงานที่อุณหภูมิต่ำกว่าเครื่องในระบบ cross-draft และยังไม่เหมาะสมกับการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงปริมาณต่ำ

3. Cross-draft gasifier ในระบบนี้การไหลของเชื้อเพลิงและอากาศที่ได้ขวางกับตัวเตา แต่ก็ไม่จำเป็นต้องขนานในแนวอนเสมอ เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบนี้จะทำงานที่อุณหภูมิสูงมาก ให้มี combustion zone และ reduction zone จำกัด โดยใช้ท่ออากาศตรงทางเข้าที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก อุณหภูมิจะสูงถึง 2,000 °C จึงต้องมีน้ำหล่อเย็นอยู่ข้างนอกเนื่องจากเวลาในการทำปฏิกิริยาสันต้องให้เชื้อเพลิงที่น้ำมันทาร์ต่ำและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6-1 cm เป็นขนาดที่ดี เชื้อเพลิงใน hopper จะประพฤติเป็นเกราะป้องกันความร้อนจากการแผ่รังสีความร้อน และเมื่อทำงานโดยใช้ถ่านไม้เป็นเชื้อเพลิง เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงก็ไม่จำเป็นต้องก่อปูนทนไฟ (Refractory liner) พื้นที่ส่วนใหญ่สัมผัสกับอุณหภูมิสูง ที่ซึ่งเป็นปลายท่อมีความเร็วของอากาศสูงถึง 80 m/s เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงนี้มีลักษณะพิเศษคือ มีรูปทรงง่าย ๆ และเริ่มเดินเครื่องได้เร็วใช้ได้ดีด้วยเครื่องยนต์ขนาดเล็กตอบสนองต่อความต้องการแก๊สที่ไม่คงที่

เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงทั้ง 3 แบบที่กล่าวมาข้างต้น ป้อนวัตถุดิบเข้าทางด้านบนของเตาครั้งแรกวัตถุดิบถูกทำให้แห้ง แล้วถูกกลั่นสลายด้วยความร้อน เนื่องมาจากความร้อนบริเวณที่ร้อนกว่าข้างล่างเตา เรียงลำดับคือ combustion zone และ reduction zone องค์ประกอบที่เป็นน้ำมันทาร์และถ่านแดงถูกออกซิไดซ์มาบางส่วนให้ความร้อนมา และทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นไปอีก 500 °C ปริมาณคาร์บอนที่เหลือทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำได้คาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรเจน ในช่วงสุดท้าย ถ่านล่องหล่นผ่านตะแกรงลงไปสู่ส่วนล่าง อากาศร้อนถูกแยกออกจากในส่วนตรงกันข้ามกับอากาศเข้า อาจเป็นส่วนบน หรือส่วนล่างขึ้นกับการออกแบบของเตาองค์ประกอบของแก๊สที่แน่นอนที่ได้จากเตาผลิตเชื้อเพลิงที่ใช้อากาศขึ้นกับชนิดของชีวมวลที่ใช้เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่สร้างขึ้นมาใช้งานในปัจจุบันถึงแม้ว่าจะสามารถผลิตแก๊สเชื้อเพลิงออกมาใช้งานได้แต่ถ้าวิเคราะห์ดูให้ลึกซึ้งลงไปแล้วจะพบว่ายังขาดหลักการงานที่เหมาะสมทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สต่ำ มีผลกระทบต่อการใช้สายเชื้อเพลิงไม่คุ้มค่าเท่าที่ควร การที่ร้อยละของปริมาณแก๊สที่ติดไฟได้ต่ำมีผลกระทบต่อการทำงานของเครื่องยนต์ เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่ดีควรมีประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่มีปริมาณร้อยละของแก๊สติดไฟได้สูงปริมาณทาร์จะต้องถูกเผาไหม้ภายในเตาหรือถูกกำจัดออกมามากที่สุด สารเชื้อเพลิงแข็ง คือถ่านที่ออกมาพร้อมกับและปริมาณถ่านที่ออกมาควรมีน้อยที่สุด การที่จะทำเช่นนี้ได้จะต้องมีการศึกษาวิจัยหาข้อมูลต่างๆ เพื่อที่จะนำไปแก้ไขดัดแปลงเครื่องปฏิกรณ์ที่มีอยู่ หรือจะสร้างขึ้นใหม่ให้มีประสิทธิภาพในการทำงานสูงสุด

4. Fluidized bed gasifier เครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไคซ์เบด เครื่องผลิตแก๊สชนิดนี้ จะมีอนุภาคของทราย บรรจุอยู่ในเบดภายใต้สภาวะที่ทำให้เกิดการปั่นป่วน โดยไอน้ำและแก๊สเฉื่อยผลิตแก๊สที่ได้อุณหภูมิสูงประมาณ 800-1,000 °C และได้ปริมาณทาร์และถ่านปริมาณเล็กน้อย เพราะเชื้อเพลิงที่ใช้ในกระบวนการนี้จะได้รับความร้อนที่ค่อนข้างทั่วถึงมากกว่าแบบฟิสิกส์เบดแต่ไม่สูงเท่ากับ entrained flow ชีวมวลที่เหมาะสมกับเครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้ต้องมีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.1-1 cm ระบบนี้สามารถทำงานได้ทั้งในสภาวะแห้งหรือถ่านเหลวได้การฟลูอิดไคซ์เบดแห้ง สามารถทำงานได้ดีที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดอ่อนตัวของถ่าน อนุภาคของเศษถ่านและถ่านจะถูกดึงออกทางด้านล่างโดยกรรมวิธีทางกล ในขณะที่บางส่วนถูกพัดติดมากับแก๊สเชื้อเพลิงทางด้านบนทำให้ต้องมีการติดตั้งไซโคลน (Cyclone) เพื่อดักเก็บถ่านไว้ การผลิตแก๊สถ่านมีถ่านอยู่และอุณหภูมิสูงกว่าจุดอ่อนตัวของถ่าน ทำให้ถ่านมีการรวมตัวกันมีขนาดใหญ่ขึ้นและจะตกลงมาส่วนล่างของเบดและถูกดึงออก

5. Entrained flow gasification เป็นการมีส่วนผสมของวัตถุดิบกับแก๊ส (อากาศ/ไอน้ำหรือออกซิเจน/ไอน้ำ) เพื่อนำเอาผงละเอียดเล็กๆ ของวัตถุดิบเข้าสู่เตาผลิตแก๊ส โดยที่ขนาดของวัตถุดิบและความเร็วของแก๊สที่เข้าจะต้องพอดีกันเพื่อรักษาสภาพของการแขวนลอยไว้ การทดลองเรื่องนี้

ได้รับการพัฒนาจากกระบวนการเผาไหม้ของ pulverized-coal ถ้ำ และ ถ่าน (Char) จะออกเตาพร้อมกับแก๊สผลิตภัณฑ์ ซึ่งต้องมีการแยกออกอีกครั้งหนึ่ง อัตราการเกิดปฏิกิริยาของถ่านที่อุณหภูมิสูงมากเมื่อเทียบกับเบดนิ่ง และเมื่ออุณหภูมิสูงเกินสภาวะเกิด slag gasification จะสำเร็จด้วยการผ่านเข้าเพียงครั้งเดียว ซึ่งในระบบแห่งนี้จะมีการนำถ่านกลับเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในปริมาณสูง

1.2 กระบวนการ Pyrolysis

Pyrolysis เป็นกระบวนการในการเปลี่ยนชีวมวลด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 650-800 K ที่ความดัน 0.1-0.5 Mpa ในสภาวะที่มีขาดอากาศ เพื่อเปลี่ยนชีวมวลให้เป็นก๊าซ (gas), ของแข็ง (char) และของเหลว (tar) โดยการ pyrolysis อาจแบ่งได้ออกเป็น 2 ประเภท คือ slow pyrolysis และ fast pyrolysis ซึ่ง slow pyrolysis มักจะไม่ค่อยนำมาพิจารณาในการผลิต H₂ แต่จะมีการพิจารณาถึง fast pyrolysis ทั้งนี้เนื่องจากเป็นกระบวนการที่มีอุณหภูมิสูง เมื่อมีการป้อนชีวมวลแล้วมีการให้ความร้อนอย่างรวดเร็ว ก็จะได้ไอรระเหยแล้วต่อมาก็จะมีการควบคุมน้ำได้ออกมาเป็นของเหลวต่อไป ผลผลิตที่ได้จากกระบวนการ fast pyrolysis แสดงได้ดังนี้

Gas → H₂, CH₄, CO, CO₂ และสารอื่นๆ ขึ้นอยู่กับอินทรีย์ที่ประกอบอยู่ในชีวมวล

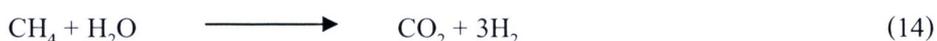
Liquid → tar และน้ำมัน ที่อยู่ได้ในสภาวะของอุณหภูมิห้อง เช่น acetone, acetic acid เป็นต้น

Solid → ส่วนใหญ่เป็นพวก char และคาร์บอนบริสุทธิ์

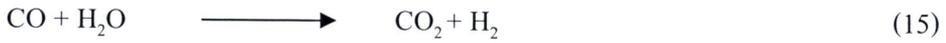
แม้ว่าส่วนใหญ่ในกระบวนการ pyrolysis จะถูกออกแบบเพื่อให้เกิด bio-fuel แต่การนำมาผลิต H₂ โดยตรงก็สามารถทำได้ ถ้าใช้อุณหภูมิที่สูงและมีสารระเหยที่ได้เพียงพอ ดังสมการ



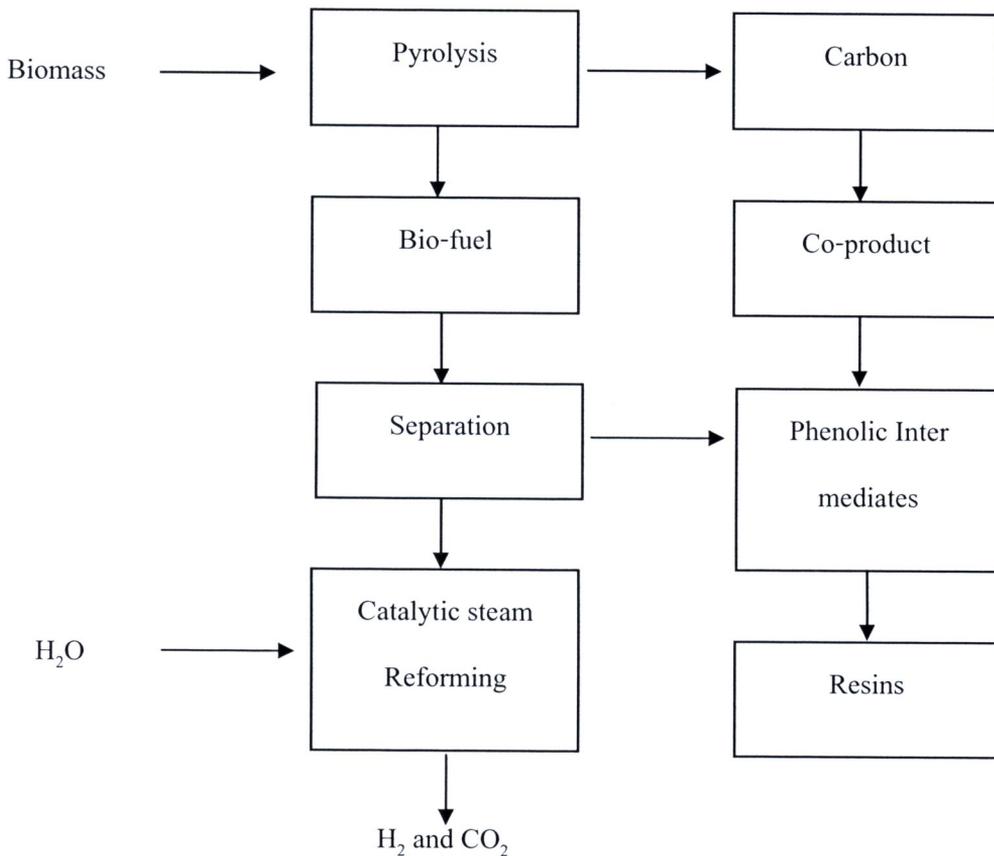
Methan และ other hydrocarbon vapors สามารถเข้าสู่ steam reforming เพื่อการผลิต H₂ ได้ ดังสมการ



และยังผลิต H₂ โดยปฏิกิริยา water gas shift ได้ดังสมการ



นอกจาก gas ที่ได้ แล้วของเหลวพวก oil ที่ได้ยังสามารถนำมาผลิต H₂ ได้อีกจากการ pyrolysis oil ให้มีการแยกเอาน้ำออกมา รูปที่ 2.7 แสดงการ pyrolysis ชีวมวลเพื่อทำการผลิต H₂



รูปที่ 2.7 แสดงการ pyrolysis ชีวมวลเพื่อทำการผลิตก๊าซ Hydrogen

1.3 กระบวนการ High Pressure Aqueous

เมื่อผสมชีวมวลด้วยน้ำจะไค้ของผสม และเมื่อนำไปผ่านกระบวนการที่ความดันสูง ซึ่งอาจจะมีความร้อนสูงหรือต่ำก็ได้ จะสามารถผลิตน้ำมันหรือเชื้อเพลิง รวมทั้ง H₂ หลังจากทิ้งของผสมผ่านกระบวนการที่อุณหภูมิสูงแล้วให้ความดันแก่ของผสมด้วยการลดความดันลงทันทีทันใด จะผลิตได้

น้ำมันและก๊าซที่คุณภาพสูง สำหรับเทคโนโลยีที่ใช้อุณหภูมิต่ำแต่ให้ความดันสูง จะพบว่า ของผสมจะต้องมีตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตเชื้อเพลิง รวมทั้ง H_2 ด้วย

ตัวเร่งปฏิกิริยาโดยตรง: กลูโคส เป็นน้ำตาลที่ได้รับมาจากชีวมวล เช่น น้ำตาลจากหัวบีท หัวข้าวโพด หรือเศษไม้ นำไปใช้ในการผลิต H_2 ได้ เมื่อน้ำตาลที่เติมไปด้วยน้ำเสีย นำไปให้ความดันและใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นนิเกิลและดีบุก ที่ $440^\circ F$ จะสามารถผลิต H_2 ได้ แม้ว่าน้ำเสียจะมีการปล่อยทิ้งออกมา เพราะไม่มีกระบวนการระเหย แต่พลังงานที่ได้จะน้อยกว่าเมื่อเทียบกับกระบวนการผลิต H_2 แบบอื่นๆ

2. Biological H_2 production process (เทคโนโลยีทางด้านชีววิทยา)

2.1 กระบวนการ Anaerobic digestion process

ขั้นตอนกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic digestion) ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

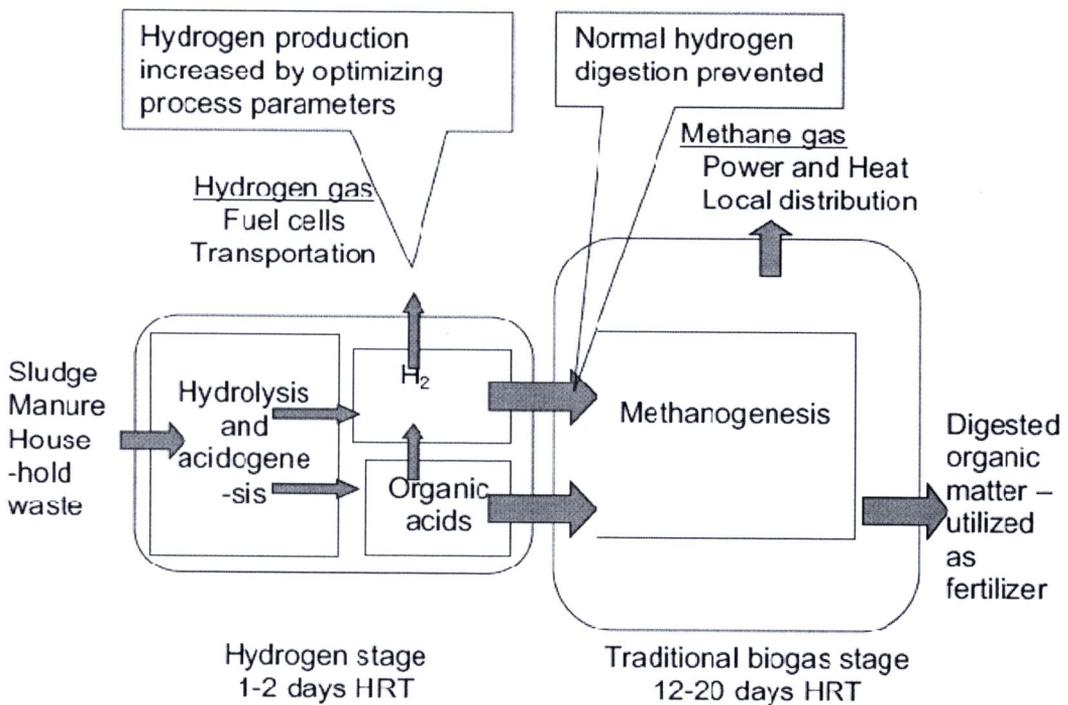
ขั้นตอนที่ 1 Hydrolysis ขั้นตอนนี้สารอินทรีย์ยังอยู่ในรูปโมเลกุลใหญ่ ไม่สามารถจะย่อยสลายได้ทันที จำเป็นที่จะต้องมีการทำให้เกิดการแตกตัวเป็นโมเลกุลเล็กเสียก่อน โดยมีแบคทีเรียกลุ่มแรกปล่อยเอนไซม์มาช่วยเร่งการแตกตัวของโมเลกุลแบคทีเรียกลุ่มนี้จะได้รับสารอาหารบางชนิดจากสารอินทรีย์ผ่านการดูดซึมเข้าสู่เซลล์ได้โดยตรง

ขั้นตอนที่ 2 Acidogenesis แบคทีเรียอีกกลุ่มจะทำการย่อยสลายโมเลกุลที่แตกตัวแล้ว จากขั้นตอนแรกให้เป็นกรดอินทรีย์ (Organic Acid) ซึ่งได้แก่ Acetic Acid, น้ำ (H_2O) และ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นต้น แบคทีเรียที่กลุ่มนี้เรียกว่า Acid Forming Bacteria เป็นแบคทีเรียที่อยู่ได้ทั้งในสภาพที่มีออกซิเจนหรือไม่มีออกซิเจน

ขั้นตอนที่ 3 Methanogenesis ในขั้นตอนนี้แบคทีเรียอีกกลุ่มหนึ่งซึ่งเรียกว่า Methanogens หรือ Methane Forming Bacteria จะทำการเปลี่ยน Acetic Acid และ ไฮโดรเจน (H) เป็นก๊าซมีเทน (CH_4) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) แบคทีเรียพวกนี้เป็นชนิดที่ต้องอยู่ในสภาพที่ไร้ออกซิเจนจริงๆ (Obligate Anaerobic Bacteria) ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนนี้จะขึ้นอยู่กับปริมาณของ Acetic Acid จากปฏิกิริยาก่อนหน้านี้

ในรูปที่แสดง 2.8 เป็นกระบวนการ hydrolysis และ acidogenesis ในการผลิตก๊าซไฮโดรเจน และกรดอินทรีย์ ซึ่งสามารถใช้การผลิตมีเทน ในกระบวนการ methanogenesis การผลิต H_2 มีขั้นตอนในการผลิต 1-2 วัน (hydraulic retention time : HRT) แต่การผลิตมีเทนจะให้ HRT ที่

นานกว่าถึง 12-20 วัน โดยในการผลิต H₂ ในช่วง 1-2 วัน โดยถ้าไม่มีการนำเอา H₂ ไปใช้ก็จะทำให้กลายเป็นการผลิตก๊าซมีเทนต่อไป และจะถูกเรียกว่า เป็นขั้นตอนแรกของการหมัก (One-stage fermentation process) และหลังจาก 1-2 วันในขั้นตอนของ One-stage fermentation process ก็จะเข้าสู่ Two-stage fermentation process



รูปที่ 2.8 แสดงขั้นตอนของ Two-stage process ในการผลิต H₂ และ CH₄

ในกระบวนการ Anaerobic fermentation, วิธีการสังเคราะห์ H₂ จะขึ้นอยู่กับปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อม เช่น pH, อุณหภูมิ และ HRT (Chang et al., 2002) ซึ่งจากการวิจัยทางด้าน bio-hydrogen พบว่าค่า pH เป็นปัจจัยสำคัญที่ผลต่อการผลิต H₂ ใน end-product (Craven 1988) ในปฏิกิริยาของ Dark hydrogen fermentation ที่เกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ mesophilic (25-40 °C) ถึง hyperthermophilic (>80 °C)

HRT เป็นปัจจัยอีกตัวหนึ่งที่มีความสำคัญต่อกระบวนการ Dark fermentation ในระบบที่มีการรบกวนอย่างต่อเนื่อง Continuously stirred tank reactor (CSTR) จะมี HRT ที่สั้น เนื่องจากมีการยับยั้งการเกิด methanogen ให้ช้าลงและเลือกให้มีการผลิตกรดจากแบคทีเรีย (Chen et al., 2001)

ในขณะที่การมี HRT ที่น้อยเกินไป ก็จะทำให้เกิดกระบวนการ hydrolysis ของของเสียอินทรีย์ได้ไม่ดีด้วยเช่นกัน

ในส่วนของสับสเตรทที่ใช้ในการผลิต H ส่วนใหญ่จะเป็นของเสียที่ได้จากบ้าน หรือเป็นสารจำพวก glucose ส่วนของเสียพวกที่ได้จากธรรมชาติจะใช้ในการผลิตสำหรับมีเทน ความยุ่งยากอย่างหนึ่งของของเสียคือ ของเสียที่มี lignocellulosic เป็นส่วนประกอบ เพราะ lignin เป็น non-biodegradable และแข็งมากที่จะไปยับยั้งการใช้ประโยชน์ของ cellulose และ hemicelluloses ใน anaerobic condition

2.2 กระบวนการ Fermentation

2.2.1 Dark Fermentation

ในขณะที่ bio-photolysis ต้องการแสงเพื่อใช้ในการเกิดปฏิกิริยา การผลิต H ยังสามารถผลิตได้ในที่ที่ไม่ใช้แสงโดยการใช้ anaerobic bacteria และสารสับสเตรทประเภทคาร์โบไฮเดรต ข้อดีของการผลิตที่ไม่ใช้แสง คือ cost ของกระบวนการจะน้อยกว่ากระบวนการที่มีการใช้แสง การหมักโดยไม่ใช้แสงจะได้ mixed biogas ที่ประกอบด้วยก๊าซ H และ CO₂ เป็นส่วนใหญ่ ตัวอย่างของ anaerobic bacteria ที่ใช้ในการผลิต H เช่น Enterobacteriaceae และ Clostridium (Jung et al. 2002) Dark fermentation จะเกิดในช่วงอุณหภูมิ mesophilic (25-40 °C), thermophilic (40-65 °C), และ extreme thermophilic (65-80 °C) ขึ้นอยู่กับจุลินทรีย์ที่ใช้ การผลิต H ด้วยวิธีการ Dark fermentation ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อม เช่น pH, อุณหภูมิ, สารประกอบที่อยู่ในสับสเตรท, ความดัน, hydraulic retention time (HRT) และชนิดของจุลินทรีย์

คาร์โบไฮเดรตสับสเตรทที่ใช้ในการหมักที่รู้จักกันทั่วไป คือ น้ำตาล เช่น กลูโคสและซูโครส หรือสารที่มีความซับซ้อนมากกว่านั้นคือ พวกลิกนินเซลลูโลส และของเสียในอุตสาหกรรมอาหาร สารสับสเตรทแต่ละชนิดก็จะให้ปริมาณของ H ที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับวิธีการหมักและผลผลิตสุดท้าย (end products) สำหรับการสลายสารสับสเตรทคาร์โบไฮเดรตจะได้ออกมาในรูปของ pyruvate ก่อน ซึ่งจากนั้นก็มีการ metabolized ผลิต acetyl-CoA ฟอर्मเมท และเฟอร์ริดอกซิน พลังงาน ATP ที่ได้มาจาก acetyl-CoA และ H₂ ที่ได้มาจากฟอर्मเมทและเฟอร์ริดอกซิน Enteric

bacteria ส่วนใหญ่ใช้เอนไซม์ที่ได้จากสาร pyruvate ในขณะที่ anaerobic bacteria จะใช้ pyruvate-ferredoxin เอนไซม์จากเฟอร์รีดอกซิน pyruvate

การใช้น้ำตาลกลูโคสในการผลิต H₂ ตามทฤษฎี จะได้ก๊าซ H₂ 4 mole ต่อกลูโคส 1 mole (สมการ 16) ในขณะที่เดียวกันหากในการผลิตผลที่ได้กรด butyric ก็จะได้ H₂ 2 mole ต่อกลูโคส 1 mole (สมการ 17)

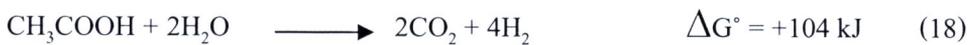


จากการรายงานของ Gibbs free energy ที่อุณหภูมิต่ำและความดันบรรยากาศ ถ้าพิจารณาปริมาณของ H₂ ที่ได้ และไม่พิจารณาถึงปริมาณของกรด butyric และ acetic จะทำให้มีปริมาณของ H₂ ที่สูงกว่าในทางทฤษฎี ในปัจจุบันได้มีการวิจัยในการเพิ่มปริมาณ H₂ 2-3 mole/mole กลูโคส โดยการ mixed จุลินทรีย์หลายชนิดในการหมัก และกลูโคสก็เป็นสับสเตรทที่ง่ายต่อการหมัก เพราะมีราคาต่ำ แต่สำหรับการใช้ lignocellulosic เป็นสับสเตรทในการหมัก เช่น hemicelluloses, cellulose และ lignin โดย cellulose จะมี crystalline มากกว่า hemicelluloses และเป็น polymer ที่สลายได้ยากกว่ากลูโคสโมเลกุลเดี่ยว ในกรณีการใช้ cellulose เป็นสับสเตรทในการผลิต H₂ จึงต้องมีเอนไซม์ที่มากกว่าในการสลายสับสเตรท

Dark fermentation โดยทั่วไปที่มีการใช้น้ำตาลในการผลิต H₂ จะให้อัตราการผลิต H₂ ที่สูงกว่าการใช้ของเสียที่เป็นสับสเตรทที่มีความซับซ้อน การศึกษา Dark fermentation ที่ใช้ Clostridium ในการผลิต H₂ ในการย่อยแบ่งจาก xylose, xylan, arabionose, galactose, เส้นใยจากไม้ และใน lignocelluloses ของ corn stover โดยจำนวนของ Clostridium อยู่ระหว่าง 2 – 3.2 mole โดยได้อัตราการผลิต H₂ 21 mmol H₂/(Lxhr) เมื่อใช้ xylose 3% เป็นสับสเตรท นอกจากนี้้อัตราการผลิตมากที่สุดได้ 121.0 mmol H₂/(Lx h) ในช่วง mesophilic ที่ได้จาก sewage sludge

2.2.2 Photo-Fermentation

แบคทีเรีย photoheterotrophic บางชนิดที่สามารถทำการผลิต H₂ และ CO₂ ด้วยการเปลี่ยนกรดอินทรีย์ เช่น กรด acetic, lactic, propionic และ butyric โดยที่การผลิต H₂ ด้วยวิธีอื่นจะเป็นการเปลี่ยน CO ที่ใช้วิธีการทางด้านชีววิทยาด้วยปฏิกิริยา water gas shift ในระบบการสังเคราะห์ด้วยแสงของแบคทีเรียจำพวก purple photoheterotrophic จะมีพลังงานไม่มากพอที่จะทำการแยกน้ำ แต่มันสามารถใช้กรดอินทรีย์ในสภาวะ anaerobic condition ที่มีการใช้พลังงานจากแสง อิเล็กตรอนที่ได้มาจากกรดอินทรีย์ จะเป็นตัวส่งอิเล็กตรอนให้กับตัวรับเฟอร์รีดอกซิน โดยอยู่ในสภาวะที่ขาดไนโตรเจน ที่จะมีเอนไซม์ nitrogenase เป็นตัวให้โปรตอนแก่ก๊าซ H₂



ΔG° อยู่ที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ ก๊าซ N₂, เอนไซม์ nitrogenase จะทำการกระตุ้น การตรึง N₂ มากกว่าการสังเคราะห์ H₂ ซึ่งเอนไซม์ nitrogenase จะมีการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้สูงมาก และจะถูกยับยั้งด้วยไฮดรอกซิลของแอมโมเนียม ดังนั้นจึงไม่มี O₂ เกิดขึ้นในกระบวนการ เนื่องจากการทำปฏิกิริยากับ O₂ ไม่เป็นปฏิกิริยาของ bio-photolysis ในทางทฤษฎีการ photo-fermentation จะมีปริมาณของก๊าซที่ได้สูง ในปฏิกิริยาที่ไม่มีการใช้ O₂ ซึ่งเป็นความสามารถในการใช้แสงในช่วงที่กว้างของแบคทีเรียพวก purple photosynthetic bacteria เพื่อใช้ในการย่อยสลายสับสเตรทอินทรีย์ที่ได้จากของเสีย

การผลิต H₂ ที่ได้จาก purple photosynthesis bacteria เช่น Rhodobacter spheroids, Rhodobacter capsulatus, Rhodospirillum rubrum และ Rhodospirillum rubrum (Kapdan, Kargi 2006) อัตราการผลิต H₂ จากกระบวนการ photo-fermentation ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ความเข้มแสง, แหล่งของคาร์บอน, ชนิดของจุลินทรีย์ที่ใช้ โดยจากการวิจัยพบว่า ประสิทธิภาพของเปลี่ยนเป็น H₂ ที่สูงจะมาจากกรดอินทรีย์ พวกกรด lactic ที่ให้ประสิทธิภาพอยู่ระหว่าง 80-86% (Kapdan, Kargi 2006) โดยได้อัตราในการผลิตของ H₂ 2.5 mmol H₂/(Lxh) ในการใช้ R. rubrum

แม้ว่าในทางทฤษฎีจะพบว่า H₂ ที่ได้จากการ photo-fermentation จะอัตราการผลิตที่สูงแต่ก็ยังมีค่าน้อยกว่าวิธี dark fermentation เนื่องจากกรดอินทรีย์ที่ใช้เป็นสับสเตรทจะให้ปริมาณ H₂ ที่น้อยกว่าการใช้กลูโคสในกระบวนการ dark fermentation ใน photo-fermentation การใช้กรดอินทรีย์จำนวนน้อยในการผลิต H₂ จึงมีการพัฒนาใหม่ๆ และการวิจัยที่มีการผลิต H₂ โดยใช้วิธีการ dark fermentation ร่วมกับการ Photo fermentation ด้วยกัน วิธีการรวมกันของ 2 กระบวนการนี้ กรดอินทรีย์ที่ผลิตได้จากกระบวนการ dark fermentation จะถูกนำไปสังเคราะห์ในกระบวนการ photo fermentation เพื่อใช้ในการผลิต H₂ ให้ได้มากขึ้น

2.2.3 กระบวนการ Metabolic Process (Photo-biology) หรือการผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยแบคทีเรียสังเคราะห์แสง

1. แบคทีเรียสังเคราะห์แสง

แบคทีเรียสังเคราะห์แสง เป็นแบคทีเรียซึ่งได้รับพลังงานสำหรับการเจริญจากแสงด้วยการเปลี่ยนพลังงานจากแสงให้เป็นพลังงานเคมีในรูป ATP โดยกระบวนการ Photophosphorylation เพื่อใช้ในการสังเคราะห์สารต่างๆ ที่เป็นส่วนประกอบของเซลล์ แบคทีเรียสังเคราะห์แสงเป็นพวกเจริญภายใต้สภาวะไร้อากาศ (Anoxygenic phototropic bacteria) การสังเคราะห์แสงของแบคทีเรียแตกต่างจากสาหร่าย และพืช คือไม่สามารถใช้น้ำเป็นตัวให้อิเล็กตรอนได้ ดังนั้นในการสังเคราะห์แสงของแบคทีเรียสังเคราะห์แสงจึงไม่ได้ก๊าซออกซิเจน แบคทีเรียสังเคราะห์แสงทุกกลุ่มสามารถตรึงไนโตรเจนได้ แต่การตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ได้หรือไม่ขึ้นอยู่กับมีการใช้ตัวให้อิเล็กตรอนจากภายนอกหรือไม่ เช่น มีการใช้สารประกอบซัลเฟอร์, โมเลกุลของไฮโดรเจน หรือสารประกอบอินทรีย์ ถ้ามีตัวให้อิเล็กตรอนจากแหล่งภายนอกจะไม่มีคาร์บอนไดออกไซด์ ตรึง CO₂ เนื่องจากสับสเตรทจากภายนอกมีผลยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ ribulose-1,5-biophosphate carboxylase การตรึงคาร์บอนไดออกไซด์นั้นจะผ่านวัฏจักรเคลวิน (calvin cycle) หรือวัฏจักรอื่นขึ้นอยู่กับชนิดของแบคทีเรียสังเคราะห์แสง ใน *R. rubrum* เมื่อเลี้ยงในแหล่งคาร์บอนที่เป็น malate พบว่าจะมีการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านกรดไกลโคลิก (glycolic acid) แต่เมื่อเลี้ยงในกรดโพธิโอนิก และกรดบิวทิริก พบว่าการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านวัฏจักรเคลวิน

2. แหล่งที่พบ

แบคทีเรียสังเคราะห์แสงพบอยู่ทั่วไปในธรรมชาติ น้ำจืด น้ำกร่อย น้ำเค็ม น้ำเสีย น้ำพุร้อน ในดิน โดยเฉพาะในน้ำที่มีการเน่าเปื่อยของสารอินทรีย์ต่างๆ ในทะเลทราย บ่อน้ำ โดยพบแบคทีเรียสังเคราะห์แสงในระหว่างชั้นที่มีออกซิเจน และชั้นที่มีไฮโดรเจนซัลไฟด์ การเจริญเติบโตของแบคทีเรียสังเคราะห์แสงขึ้นอยู่กับความเข้มแสง ความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ และสภาวะไร้อากาศ

3. ชนิดของแบคทีเรียสังเคราะห์แสง

แบคทีเรียสังเคราะห์แสงมีหลายชนิดแตกต่างกันตาม รูปร่าง การสร้างรงควัตถุ สรีรวิทยา และคุณสมบัติต่างๆ ทางชีวเคมี โดยทั่วไปแบ่งแบคทีเรียสังเคราะห์แสงออกเป็น 3 กลุ่ม

1. Green sulfur Bacteria
2. Purple sulfur Bacteria
3. Purple non-sulfur Bacteria

Green sulfur Bacteria

เป็นแบคทีเรียสังเคราะห์แสงที่อยู่ใน Family Chlorobacteriaceae หรือ Chloraceae การแยกแบคทีเรียกลุ่มนี้ออกจากแบคทีเรียกลุ่มอื่นใช้รงควัตถุเป็นตัวแยก Green sulfur bacteria เจริญในที่ไม่มีอากาศ และเป็น photoautotroph มีการดำรงชีวิตโดยการสังเคราะห์แสง และใช้สารอนินทรีย์คือ คาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอน สามารถออกซิไดซ์ไฮโดรเจนซัลไฟด์และสารประกอบซัลไฟด์ต่างๆ

Purple sulfur bacteria

เป็นแบคทีเรียสังเคราะห์แสงที่อยู่ใน Family Thiobacteriaceae เป็นแบคทีเรียที่เจริญในที่ไม่มีอากาศเป็น photoautotroph และออกซิไดซ์ไฮโดรเจนซัลไฟด์ และสารประกอบอินทรีย์ต่างๆ ในระหว่างขั้นตอนเริ่มแรกของการออกซิไดซ์ไฮโดรเจนซัลไฟด์ แบคทีเรียกลุ่มนี้มีการสะสมกำมะถันไว้ในไซโทพลาสซึม ซึ่งจะหายไปเมื่อมีการออกซิไดซ์กำมะถันหรือซัลเฟอร์ไปเป็นซัลเฟต (สมการ 1 และ 2) มีผลให้ไฮโดรเจนซัลไฟด์ถูกกำจัดออกไปจากสิ่งแวดล้อม





Non-sulfur purple bacteria

เป็นแบคทีเรียที่อยู่ใน Family Athiorhodaceae มีการดำรงชีวิตแบบ photoheterotroph ใช้สารประกอบอินทรีย์ต่างๆ เป็นแหล่งคาร์บอน และเป็นตัวให้อิเล็กตรอน แบคทีเรียกลุ่มนี้อาจต้องการปัจจัยจำเพาะอย่างเพื่อการเจริญเติบโต ในบางสภาวะแวดล้อม แบคทีเรียนี้อาจรีดิวส์คาร์บอนไดออกไซด์ แต่ส่วนใหญ่แล้วสารต่างๆ ภายในเซลล์ได้มาจากสารอาหารที่เป็นสารอินทรีย์โดยทั่วไป สารอินทรีย์ที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์แสงของแบคทีเรียกลุ่มนี้คือ กรดอะซิติก ภายใต้สภาวะไร้อากาศมีแสงร้อยละ 90 ของคาร์บอนในสารอินทรีย์จะถูกเปลี่ยนไปเป็นสารสะสมภายในเซลล์ โดยสะสมไว้ภายใต้ psedanophilic granules สารสะสมประกอบด้วยกรดโพลี-เบตา-ไฮดรอกซีบิวทีริก (Poly-β-hydroxybutyric acid) ซึ่งเป็นสารโพลีเอสเทอร์และเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ของเซลล์แบคทีเรีย คาร์บอนในสารอินทรีย์เพียงร้อยละ 10 เท่านั้นที่ถูกออกซิไดซ์ไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ (สมการ 4)



กรดอะซิติก

กรดโพลี-เบตา-ไฮดรอกซีบิวทีริก

คุณสมบัติต่างๆ ของแบคทีเรียสังเคราะห์แสงที่อยู่ใน Family Athiorhodaceae หรือ Rhodospirillaceae ในปัจจุบัน มีดังต่อไปนี้

1. เซลล์มีรูปร่างทรงกลม แท่งสั้น แท่งยาว ปุ่ม ไม่เรียงตัวเป็นเส้น (Filament) ซึ่งจัดอยู่ในสกุล Rhodopseudomonas หรือรูปร่างปุ่ม แต่เรียงเป็นเส้น ซึ่งจัดอยู่ในสกุล Rhodomicrobium หรือรูปร่างเป็นเกลียว ซึ่งจัดอยู่ในสกุล Rhodospirillum
2. แบ่งตัวโดยวิธีการแยกเป็นสอง (binary fission) หรือบางชนิดอาจแบ่งโดยการแตกหน่อ (budding)
3. ส่วนใหญ่เคลื่อนที่ได้ โดยใช้ polar flagella แต่ Rhodomicrobium ใช้ peritrichous flagella

4. รังควัตถุสังเคราะห์แสง (photopigment) อาจอยู่ใน vesicle เชื่อบางๆ (lamellae) หรือท่อ (tubular)

5. ไม่มี gas vacuole

6. ส่วนใหญ่เป็นพวกที่ต้องการอากาศเพียงเล็กน้อย (microaerophilic) แต่ก็มีหลายชนิดที่เจริญในที่ที่มีอากาศได้ ถ้าอยู่ในสภาวะไร้ออกซิเจนต้องมีแสง

7. การสังเคราะห์ใช้สารอินทรีย์เป็นตัวให้อิเล็กตรอน แต่มีบางสายพันธุ์ที่ใช้ก๊าซไฮโดรเจน ไม่สามารถใช้กำมะถันเป็นตัวให้อิเล็กตรอน ส่วนใหญ่ต้องการวิตามินมากกว่า 1 ชนิดเพื่อการเจริญเติบโต (growth factor)

8. สามารถตรึงก๊าซไนโตรเจนได้

9. มีแบคทีเรียโคลอโรฟิลล์ เอ หรือ บี (bacteriochlorophyll a or b) และแคโรทีนอยด์

10. สารสะสมในเซลล์ คือ โพลีแซ็กคาไรด์, โพลี-เบตา-ไฮดรอกซีบิวรีเรท และโพลีฟอสเฟต

11. DNA (G+C) ร้อยละ (โมล) 61.2-72.4

12. พบทั่วไปในธรรมชาติ โดยเฉพาะในน้ำที่มีอินทรีย์วัตถุมาก

แบคทีเรียสังเคราะห์แสงใน Family Rhodospirillaceae เป็นแบคทีเรียที่มีข้อดีหลายประการ เช่น

1. สามารถเจริญเติบโตได้ดีและรวดเร็วในน้ำทิ้งที่มีปริมาณสารอินทรีย์สูง และเจริญได้โดยตรงในน้ำทิ้งอุตสาหกรรมเกษตร

2. สามารถเจริญเติบโตได้ดีในสภาวะแวดล้อมต่างๆ กัน คือ ทั้งในสภาวะที่มีอากาศไร้แสงและสภาวะที่ไร้อากาศมีแสง

3. สามารถใช้วัตถุดิบได้หลายชนิด เช่น น้ำตาล แป้ง และกรดอินทรีย์ต่างๆ

4. เซลล์มีคุณค่าทางโภชนาการสูง

5. เซลล์ไม่มีพิษใดๆ ต่อสัตว์เลี้ยง

6. สามารถเร่งการเจริญเติบโต ระบบสืบพันธุ์ เพิ่มอัตราการอยู่รอด และเพิ่มสีเนื้อให้แก่สัตว์เลี้ยงได้

4. การผลิตก๊าซไฮโดรเจน

การผลิตก๊าซไฮโดรเจนขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายชนิด เช่น สายพันธุ์ของแบคทีเรีย แหล่งคาร์บอน แหล่งไนโตรเจน ความหนาแน่นเซลล์ และสภาวะแวดล้อม เป็นต้น แบคทีเรียสังเคราะห์แสงสายพันธุ์เดียวกันในอาหารต่างกัน ผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้แตกต่างกัน กลไกในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนยังไม่ทราบแน่นอน โดยทั่วไปพบว่า ก๊าซไฮโดรเจนเป็นผลโดยตรงที่ได้จากการสังเคราะห์แสงแบบ non-cyclic photophosphorylation และในการใช้กรดอินทรีย์หรือสารประกอบอินทรีย์ผ่านวัฏจักรกรดซิตริก (citric acid cycle) และมีแหล่งไนโตรเจนที่เหมาะสม

เมื่อเซลล์แบคทีเรียสังเคราะห์แสงเจริญอยู่ในที่ๆ มีสารประกอบอินทรีย์ หรือกรดอินทรีย์ มีแหล่งไนโตรเจนที่เหมาะสม และมีแสง สารประกอบอินทรีย์เป็นตัวให้อิเล็กตรอน และยังทำหน้าที่เป็นแหล่งคาร์บอนด้วย แสงกระตุ้นให้เกิดการส่งผ่านของอิเล็กตรอนไปยังเฟอร์รีดอกซิน และมีเอ็นไซม์ไนโตรจีเนส (nitrogenase) เป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้าย แหล่งไนโตรเจนที่ใช้ได้มีหลายชนิด เช่น กลีโอสโมเนีย กรดอะมิโน เช่น กลูตามัต โดยกลูตามัต เพียงเล็กน้อยกระตุ้นให้เกิดการผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ ในขณะที่กลีโอสโมเนียมีผลในการยับยั้งการผลิตก๊าซไฮโดรเจน โดยมีผลต่อระบบการทำงานของเอ็นไซม์ไนโตรจีเนส

การผลิตก๊าซไฮโดรเจนเกิดได้ทั้งในสภาวะไร้อากาศมีแสง และสภาวะไร้อากาศได้แสง สำหรับสภาวะไร้อากาศมีแสงแบคทีเรียสังเคราะห์แสงย่อยสลายกรดอินทรีย์ได้อย่างรวดเร็วและเกิดก๊าซไฮโดรเจนมาก เมื่อเจริญในสภาวะไร้อากาศไร้แสง แบคทีเรียสังเคราะห์แสงผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้เช่นกัน แต่อัตราการย่อยสลายกรดอินทรีย์ช้ากว่าสภาวะไร้อากาศมีแสง และปริมาณก๊าซที่ได้ส่วนใหญ่เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

4.1 เอ็นไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซไฮโดรเจน

แบคทีเรียสังเคราะห์แสงเป็นแบคทีเรียที่ตรึงไนโตรเจนได้โดยรีดิวส์ไนโตรเจนแล้วเปลี่ยนเป็นแอมโมเนีย โดยเอ็นไซม์ไนโตรจีเนส ซึ่งพบในแบคทีเรียจำพวก prokaryotes ที่เจริญในสภาวะไร้อากาศ ทั้งพวก facultative anaerobe และ obligate anaerobic และแบคทีเรียสังเคราะห์แสง

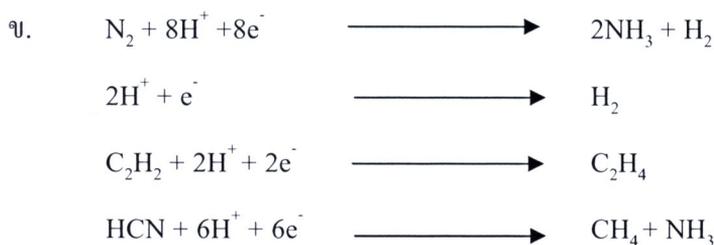
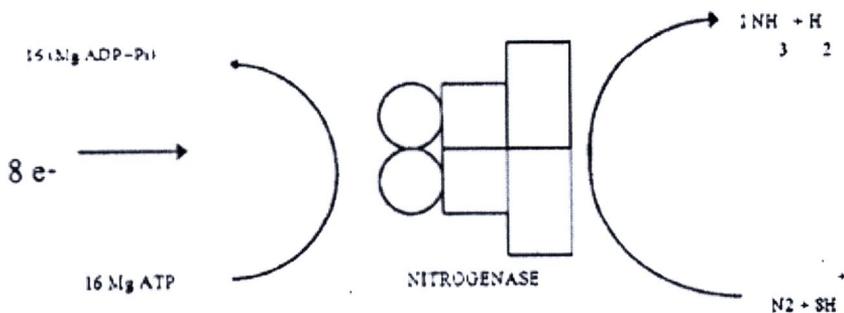
4.2 เอนไซม์ไนโตรจีเนส (Nitrogenase)

การตรึงไนโตรเจนต้องใช้ ATP และอิเล็กตรอน โดยมีปัจจัยที่สำคัญคือ เอนไซม์ไนโตรจีเนส ซึ่งเป็นเอนไซม์เชิงซ้อน (enzyme complex) ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ

1. โปรตีนที่มีธาตุเหล็ก (Fe-Protein) หรือ reductant ซึ่งประกอบด้วย 2 หน่วยย่อย
2. โปรตีนที่มีธาตุเหล็กและ โมลิบดีนัม (MoFe-Protein) หรือ dinitrogenase ที่ประกอบด้วย 4 หน่วยย่อย

ในการทำงานของเอนไซม์นี้ส่วนแรกทำหน้าที่รับอิเล็กตรอนและสลาย ATP เพื่อผลักดันอิเล็กตรอนให้แก่ส่วนที่ 2 ซึ่งทำหน้าที่รีดิวส์ไนโตรเจนให้เป็นแอมโมเนียเข้าสู่ metabolism ของกรดอะมิโน และกรดนิวคลีอิกเป็นส่วนใหญ่ แหล่งของจุลินทรีย์ นอกจากแอมโมเนียแล้วเอนไซม์ไนโตรจีเนสยังรีดิวส์สารอื่นได้ เช่น รีดิวส์โปรตอน (H^+) ให้เป็นไฮโดรเจน แสดงว่าเอนไซม์นี้มีความจำเพาะเจาะจง (specific) ต่อสับสเตรทน้อยสารอื่นที่มีขนาดโมเลกุลใกล้เคียงกันกับไนโตรเจนก็จะถูกรีดิวส์ได้ เช่น C_2H_2 , HCN และ N_2O เป็นต้น ดังรูป (2.9) ด้วยเหตุนี้จึงใช้ C_2H_2 เป็นสับสเตรทในการศึกษาเอนไซม์ตัวนี้ โดยวัดปริมาณ C_2H_4 ที่เกิดขึ้นด้วยก๊าซโครมาโตกราฟี

ก.





รูปที่ 2.9 โครงร่างแสดงองค์ประกอบและการทำงานของเอ็นไซม์ในโตรจีเนส (ก) และปฏิกิริยาต่างๆ ที่ถูกเร่งด้วยเอ็นไซม์นี้ (ข)

4.3 การสังเคราะห์เอ็นไซม์ในโตรจีเนส

Meyer และคณะ แสดงให้เห็นว่าเซลล์ของ *R. rubrum* ที่เจริญเติบโตมีการทำงานของเอ็นไซม์ในโตรจีเนสขึ้นกับแสง เมื่อแสงเพิ่มขึ้นพบการทำงานของเอ็นไซม์ดังกล่าวในช่วง stationary phase การทำงานของเอ็นไซม์ในโตรจีเนสที่เพิ่มขึ้นมาจากการสังเคราะห์ปริมาณโปรตีนเพิ่มขึ้น โดยพบว่าการใช้ chloramphenicol (CAM) ที่ยับยั้งการสร้างโปรตีน สามารถยับยั้งการทำงานของเอ็นไซม์ในโตรจีเนส การสังเคราะห์เอ็นไซม์ในโตรจีเนสยังขึ้นกับ gas phase และสถานะที่ใช้ในการเลี้ยงด้วย เช่น เมื่อเลี้ยงในภาชนะที่มีก๊าซอาร์กอน (Ar) มีแสงเอ็นไซม์ในโตรจีเนส มีกิจกรรมสูงที่สุด แต่เมื่อเลี้ยงในสถานะที่มี $\text{N}_2 + \text{H}_2 + \text{CO}_2$ พบว่าการทำงานเพิ่มขึ้นในช่วงแรก และลดลงอย่างรวดเร็ว และถ้าใน gas phase มีแต่ N_2 อย่างเดียวไม่พบกิจกรรมของเอ็นไซม์ในโตรจีเนส เนื่องจากมีการสะสมของแอมโมเนีย เพราะแอมโมเนียเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการรีดิวส์ไนโตรเจน

4.4 กลไกการผลิตก๊าซไฮโดรเจน

การผลิตก๊าซไฮโดรเจนเกิดในสถานะไร้อากาศมีแสง โดยแสงทำให้เกิดกระบวนการขนส่งอิเล็กตรอนและมีเอ็นไซม์ในโตรจีเนสเป็น terminal catalyse กลไกการเกิดไฮโดรเจนแตกต่างกันตามแหล่งคาร์บอน เนื่องจากกรดแต่ละตัวมี reduction state ที่แตกต่างกัน และขึ้นอยู่กับรูปแบบ (pattern) ในการเกิดเมตาโบลิซึมที่แตกต่างกัน *R. capsulate* ใช้กรดแลคติกผลิตก๊าซ โดยมีไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบในก๊าซร้อยละ 72 ได้ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านวัฏจักรกรดซิตริก โดยกลไกในการเกิดไฮโดรเจนยังไม่ทราบแน่นอน แต่โดยทั่วไปการเกิดก๊าซไฮโดรเจนเป็นผลที่ได้โดยตรงจากการสังเคราะห์แสง แต่การเกิดก๊าซไฮโดรเจนในสถานะไร้อากาศไร้อาหารนั้น ไม่ใช่ผลของแสง แต่เป็นการทำงานของเอ็นไซม์ไฮโดรจีเนส ซึ่งไม่ขึ้นกับแสง โดยมี

สมมติฐานว่าปฏิกิริยาการรีดิวส์ตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้าย โดยมีไฮโดรเจนและโคเอ็นไซม์บางชนิดเป็นสื่อในการทำงานของเอ็นไซม์ไฮโดรจีเนส

กลไกในการเกิดก๊าซไฮโดรเจนยังไม่ทราบเป็นที่แน่ชัด แต่สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในสภาวะไร้อากาศมีแสง ซึ่งเป็นการทำงานของเอ็นไซม์ในโตรจีเนส และในสภาวะไร้อากาศไร้แสง ซึ่งเป็นการทำงานของเอ็นไซม์ไฮโดรจีเนสใน *R. rubrum* การผลิตก๊าซไฮโดรเจนคล้ายกับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในแบคทีเรียจำพวก heterotrophic โดยพบว่ามีการผลิตก๊าซไฮโดรเจน เมื่อใช้ sodium formate และการผลิตก๊าซสามารถถูกยับยั้งอย่างสมบูรณ์โดยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และปฏิกิริยา oxidation ไม่ต้องการ ATP

แบคทีเรียสังเคราะห์แสงมีตัวให้อิเล็กตรอนหลายชนิด เช่น ไฮโดรเจน กรดไขมัน และแอลกอฮอล์ ขึ้นอยู่กับชนิดของแบคทีเรีย สายพันธุ์ และสภาวะในการเจริญเติบโต โดยสามารถรีดิวส์สารประกอบอินทรีย์โมเลกุลเล็กได้ดีกว่าสารประกอบอินทรีย์โมเลกุลใหญ่

เซลล์ของ *R. palustris* ผลิตไฮโดรเจนได้ในสภาวะไร้อากาศมีแสง และมีสารประกอบอินทรีย์เป็นแหล่งคาร์บอน และเป็นตัวให้อิเล็กตรอนการเกิดไฮโดรเจนขึ้นกับแสง อัตราในการเกิดไฮโดรเจนสัมพันธ์กับการทำงานของเอ็นไซม์ในโตรจีเนส แต่ไม่สัมพันธ์กับการทำงานของเอ็นไซม์ในโตรจีเนส ไม่ผลิตก๊าซไฮโดรเจนภายใต้สภาวะไร้อากาศมีแสง

Weaver และคณะ พบว่า *R. rubrum* ที่เจริญในอาหารที่มีกรดอะมิโนผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้มาก ในขณะที่การผลิตก๊าซไฮโดรเจนจะหยุดในอาหารที่มีแอมโมเนียมไอออน หรือก๊าซไนโตรเจน นอกจากนี้เอ็นไซม์ไฮโดรจีเนสเป็นเอ็นไซม์ co-induced ที่ทำงานร่วมกับเอ็นไซม์ในโตรจีเนสในการตรึงไนโตรเจนในจุลินทรีย์บางชนิด โดยการทำงานของเอ็นไซม์ในโตรจีเนส มีมากในช่วง log phase ซึ่งไม่พบเอ็นไซม์ไฮโดรจีเนส

Kamen กล่าวว่า อีกกลไกหนึ่งในการเกิดก๊าซไฮโดรเจนผ่านปฏิกิริยาของการ metabolized ของสารตัวกลางในวัฏจักรกรดซิตริก ซึ่งถูกยับยั้งเมื่อในระบบมีแอมโมเนียมไอออน หรือก๊าซไนโตรเจน การเกิดก๊าซไฮโดรเจนเป็นการทำงานของเอ็นไซม์ในโตรจีเนสมากกว่าการทำงานของเอ็นไซม์ไฮโดรจีเนส

การเกิดไฮโดรเจนในสภาวะไร้อากาศไร้แสง เกิดขึ้นได้โดยไม่ขึ้นกับ ATP และไม่มีผลของไนโตรเจนมาเกี่ยวข้อง แต่เกี่ยวข้องกับเอ็นไซม์ไฮโดรจีเนส ซึ่งถูกยับยั้งได้โดยก๊าซ

คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) พบว่าใน *Chromatium sp.* และ *R. rubrum* มีการผลิตก๊าซไฮโดรเจนควบคู่กับการเกิดกรดฟอร์มิก และพบว่าเอ็นไซม์ไฮโดรจีเนสจะถูกยับยั้งเมื่อมีแสงมาก

4.5 กลไกในการเกิดไฮโดรเจนจากสารประกอบอินทรีย์

สารประกอบอินทรีย์สามารถเป็นตัวให้อิเล็กตรอนได้เมื่ออยู่ในสภาวะที่มีตัวรับอิเล็กตรอนที่เหมาะสม แบคทีเรียสังเคราะห์แสงใช้สารประกอบอินทรีย์ได้หลายชนิด โดยใช้เป็นแหล่งคาร์บอนและเป็นตัวให้อิเล็กตรอน เช่น แลคเตท มาเลท ซัคซิเนต ฟูมาเลท ซิเตรท เป็นต้น สารประกอบอินทรีย์เหล่านี้ถูกย่อยสลายได้เป็นไพรูเวท และ ATP ในสภาวะไร้อากาศโดยผ่านปฏิกิริยา phosphorylation การใช้สารประกอบอินทรีย์ที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 ตัว จะไม่ผ่านวัฏจักรกรดซิตริกเท่านั้น แต่ยังผ่านวัฏจักรกลไกออกไซด์ (glyoxylate cycle) ด้วย

แบคทีเรียสังเคราะห์แสงสามารถออกซิไดส์สารประกอบต่างๆ ได้อย่างรวดเร็วในสภาวะไร้อากาศมีแสง และเปลี่ยนเป็นส่วนประกอบของเซลล์



สมการที่ 6 เป็นปฏิกิริยาในการกระบวนการเมตาโบลิซึมของแบคทีเรียสังเคราะห์แสงในสภาวะมีแสง โดย H_2A แทนสับสเตรทต่างๆ เช่น H_2O , H_2S หรือสารประกอบอินทรีย์ เป็นต้น สมการนี้ไม่สามารถอธิบายเมื่อ H_2A เป็นกรดอินทรีย์ จึงมีการเสนอสมการการใช้กรดอะซิติกเป็นแหล่งคาร์บอนดังนี้



4.5.1 Carbon assimilation

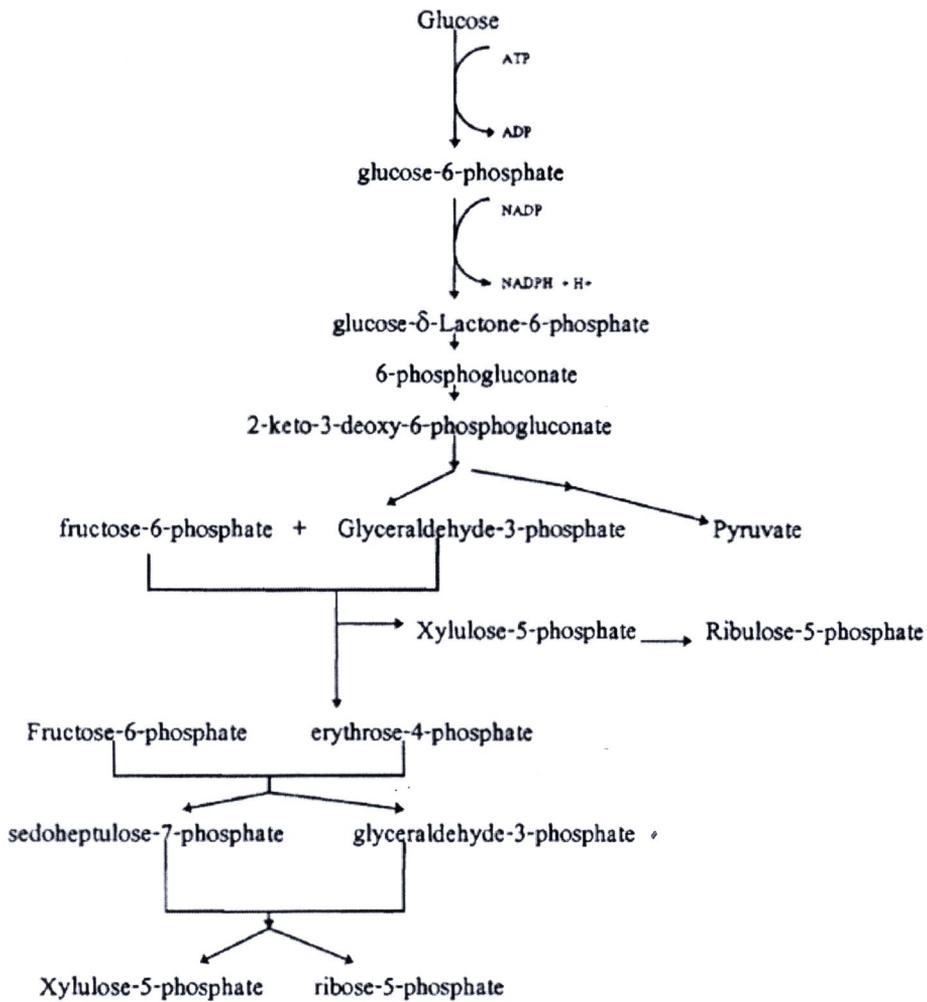
แบคทีเรียสังเคราะห์แสงสามารถตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ได้โดยผ่าน reductive pentose phosphate cycle โดยใช้เอ็นไซม์ ribulose 1,5-bisphosphate carboxylase แต่ในสารอาหารที่มีกรดอินทรีย์ตัวอื่น เช่น มาเลท ซัคซิเนต หรือสารประกอบอินทรีย์ชนิดต่างๆ พบว่าเอ็นไซม์

ribulose 1,5-bisphosphate carboxylase ถูกยับยั้งโดยผ่านไพรูเวทของวัฏจักรไกลโคลิก (glycolic cycle) แทน

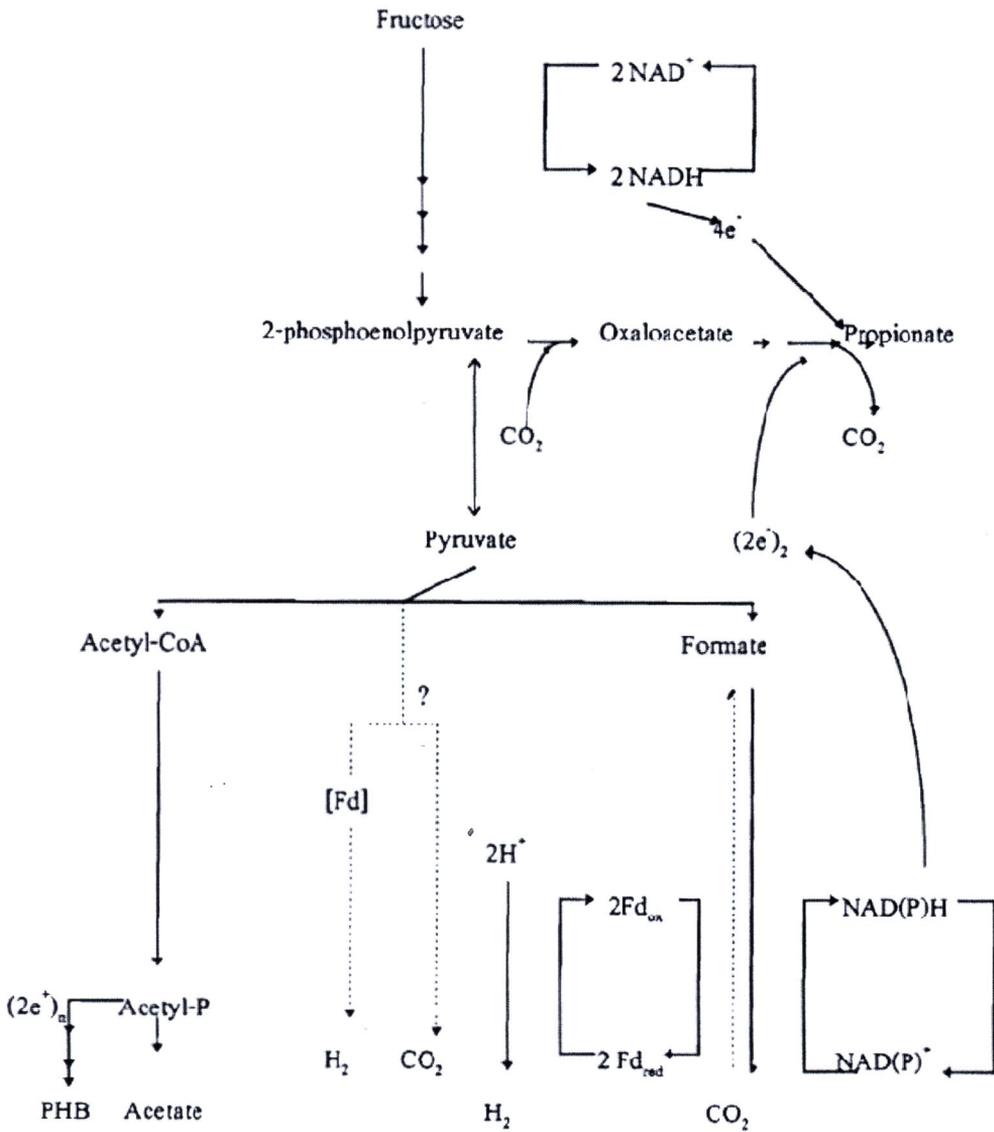
ในกรณีของสารประกอบคาร์บอนอะตอมเดี่ยว เช่น CH_3OH , HCOOH เอ็นไซม์ formate hydrogen lyase จะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นสามารถ catalyse ปฏิกิริยาให้ฟอร์มเมทกลายเป็นไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์

การ catalyse กรดอินทรีย์ได้ไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์โดยผ่านวัฏจักรกรดซิตริกในสภาวะไร้อากาศมีแสง แต่ถ้ามีไฮโดรเจนหรือสารประกอบไฮโดรเจนในระบบ วัฏจักรกรดซิตริกจะไม่ทำงานทำให้มีการสะสมคาร์บอนไดออกไซด์ และสารประกอบคาร์บอน 3 อะตอม (C_3) เกิดการสะสมของ poly- β -hydroxybutyrate (PHB) ขึ้นภายในเซลล์เป็น endogenous substrate

แบคทีเรียสังเคราะห์แสงชอบกรดอินทรีย์สำหรับการเจริญเติบโตและสามารถใช้สารประกอบเหล่านั้น เช่น คาร์โบไฮเดรต รวมทั้งน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว และน้ำตาลเชิงซ้อน ได้แก่ starch เป็นต้น *R. capsulata* และ *R. sphaeroides* สามารถเจริญแบบ phototrophic และ chemotrophic (aerobe + dark) โดยใช้กลูโคสและฟรุคโตสได้ นอกจากนี้ *R. sphaeroides* ยังสามารถ metabolized กลูโคสผ่าน Entner-Doudoroff pathway ภายใต้สภาวะไร้อากาศไร้แสงใช้ฟรุคโตสผ่านวิถี Entner-Doudoroff (รูปที่ 2.10) ส่วนภายใต้สภาวะไร้อากาศมีแสงใช้วิถี Emdem-Meyerhof (รูปที่ 2.11)



รูปที่ 2.10 การย่อยสลายกลูโคสของแบคทีเรียสังเคราะห์แสง *R. sphaeroides* ในสภาวะไร้อากาศไร้แสง และสภาวะไร้อากาศมีแสง โดยผ่านวิธี Entner-Doudoroff



รูปที่ 2.11 การย่อยสลาย fructose ในสภาวะไร้อากาศมีแสงของแบคทีเรียสังเคราะห์แสง *R. sphaeroides* โดยผ่านวิธี Embden Mayerhof

การใช้สับสเตรทแต่ละตัวมีวิถีที่แตกต่างกันไปตามชนิดของสับสเตรท แต่ที่เหมือนกันคือ TCA cycle กับ Glycolate cycle และแต่ละสายพันธุ์มีการทำงานในแต่ละสับสเตรทไม่เท่ากัน การเกิดก๊าซไฮโดรเจนขึ้นอยู่กับการทำงานของเอ็นไซม์ในการย่อยสับสเตรท Gest รายงานว่าแบคทีเรียสังเคราะห์แสงมีความสามารถในการใช้สับสเตรทหลายชนิด เพราะมีระบบเอ็นไซม์ที่หลากหลายภายในเซลล์

4.5.2 เมตาโบลิซึมของสารประกอบอินทรีย์

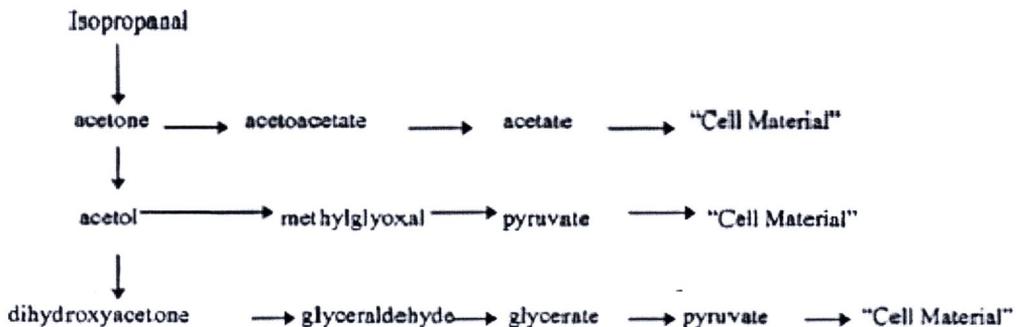
4.5.2.1 Photo-metabolism ในสภาวะไร้อากาศมีแสง

แบคทีเรียสังเคราะห์แสงสามารถทำให้เกิด photo-metabolism ของสารประกอบอินทรีย์ ด้วยการอาศัยพลังงานจากแสงที่มีการทำให้อิเล็กตรอนถูกขนส่งอย่างเป็นวัฏจักรและไม่เป็นวัฏจักร ซึ่งจะนำเอา ATP และ $\text{NADPH} + \text{H}^+$ ที่เกิดขึ้นมาใช้เพื่อทำให้สารประกอบอินทรีย์เปลี่ยนแปลงในกระบวนการเมตาโบลิซึม แล้วกลายเป็นสารซึ่งเป็นส่วนประกอบของเซลล์โดยแบคทีเรียสังเคราะห์แสงใช้สารอินทรีย์บางชนิดเป็นแหล่งคาร์บอนและแหล่งไนโตรเจน พบว่าสารประกอบอินทรีย์ทำให้แบคทีเรียตรึงคาร์บอนไดออกไซด์มาใช้ในวัฏจักรเคลวินลดลง ทั้งนี้เนื่องจากสารประกอบอินทรีย์ยับยั้งการทำงานของเอ็นไซม์ในวัฏจักรเคลวิน

นอกจากนี้ชนิดของผลผลิตที่ได้จากกระบวนการ photo-metabolism ขึ้นอยู่กับชนิดของสารประกอบอินทรีย์และสภาวะแวดล้อมที่แบคทีเรียเจริญอยู่ เช่น ในสภาวะแวดล้อมที่มีแหล่งไนโตรเจนทำให้มีการสังเคราะห์กรดอะมิโนมาก ในขณะเดียวกันมีการสังเคราะห์คาร์โบไฮเดรตลดลง และการมี $\text{NADH} + \text{H}^+$ มากทำให้การสังเคราะห์สารประกอบรูบริดิวส์ เช่น ไขมัน และ poly- β -hydroxybutyrate

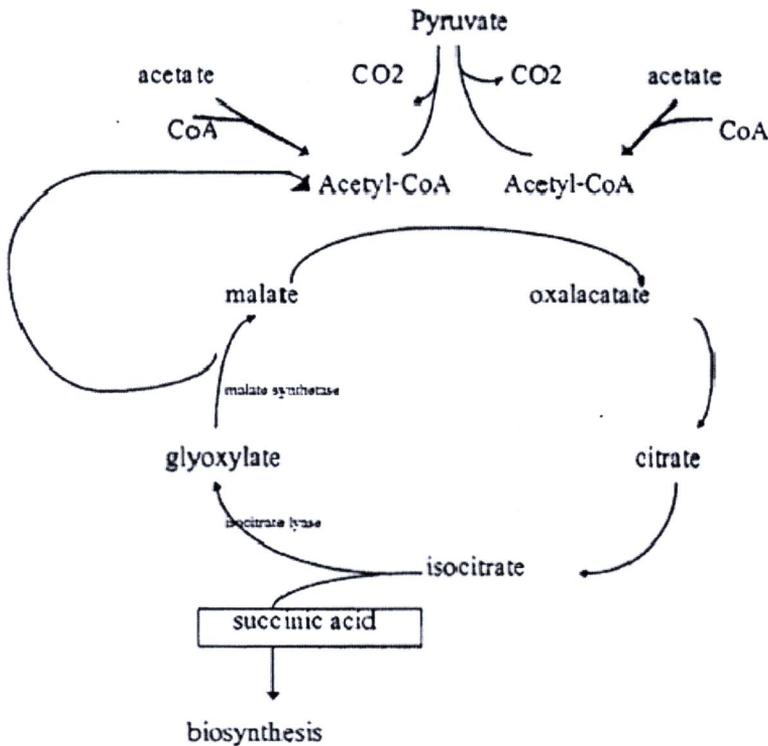
4.5.2.2 Photo-metabolism ของ Isopropanol

ในการใช้ Isopropanol เป็นแหล่งคาร์บอน สามารถเกิดขึ้นได้หลายวิธีดังแผนภาพ



4.5.2.3 Photo-metabolism ของกรดอะซิติก

ในการใช้กรดอะซิติกเป็นแหล่งคาร์บอน กรดอะซิติกจะถูกเปลี่ยนเป็น oxalacetate โดยในการเติม CoA ไปที่ Acetate ได้เป็น Acetyl-CoA (2C) จากนั้นจะรวมกับ glyoxylate (2C) โดยเอ็นไซม์ malate synthetase ได้เป็น C เกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องไปเป็นวัฏจักร glyoxylate (รูปที่ 2.12)



รูปที่ 2.12 วัฏจักร glyoxylate นำไปสู่การสังเคราะห์ oxalacetate จาก acetate มีเอ็นไซม์ 2 ชนิด คือ (1) isocitrate lyase และ (2) malate synthetase โดยการทำงานของวัฏจักรกรดอะซิติกเป็นปฏิกิริยาหลัก : การเจริญโดยใช้ Pyruvate มีอีกวัฏจักรร่วมทำงานด้วย คือ วัฏจักรไกลออกไซเลตซึ่งทำงานในระหว่างการเจริญเติบโตที่มีกรดอะซิติกเป็นแหล่งคาร์บอน



กรดอะซิติกถูกใช้เป็นแหล่งคาร์บอน จากนั้นจึงถูกเปลี่ยนเป็น oxalacetate และมีการเปลี่ยนอย่างต่อเนื่องผ่านวัฏจักรไกลออกไซเลต ซึ่งมี glyoxylate เป็นสารตัวกลาง วัฏจักรนี้ประกอบไปด้วยการทำงานของวัฏจักรกรดอะซิติก และมีการเพิ่มระบบการทำงานของเอ็นไซม์ 2

ชนิด คือ (1) isocitrate lyase ที่ทำให้ isocitrate แยกออกเป็น succinic acid และ glyoxylate และ (2) malate synthetase ช่วยในการรวมระหว่าง Acetyl-CoA กับ glyoxylate ได้เป็น malate ส่วนการสังเคราะห์ผ่านวัฏจักร glyoxylate นั้น succinic acid ถูกใช้ในกระบวนการสร้างสารและใช้ในการผลิต porphyrin ได้โดยตรง และถูกออกซิไดซ์เปลี่ยนเป็นกรดอะมิโนที่มีคาร์บอน 4 อะตอม และเปลี่ยนเป็นคาร์โบไฮเดรตต่อไป

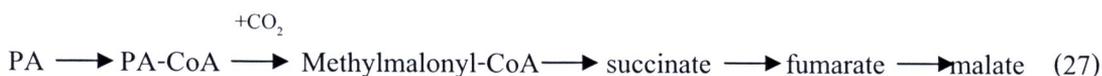
นอกจากนี้ใน *R. rubrum* และ *R. palustris* ปฏิกริยามีทั้งในวัฏจักรกรดซิตริก และในวัฏจักรออกไซเลต โดยกรดอะซิติกสามารถเปลี่ยนเป็นคาร์โบไฮเดรตผ่านกระบวนการ phosphonolpyruvate ในการเจริญเติบโตโดย decarboxylation ของกรดที่มีคาร์บอนอะตอม 4 อะตอม (4C acid) ในเซลล์จะสังเคราะห์ PHB เมื่อมี ATP และมี reduced pyridine nucleotide เพียงพอ ; PHB เป็นสารสะสมภายในเซลล์ที่เป็น reducing power สามารถใช้ในการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ และสังเคราะห์เป็นคาร์โบไฮเดรตได้

การใช้กรดอะซิติกเป็นตัวให้อิเล็กตรอนใน *R. rubrum* ที่เจริญในสภาวะไร้อากาศมีแสงสามารถใช้คาร์บอนอะตอมของกรดอะซิติกโดยการสังเคราะห์แสงของเซลล์ได้โดยตรง นอกจากนี้ Gest และคณะ พบว่า เมื่อใช้ $C^{14}H_3COOH$ หมู่ methyl ของกรดอะซิติกถูกเปลี่ยนเป็น insoluble ของเซลล์ และส่วนใหญ่ถูกเปลี่ยนเป็น PHB และเมื่อใช้ $H_3C^{14}OOH$ ปรากฏว่า หมู่ carboxyl เปลี่ยนเป็น CO_2 เป็นการเปลี่ยนถ่าย (transform) ของคาร์บอนในกรดอะซิติก ทั้งนี้การใช้กรดอะซิติกในการสังเคราะห์เป็นเซลล์ พบว่าโปรตีนภายในเซลล์ประมาณร้อยละ 45 มาจาก bicarbonate ที่เหลือประมาณร้อยละ 20 มาจากหมู่คาร์บอนแหล่งอื่น เช่น ใน yeast extract ที่เติมลงในอาหารเลี้ยงเชื้อ และสภาวะมีอากาศไร้แสง เซลล์สามารถออกซิไดซ์สารประกอบเป็นเซลล์ได้ และในสภาวะไร้อากาศมีแสง จะใช้กรดอะซิติกเป็นตัวให้อิเล็กตรอน แสดงให้เห็นว่า ขบวนการเมตาโบลิซึมของคาร์บอนจากตัวให้อิเล็กตรอนจำเป็นทั้งในสภาวะไร้อากาศและมีอากาศ

4.5.2.4 Photo-metabolism ของกรดโพรพิโอนิก

กรดโพรพิโอนิก ถูกเปลี่ยนเป็น Propionyl-CoA โดยมีเอ็นไซม์ Propionyl-CoA synthetase การ metabolized กรดโพรพิโอนิกเกิดขึ้นหรือไม่ขึ้นอยู่กับว่าในระบบมีคาร์บอนไดออกไซด์หรือไม่ พบว่าถ้าในระบบมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะมีการ metabolized

กรดโพธิโอนิก โดยคาร์บอนไดออกไซด์จะเข้าไปยังหมู่ carboxyl ของ succinate fumarate, malate และ aspartate พบใน *R. rubrum*, *R. capsulata* และ *Chlorobium thiosulphatophilum* ดังสมการ 9



4.5.2.5 Photo-metabolism ของกรดบิวทิเรท

บิวทิเรทถูกเปลี่ยนเป็น poly- β -hydroxybutyrate ในระหว่างการสังเคราะห์แสงในเซลล์ของแบคทีเรียจำพวก *Athiorhodaceae* พบว่า 1 mole กรดบิวทิริกตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ 0.4 mole และ poly- β -hydroxybutyrate (PHB) สามารถใช้เป็นแหล่งคาร์บอนภายในเซลล์สำหรับการสังเคราะห์สารต่างๆ ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม

4.5.2.6 Photo-metabolism ของกรดแลกติก

ข้อมูลที่ทำการศึกษาเกี่ยวกับการใช้กรดแลกติกเป็นแหล่งคาร์บอนมีไม่มากนักใน *R. palustris* พบว่าคาร์บอนต่างๆ ตัวของกรดแลกติกสามารถเปลี่ยนเป็นเซลล์ได้โดยตรง และ primary oxidation ของกรดแลกติกจะได้ไพรูเวทและมีกลไกต่างๆ เหมือนไพรูเวทรวมทั้งการเกิดไฮโดรเจนด้วย

4.5.2.7 Photo-metabolism ของ pyruvate

วิถี (pathway) แตกต่างกันขึ้นอยู่กับการเจริญเติบโต และสภาวะที่ใช้ในการทดลอง การสังเคราะห์คาร์โบไฮเดรต กรดอะมิโน และกรดอินทรีย์จากไพรูเวทใน *R. rubrum* พบว่าไพรูเวทถูกเปลี่ยนไปเป็น phosphoenolpyruvate (PEP) โดย ATP-requiring PEP synthetase และสามารถสังเคราะห์คาร์โบไฮเดรต หรือสังเคราะห์กรดอะมิโนได้โดยเกิดใน anaerobic reductive carboxylic acid จากกรดอินทรีย์เป็นแหล่งคาร์บอนสำหรับการสังเคราะห์กรดอะมิโน และ PHB ถูกสังเคราะห์จากไพรูเวท การศึกษาใน *R. sphaeroides* และ *R. rubrum* พบว่า NADH จำเป็นสำหรับการสังเคราะห์ PHB และ PHB เกิดจาก NAD reduction กับเฟอร์รีดอกซินที่ถูกรีดิวส์ในระหว่างการแตกออกของไพรูเวท ทั้งนี้ PHB สังเคราะห์ในที่ๆ มีแสงมากกว่าในที่ๆ ไม่มีแสง แต่ยังไม่เป็นที่แน่ชัดถึงความต้องการแสงในการสังเคราะห์ PHB

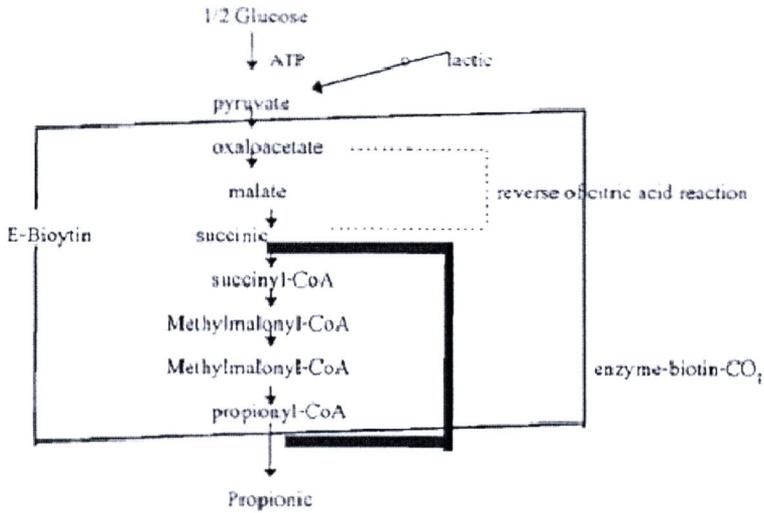
การเกิดก๊าซไฮโดรเจนจากไฟรูเวท หรือสารประกอบอินทรีย์อื่นๆ ไฮโดรเจนถูกผลิตในระหว่างการ cleavage ของไฟรูเวท ซึ่งเกิดขึ้นสมบูรณ์ได้โดยการเหนี่ยวนำของแสง ผลคือมีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจน และเกิดขึ้นในสภาวะไร้อากาศโดยวัฏจักรกรดซิตริก

4.5.3 กระบวนการโฟโตเมตาบอลิซึมในสภาวะไร้อากาศไร้แสง

เซลล์แบคทีเรียสังเคราะห์แสงสามารถเจริญได้ในสภาวะไร้อากาศไร้แสง วิธีของการใช้กรดเหมือนกับปฏิกิริยาในกระบวนการหมัก (fermentation) ของแบคทีเรียชนิดอื่น เช่น ใน Proionic acid bacteria (รูปที่ 2.13) การใช้ไฟรูเวทเป็นแหล่งคาร์บอนใน *R. rubrum* S1 ในสภาวะไร้อากาศไร้แสง ได้ผลิตภัณฑ์คือ CO_2 กรดอะซิติก และกรดโพรพิโอนิก โดยในช่วงแรกมีการสร้างกรดอะซิติก และกรดโพรพิโอนิกเป็นผลิตภัณฑ์หลัก การใช้ไฟรูเวทถูกยับยั้งเมื่อเซลล์เริ่มมีการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ในสภาวะมีอากาศไร้แสงสารตัวกลางที่เกิดจากการใช้ไฟรูเวท คือ dicarboxylic acid และมีการสร้างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซไฮโดรเจน กรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก กรดบิวทิริก และกรดคาโปรอิก ปริมาณ CO_2 ที่เกิดขึ้นในสภาวะนี้เกี่ยวข้องกับที่เกิดกรดอินทรีย์ต่างๆ มากกว่าการใช้ไฟรูเวทในสภาวะไร้อากาศไร้แสง *R. rubrum* ใช้กรดอินทรีย์ได้หลายชนิด เช่น กรดแลคติก กรดซัลซินิก ฟumaric มาลิก โดยใช้ได้อย่างรวดเร็ว ในสภาวะไร้อากาศมีแสง ในขณะที่ในสภาวะไร้อากาศไร้แสงใช้ได้ช้ากว่า แต่ถ้ามีการเติมตัวรับอิเล็กตรอนลงไปเช่น $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ ช่วยให้การใช้สารประกอบเหล่านั้นเร็วขึ้นเหมือนในสภาวะไร้อากาศมีแสง

เซลล์แบคทีเรียสังเคราะห์แสงเมื่อเจริญในสภาวะไร้อากาศไร้แสง พบว่าจะไม่มีสีหรือรงควัตถุ เนื่องจากแสงมีผลต่อการสร้าง pigment ภายในเซลล์



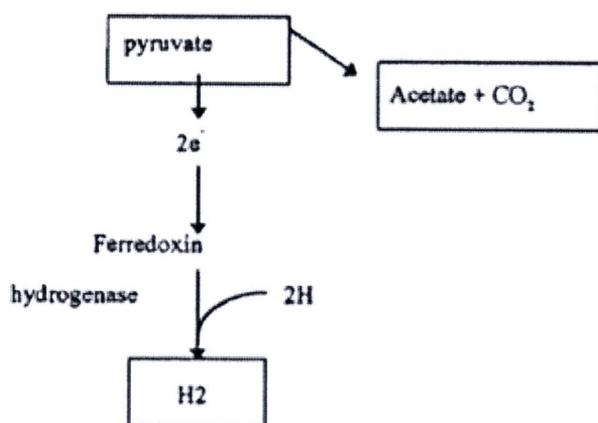
รูปที่ 2.13 กลไกการย่อยสลายสารอินทรีย์ ในสภาวะไร้อากาศไร้แสงที่เกิดขึ้นใน propionic acid bacteria

Rhodospirillum rubrum (F1) เมื่อเลี้ยงในสภาวะไร้อากาศไร้แสง โดยมี pyruvate เป็นแหล่งคาร์บอน เซลล์มีการรักษาสภาพความสมดุลของอิเล็กตรอน โดยการผลิตโพธิโอเนต ฟอร์เมต และก๊าซไฮโดรเจน ในระหว่างปฏิกิริยาการหมัก การผลิตก๊าซไฮโดรเจน แปรผกผันกลับกับการผลิตโพธิโอเนต

เมื่อเลี้ยงเซลล์โดยใช้ความหนาแน่นเซลล์ต่ำ เซลล์มีการผลิตก๊าซไฮโดรเจนในปริมาณมาก และมีโพธิโอเนตปริมาณเล็กน้อย แต่เมื่อเลี้ยงโดยใช้ความหนาแน่นเซลล์มากขึ้นหรือเซลล์ผ่านการพักตัวมาแล้ว จะมีการผลิตโพธิโอเนตมากกว่าก๊าซไฮโดรเจน

ระบบเอ็นไซม์ไนโตรจีเนสจะผลิตไฮโดรเจนในสภาวะไร้แสงขึ้นกับพลังงานเมื่อมีระดับพลังงานภายในเซลล์ต่ำมีการผลิตก๊าซไฮโดรเจน และในกระบวนการหมักสารประกอบอินทรีย์พบว่า ATP ถูกผลิตโดย substrate level phosphorylation โดยการขนส่งอิเล็กตรอนจากเฟอร์รีดอกซินไปยังไฮโดรเจนซึ่งถูก catalyst โดยเอ็นไซม์ไฮโดรจีเนส ซึ่งทำหน้าที่ช่วยในการเกิดไฮโดรเจน

ในการใช้ไพรูเวทเป็นแหล่งคาร์บอน พบว่า ฤทธิ์ชีวสได้มากกว่า Acetyl-CoA ทำให้เกิดมีอิเล็กตรอนเกิดขึ้นมาก อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นนี้นำไปใช้ในการผลิต end product และ ไฮโดรเจนได้ ดังรูปที่ 2.14



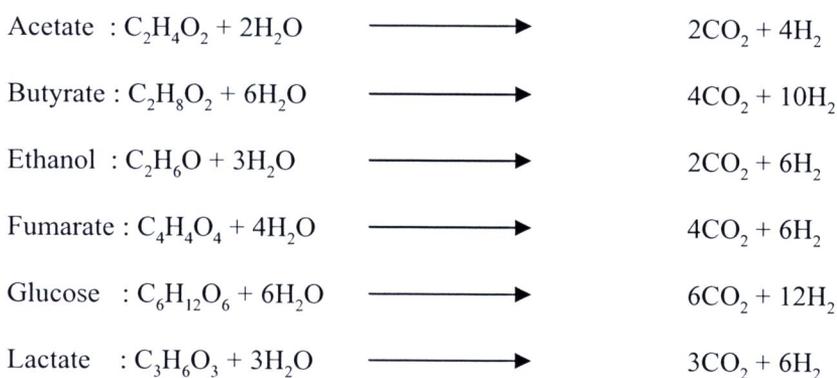
รูปที่ 2.14 การผลิตไฮโดรเจนจาก pyruvate

4.5.4 ประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงกรดอินทรีย์

การผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากสารประกอบอินทรีย์สามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้



ตัวอย่างสมการในการใช้กรดอินทรีย์ชนิดต่างๆ



ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงสับสเตรทเหล่านี้โดยแบคทีเรียสังเคราะห์แสง แสดงเป็นร้อยละ (%) ของค่าที่ได้จากทฤษฎีโดย % ในการเปลี่ยนแปลงกรดอินทรีย์คำนวณจากการใช้สับสเตรทและก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นเปรียบเทียบกับก๊าซไฮโดรเจนที่ได้จากสมการเคมีเป็น 100% ตามสมการ

$$\% \text{ ประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงกรดอินทรีย์} = 100 \times O/T$$

O = mole ของไฮโดรเจนที่ผลิตได้จากการทดลอง

T = mole ของไฮโดรเจนที่ผลิตได้จากสมการเคมี

พบว่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงกรดอินทรีย์จะอยู่ในช่วงร้อยละ 0-100 โดยสัดส่วนแต่ละชนิดมีประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงแตกต่างกันตามชนิดของแบคทีเรีย มีการรายงานว่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงกรดอินทรีย์มากกว่าร้อยละ 100 ใน *R.sphaeroides* โดยพบว่าการเกิดก๊าซไฮโดรเจนที่ได้มากนี้เกิดจากสารสะสมภายในเซลล์ ซึ่งปกติสามารถใช้เป็นสัดส่วนในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ และโดยใช้สารอินทรีย์หลายชนิดร่วมกัน พบว่า สามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้มากกว่าการใช้สารอินทรีย์ชนิดเดียว เช่น Methanol + Ethanol (1:1 by volume) และ Malate + Propionate (1:3 by weight) และ Butyrate + Acetate + Lactate (24:60:10) เป็นต้น

2.2 การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

ในการตัดสินใจเลือกที่จะลงทุนทำโครงการหรือทำเครื่องมืออุปกรณ์ใดๆ มักจะพิจารณาประเมินค่าทางเศรษฐศาสตร์ โดยพิจารณาจากผลตอบแทนที่ได้รับมากที่สุด หรือค่าใช้จ่ายต่ำสุด หรือระยะเวลาคืนทุนเร็วที่สุด วิธีการต่างๆ ที่นิยมใช้ในการประเมิน ได้แก่

- ระยะเวลาคืนทุน (Payback period)
- อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal rate of return)

2.2.1 ระยะเวลาคืนทุน (Payback period)

ระยะเวลาคืนทุน คือ ระยะเวลาที่ผลตอบแทนสุทธิสะสม จากการดำเนินงานมีค่าเท่ากับมูลค่าในการลงทุนทั้งหมด โครงการใดที่มีระยะเวลาลงทุนยิ่งสั้นยิ่งมีความต้องการสูง เนื่องจากสามารถนำเงินที่คืนทุนไปลงทุนในกิจการอื่นๆ ได้ ระยะเวลาคืนทุนที่นิยมใช้จะเป็นแบบวิธีระยะคืนทุนแบบง่าย (simple payback period) ซึ่งเป็นวิธีคิดง่าย ๆ โดยระยะเวลาคืนทุนสามารถคำนวณจาก

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน} = \frac{\text{มูลค่าในการลงทุนรวม}}{\text{ผลตอบแทนสุทธิสะสมรายปี}} \quad \dots (6)$$

2.2.2 อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal rate of return)

ค่าอัตราผลตอบแทนภายใน (Internal rate of return , IRR) คือ อัตราผลตอบแทนการลงทุน หรืออัตราส่วนลด (discount rate) ที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันของผลตอบแทนทั้งหมดมีค่าเท่ากับมูลค่าปัจจุบันของค่าใช้จ่ายทั้งหมดหรืออาจกล่าวได้ว่า อัตราผลตอบแทนภายใน คือ อัตราส่วนลดที่ทำให้มูลค่าเงินปัจจุบันสุทธินี้ได้จากค่าตอบแทนการลงทุนมีค่าเป็นศูนย์

นั่นคือ ค่า IRR คือค่า i ที่ทำให้ $NPV = 0$ นั่นคือ

$$NPV = \sum_{n=1}^N \frac{R_n - C_n}{(1+i)^n} - TIC = 0 \quad \dots(7)$$

เมื่อ

R_n = ผลตอบแทนในปีที่ n

C_n = ค่าใช้จ่ายในปีที่ n

N = ระยะเวลาโครงการ

TIC = เงินลงทุนทั้งหมด ณ เวลาปัจจุบัน

I = ผลตอบแทนภายในโครงการที่ให้ค่าผลตอบแทนภายในสูง จะเป็นโครงการที่ถูกเลือกไปใช้งาน

2.3 การประเมินผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อม

สำหรับการประเมินผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมจากการใช้เทคโนโลยีในการผลิตเชื้อเพลิง H_2 ด้วยชีวมวลนั้น ได้แบ่งออกเป็น

2.3.1 การประเมินปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Green House Gas: GHG)

โดยจะทำการประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่อหน่วยผลิตภัณฑ์จากกระบวนการผลิต (Industrial processes sector) ซึ่งเป็นวิธีการตาม IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (Revised 1996) ซึ่งจัดทำโดย IPCC (Intergovernmental Panel Climate Change) และใช้ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (emission factor) ตามค่าสัมประสิทธิ์กลาง (default value) ที่ IPCC กำหนดไว้โดยการประเมินการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกนั้นจะครอบคลุมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และนอนคาร์บอนไดออกไซด์ ได้แก่ ก๊าซมีเทน (CH_4) ก๊าซไนตรัสออกไซด์

(N₂O) ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และนอนมีเทนโวลาทิลส์ ออแกนิคาร์บอน (NMVOC) ดังนั้นการประเมินการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก ที่ปล่อยจากกระบวนการผลิตเป็น by-products จากการเปลี่ยนแปลงสภาพทางเคมีหรือทางกายภาพของวัตถุดิบไปเป็นผลิตภัณฑ์ ซึ่งจะไม่รวมถึงการใช้พลังงานในการผลิต ดังนั้นชนิดของก๊าซเรือนกระจกที่ปล่อยออกมาจะขึ้นอยู่กับลักษณะของกระบวนการผลิตนั้น เช่น วัตถุดิบที่ใช้ ปฏิริยาเคมี และประสิทธิภาพการผลิต ซึ่งมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญ

ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณประกอบด้วย

1. กระบวนการผลิตของแต่ละเทคโนโลยีในการผลิต H₂ จากชีวมวล
 2. Production output ปริมาณการผลิต
 3. Emission factors from the Revised 1996 IPCC Guidelines for National GHG Inventories
- และการประเมินก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญได้แก่

1. CO₂ Emission โดยจะสามารถทำการคำนวณหาปริมาณก๊าซ CO₂ ที่ปล่อยออกมาได้จากกระบวนการผลิต ตามสมการดังนี้

$$ECO_2 = A * (44/12) * C C_{fuel} * OF_{CO_2} \quad \dots(8)$$

เมื่อ ECO_2 = Emission of CO₂ (tone/yr)

A = activity rate (tone/yr)

C C_{fuel} = carbon content of fuel (kg_C/kg_{fuel})

OF_{CO₂} = Oxidation factor

นอกจากผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมที่มีการปล่อย CO₂ ยังสามารถคำนวณหาก๊าซเรือนกระจกอื่นๆ ได้ดังนี้

$$2. CH_4 \text{ Emissions} = (\text{Carbon released}) \times (\text{Emission ratio}) \times 16/12 \quad \dots(9)$$

$$3. CO \text{ Emission} = (\text{Carbon released}) \times (\text{Emission ratio}) \times 28/12 \quad \dots(10)$$

$$4. N_2O \text{ Emission} = (\text{Carbon released}) \times (N/C \text{ Ratio}) \times (\text{Emission ratio}) \times 44/28 \quad \dots(11)$$

$$5. NO_x \text{ Emission} = (\text{Carbon released}) \times (N/C \text{ Ratio}) \times (\text{Emission ratio}) \times 46/14 \quad \dots(12)$$

ตารางที่ 2.2 Default Non-CO₂ Emission Factor for Charcoal Production (in kg/TJ)

Compound	Default Emission Factor (kg/TJ of Wood Input) (*)	Default Emission Factor (kg/TJ of Charcoal Produced)
CH ₄	300	1000
N ₂ O	NAV	NAV
NO _x	5	10
CO	2000	7000
NMVOOC	600	1700
SO ₂	NAV	NAV

(*) สมมติให้ Wood 6 kg จะ ได้ Charcoal 1 kg และ Energy content ของ Wood 15 MJ/kg จะ ได้ค่า Energy content ของ Charcoal 30 MJ/kg และในการ input Wood 3TJ จะเท่ากับ Charcoal 1 TJ

2.3.2.2 การประเมินผลกระทบต่อภาวะโลกร้อน (Global Warming)

การประเมินผลกระทบต่อภาวะโลกร้อน (Global Warming Potential) คือ ค่าศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน แยกตามก๊าซเรือนกระจกชนิดต่างๆ โดยค่านี้เทียบกับ CO₂ ซึ่งให้ค่าเท่ากับ 1 และมีสมการดังต่อไปนี้

$$\text{GWP (Impact score)} = \text{Characterization factor} \times \text{Inventory value}$$

โดย

Characterization factor คือ ค่าของผลกระทบในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน ของก๊าซเรือนกระจกเทียบกับ CO₂ แสดงดังตารางที่ 2.2

Inventory value คือ ปริมาณของก๊าซเรือนกระจกที่ได้จากกิจกรรม

ตารางที่ 2.3 ค่าของผลกระทบในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน ของก๊าซเรือนกระจกเทียบกับ CO₂

Gas name	Chemical formula	Lifetime (years)	Global warming potential (GWP) for given time horizon		
			20-yr	100-yr	500-yr
Carbon dioxide	CO ₂	variable	1	1	1
Methane	CH ₄	12	72	25	8
Nitrous oxide	N ₂ O	114	289	298	153
CFC-12	CCl ₂ F ₂	100	11,000	10,900	5,200
HCFC-22	CHClF ₂	12	5,160	1,810	549
Tetrafluoromethane	CF ₄	50,000	5,210	7,390	11,200
Hexafluoroethane	C ₂ F ₆	10,000	8,630	12,200	18,200
Sulphur hexafluoride	SF ₆	3,200	16,300	22,800	32,600
Nitrogen trifluoride	NF ₃	740	12,300	17,200	20,700

ที่มา: Climate Change 1995, The Science of Climate Change: Summary for Policymakers and Technical Summary of the Working Group I Report, page 22.

2.4 Decision Making Process (กระบวนการตัดสินใจ)

Decision Making เป็นการศึกษาถึงทางเลือกที่ได้ถูกวิเคราะห์ออกมาให้อยู่ในรูปแบบของค่าที่วัดได้ หรือออกมาเป็นตัวเลข หรือทางเลือกนั้นอาจวิเคราะห์ข้อมูลในรูปแบบที่วัดความพึงพอใจของผู้ตัดสินใจ การตัดสินใจเป็นการพิจารณาถึงทางเลือกที่มีให้เลือกได้หลายทาง แต่เราจะต้องเลือกทางเลือกที่ดีที่สุดหรือเหมาะสมที่สุดต่อวัตถุประสงค์ เป้าหมาย ความต้องการของผู้ตัดสินใจ

กระบวนการตัดสินใจตามแนวคิดของ Stephen P. Robbins ด้วยขั้นตอนสำคัญ 8 ขั้นตอน ประกอบด้วย

ขั้นตอนที่ 1. การระบุปัญหา (Identifying a problem)

ขั้นตอนที่ 2 การกำหนดเกณฑ์ในการตัดสินใจ (Identifying Decision Criteria) โดยพิจารณาจากประเด็นที่สัมพันธ์กับสิ่งที่จะต้องตัดสินใจ

ขั้นตอนที่ 3 กำหนดค่าน้ำหนักให้กับเกณฑ์ชีวิตที่จะนำมาใช้ (Allocating Weight to the Criteria) เนื่องจาก เกณฑ์ชีวิตแต่ละตัวอาจมีความสำคัญแตกต่างกัน

ขั้นตอนที่ 4 การพัฒนาทางเลือก (Developing Alternatives) โดยการระบุทางเลือกต่าง ๆ ที่สามารถนำมาแก้ไขปัญหาได้

ขั้นตอนที่ 5 การวิเคราะห์ทางเลือก (Analyzing Alternatives) โดยการวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบหาจุดแข็ง(strength) จุดอ่อน (weakness) ของแต่ละทางเลือก

ขั้นตอนที่ 6 การเลือกทางเลือกที่ดีที่สุด (Selecting an Alternatives)

ขั้นตอนที่ 7 การดำเนินการตามทางเลือกที่ได้ตัดสินใจเลือกแล้ว (Implement the Alternatives)

ขั้นตอนที่ 8 ประเมินผลของการตัดสินใจ (Evaluating Decision Effective) ว่าสามารถแก้ไขปัญหาได้หรือไม่

2.5 กระบวนการจัดลำดับเชิงวิเคราะห์ (Analytic Hierarchy Process: AHP)

กระบวนการจัดลำดับเชิงวิเคราะห์ หรือ AHP เป็นเครื่องมือในการแก้ไขปัญหาและการตัดสินใจโดยพิจารณาจากหลายปัจจัยที่นิยมใช้กันมากในการตัดสินใจด้านต่างๆ เนื่องจากเป็นวิธีการที่มีโครงสร้างของปัญหาที่ต้องใช้กระบวนการตัดสินใจชัดเจนตั้งแต่วัตถุประสงค์หลักเกณฑ์หลัก หลักเกณฑ์รอง ตลอดจนทางเลือกที่มีอยู่ ค่าถ่วงน้ำหนักคำนวณจากผลรวมของหลักเกณฑ์ของเมตริกซ์ที่สร้างขึ้นจากการเปรียบเทียบหลักเกณฑ์ที่ละคู่ก่อนที่จะนำไปคำนวณค่าคะแนนความเหมาะสมของแต่ละทางเลือกต่อไป

AHP ได้ถูกพัฒนาขึ้นเมื่อปี ค.ศ. 1980 โดย Thomas Saaty และเป็นทฤษฎีที่นิยมใช้ในการตัดสินใจอย่างแพร่หลายจนถึงปัจจุบัน AHP มีจุดเด่นที่สำคัญจนได้รับความนิยมในการนำไปใช้ประโยชน์ คือเป็นกระบวนการตัดสินใจที่มีประสิทธิภาพและสามารถนำไปใช้กับการตัดสินใจที่มีความยุ่งยากซับซ้อนได้ (Chen, 2006) AHP จะแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็นระดับชั้น คือ เป้าหมาย หลักเกณฑ์หลัก หลักเกณฑ์ย่อย และทางเลือก จากนั้นให้วิเคราะห์เปรียบเทียบเกณฑ์หรือทางเลือกที่ละคู่โดยให้ความสำคัญตามตาราง ระดับความสำคัญหรือความชอบ และคำนวณหาลำดับความสำคัญของแต่ละชั้น

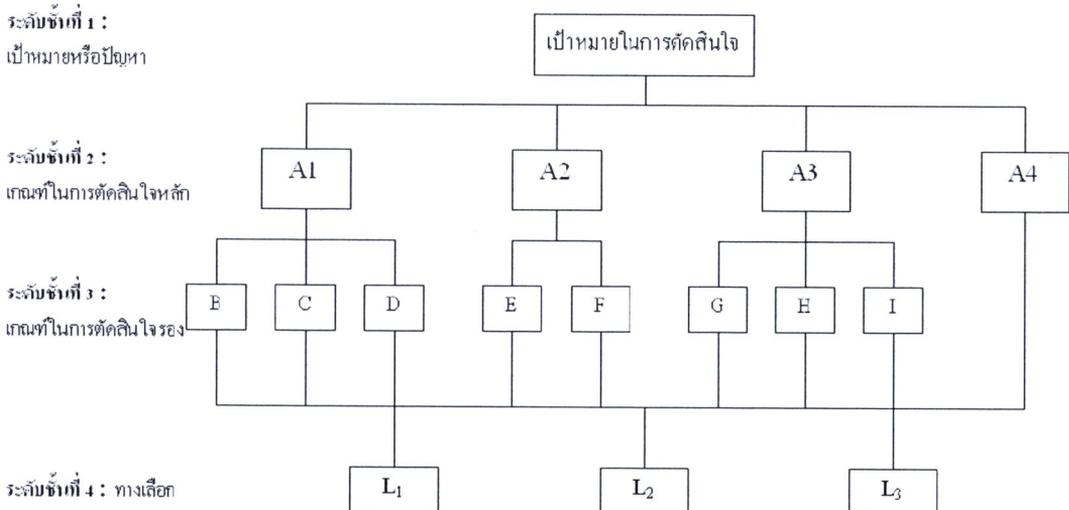
1) ขั้นตอนดำเนินการ AHP

ขั้นตอนของการดำเนินการ AHP สรุปได้ 4 ขั้นตอน ดังนี้

ก. การสลายปัญหาที่ซับซ้อน (Decomposition) ให้อยู่ในรูปของแผนภูมิโครงสร้างเป็นลำดับชั้น (Hierarchy structure) แต่ละระดับชั้นประกอบด้วยเกณฑ์ในการตัดสินใจที่เกี่ยวข้องกับปัญหานั้นๆ ได้แก่

- ระดับชั้นบนสุด คือ เป้าหมายหรือปัญหาที่ต้องการตัดสินใจ
- ระดับชั้นที่ 2 คือ เกณฑ์หลัก (Criteria)
- ระดับชั้นที่ 3 คือ เกณฑ์ย่อย (Sub-Criteria)
- ระดับชั้นสุดท้าย คือ ทางเลือก (Alternative)

โดยในแต่ละชั้นอาจมีหลายเกณฑ์ และในแต่ละเกณฑ์อาจมีหลายเกณฑ์ย่อยได้ตัวอย่างแผนภูมิโครงสร้างลำดับชั้น AHP แสดงดังรูป



รูปที่ 2.15 แผนภูมิโครงสร้างลำดับชั้น AHP

ข. การคำนวณลำดับความสำคัญ (Prioritization) ในแต่ละระดับชั้นให้พิจารณาเปรียบเทียบความสำคัญของเกณฑ์ต่างๆในระดับชั้นเดียวกัน โดยการวิเคราะห์เปรียบเทียบเกณฑ์หรือทางเลือกหลักเกณฑ์เป็นคู่ (Pairwise Comparison) จากปัจจัยที่มีผลกระทบต่อเกณฑ์การ

ตัดสินใจในแต่ละระดับชั้นโครงสร้างโดยใช้วิธี Principle of Hierarchy Composition ตามตารางระดับความสำคัญหรือความชอบ แสดงในตารางที่ 2.4

ค. การสังเคราะห์แผนภูมิตะดับชั้น (Synthesis) เพื่อให้ได้ลำดับความสำคัญรวมของทางเลือกซึ่งเป็นระดับชั้นล่างสุดของแผนภูมิเกิดขึ้นจากการนำเอาผลการวินิจฉัยเปรียบเทียบเป็นคู่ๆ ของทุกๆ ปัจจัยในตารางเมตริกซ์มาสังเคราะห์

ง. การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของทางเลือกที่มีต่อหลักเกณฑ์ในการวินิจฉัย (Sensitivity analysis)

กระทำเพื่อตรวจสอบความีหลักเกณฑ์ใดหลักเกณฑ์หนึ่งเกิดการเปลี่ยนแปลงในระดับ 0 – 1 แล้วจะมีผลทำให้ลำดับความสำคัญของทางเลือกเกิดการเปลี่ยนแปลงหรือไม่

ตารางที่ 2.4 ตารางระดับความสำคัญ

ระดับความสำคัญ หรือความชอบ (Preference Level)	ค่าแสดงเป็นตัวเลข (Numerical Value)
เท่ากัน (Equally Preferred)	1
เท่ากันถึงปานกลาง (Equally to Moderately Preferred)	2
ปานกลาง (Moderately Preferred)	3
ปานกลางถึงค่อนข้างมาก (Moderately to Strongly Preferred)	4
ค่อนข้างมาก (Strongly Preferred)	5
ค่อนข้างมากถึงมากกว่า (Strongly to Very Strongly Preferred)	6
มากกว่า (Very Strongly Preferred)	7
มากกว่าถึงมากที่สุด (Very Strongly to Extremely Preferred)	8
มากที่สุด (Extremely Preferred)	9

2) กระบวนการวิเคราะห์ของ AHP

ก. การวิเคราะห์เมตริกซ์

รูปแบบเมตริกซ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ เปรียบเทียบหลักเกณฑ์เป็นคู่ ดังแสดงในตารางที่ 2.4

$$\begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots\dots a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \dots\dots a_{2n} \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \dots\dots 1 \end{bmatrix}$$

ตารางที่ 2.5 ตารางเมตริกซ์ที่ใช้ในการเปรียบเทียบหลักเกณฑ์เป็นคู่

เป้าหมายการตัดสินใจ	หลักเกณฑ์		
	A ₁	A ₂	A _n
		→	
A ₁	1	4	
A ₂	¼	1	
↓			1
A _n			1

จากตารางที่ 2.5 ภายใต้อเป้าหมายการตัดสินใจ หลักเกณฑ์ A₁ ในแถวซ้ายมือบนสุดจะถูกเปรียบเทียบกับหลักเกณฑ์ A₂ ถึง A_n ในแถวบนของ A₁ การเปรียบเทียบการดำเนินการเช่นเดียวกันในแถวบนที่ 2 ในการเปรียบเทียบนั้นผู้ตัดสินใจจะเกิดคำถามว่าหลักเกณฑ์ที่มีความสำคัญหรือมีอิทธิพลมากกว่าหลักเกณฑ์อื่นที่ถูกนำมาเปรียบเทียบในระดับไหน

การกำหนดประโยคคำถามนั้นเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง คำถามจะต้องสะท้อนถึงความสัมพันธ์ที่เหมาะสมระหว่างหลักเกณฑ์ต่างๆ ในระดับชั้นที่อยู่ภายใต้หลักเกณฑ์ที่อยู่ถัดขึ้นไป AHP จะให้ตัวเลข 1 ถึง 9 แทนคำพูดของการเปรียบเทียบ ตัวเลข 1 ถึง 9 นี้ แสดงมาตราส่วนวัดระดับความแตกต่างระหว่าง 2 หลักเกณฑ์ที่ถูกเปรียบเทียบในด้านความพึงพอใจอันเกิดจากความชำนาญและประสบการณ์ภายใต้กรอบของเหตุผลโดยไม่เกิดความลำเอียง

เมื่อหลักเกณฑ์แต่ละอันเปรียบเทียบกับตัวเองในตารางเมตริกซ์ ตัวอย่างเช่น A_1 เทียบกับ A_1 ค่าที่ได้จะเท่ากับ 1 ในตารางเมตริกซ์ เส้นทแยงมุมประกอบด้วยตัวเลข 1 เท่านั้นเพราะเป็นจุดที่หลักเกณฑ์แต่ละตัวเปรียบเทียบกับตัวเอง ส่วนพื้นที่ที่อยู่เหนือเส้นทแยงมุมจะเป็นตัวเปรียบเทียบระหว่างหลักเกณฑ์ 2 หลักเกณฑ์ ส่วนพื้นที่ที่อยู่ใต้เส้นทแยงมุมจะเป็นค่าส่วนกลับของค่าที่อยู่เหนือเส้นทแยงมุม ถ้าเปรียบเทียบระหว่าง A_1 กับ A_2 ค่าเท่ากับ 4 แสดงถึงหลักเกณฑ์ A_1 ให้น้ำหนักความสำคัญเทียบกับ A_2 เท่ากับ 4 เท่า แต่ถ้าเปรียบเทียบ A_2 กับ A_1 จะได้ $1/4$ เป็นต้น

ข. การวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยทางเรขาคณิต

ค่าเฉลี่ยเรขาคณิตเกิดจากการนำเอาตัวเลขที่ต้องการหาค่าเฉลี่ยมาคูณกัน แล้วนำเอาผลคูณนั้นมาถอดรากตามจำนวนตัวเลขนั้น ดังสมการที่ 1

$$V_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}} \quad \dots(1)$$

เมื่อ a_{ij} = ค่าตัวเลขในตารางเมตริกซ์

V_i = ค่าเฉลี่ยทางเรขาคณิต

n = จำนวนตัวเลขที่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ค. การวิเคราะห์ค่าน้ำหนักคะแนนทางเลือก

การวิเคราะห์ค่าน้ำหนักคะแนนของแต่ละรูปแบบทางเลือกนั้นเกิดจากการสังเคราะห์ข้อมูลของแต่ละรูปแบบทางเลือก โดยผลรวมของน้ำหนักคะแนนจะมีค่าเท่ากับ 1 ดังสมการที่ 2

$$W_i = \frac{V_i}{\sum_{i=1}^n V_i} \quad \dots(2)$$

และ $\sum W_i = 1.0$

เมื่อ W_i = น้ำหนักคะแนนของแต่ละหลักเกณฑ์

V_i = ค่าเฉลี่ยทางเรขาคณิต

n = จำนวนตัวเลขที่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ง. การวิเคราะห์ความสอดคล้อง

วิธีการคำนวณความสอดคล้องกันของเหตุผลการให้คะแนนในการเปรียบเทียบหลักเกณฑ์ที่ระบุของหลักเกณฑ์ทั้งหมดที่ถูกกำหนดโดยนำผลรวมของค่าวินิจฉัยของแต่ละหลักเกณฑ์ในแถวตั้งแต่แถวมาคูณด้วยผลรวมของค่าเฉลี่ยในแถวนอนแต่ละแถวแล้วนำผลคูณที่ได้มารวมกันผลลัพธ์จะเท่ากับจำนวนหลักเกณฑ์ทั้งหมดที่ถูกนำมาเปรียบเทียบ ผลรวมนี้เรียกว่า Eigen Values สูงสุด (λ_{\max})

ถ้าตารางเมตริกซ์มีความสอดคล้องกันของเหตุผลสมบูรณ์ 100%

$$\lambda_{\max} = \text{จำนวนหลักเกณฑ์ที่ถูกนำมาเปรียบเทียบ } (n)$$

ถ้าตารางเมตริกซ์มีความไม่สอดคล้องกัน

$$\lambda_{\max} > \text{จำนวนหลักเกณฑ์ที่ถูกนำมาเปรียบเทียบ}$$

ดัชนีความสอดคล้อง (Consistency Index: CI)

$$CI = \frac{(\lambda_{\max} - n)}{(n - 1)} \quad \dots(3)$$

เมื่อ $n =$ จำนวนหลักเกณฑ์

อัตราส่วนความสอดคล้อง (Consistency Index: CR)

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad \dots(4)$$

ค่า $CR < 0.1$ จะยอมรับ

ค่า RI ได้มาจากการทดลองโดยการสุ่มตัวอย่างจากตารางเมตริกซ์จำนวน 64,000 ตัวอย่าง โดย แสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ค่า RI จากการสุ่มตัวอย่าง (วิฑูรย์ ต้นศิริคงคล, 2542 อ้างถึง Saaty, 1980)

ขนาดของตารางเมตริกซ์ (N)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ค่า RI	0	0	0.52	0.89	1.11	1.25	1.32	1.41	1.46	1.49

จ. การวิเคราะห์ลำดับความสำคัญ

ในการวิเคราะห์ลำดับชั้นความสำคัญของปัจจัยที่ทำการเปรียบเทียบมีขั้นตอนต่างๆ ดังต่อไปนี้

- หาผลรวมของตัวเลขในแถวตั้งของแต่ละแถวของตารางเมตริกซ์
- นำตัวเลขแต่ละช่องของแถวตั้งแต่ละแถวหารด้วยผลรวมของตัวเลขในแถวตั้งนั้น เพื่อให้ได้ตารางเมตริกซ์ของค่าเฉลี่ยซึ่งจะเป็นนัยสำคัญที่ใช้เปรียบเทียบระหว่างปัจจัยต่างๆ
- หาค่าเฉลี่ยของตัวเลขในแถวนอนแต่ละแถวโดยนำเอาผลรวมของตัวเลขทั้งหมดในแต่ละแถวมาหารด้วยตัวเลขที่มีอยู่ในแถวนอนนั้นๆ

ฉ. การหาน้ำหนักคะแนนรวมของทั้งแผนภูมิแสดง

$$S_i^j = RW_2 * RW_3 * W_i^j \quad \dots(5)$$

เมื่อ S_i^j = น้ำหนักคะแนนรวมของทั้งแผนภูมิ

RW_2 = น้ำหนักความสำคัญของหลักเกณฑ์ในแผนภูมิโครงสร้างชั้นที่ 2

RW_3 = น้ำหนักความสำคัญของหลักเกณฑ์ในแผนภูมิโครงสร้างชั้นที่ 3

W_i^j = น้ำหนักความสำคัญของรูปแบบทางเลือกที่ i จากการประเมินภายใต้

หลักเกณฑ์ j