

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง



2.1 ไฮโดรเจน (Midilli และคณะ, 2005)

ไฮโดรเจนเป็นธาตุเคมี ที่อุณหภูมิต่ำและความดันมาตรฐานเป็นก๊าซที่โมเลกุลมี 2 อะตอม ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ติดไฟง่าย ไม่เป็นโลหะ ไฮโดรเจนเป็นธาตุที่เบาที่สุด และมีปรากฏในจักรวาลมากที่สุด มีอยู่ในน้ำ ในสารประกอบอินทรีย์ทุกตัว และสิ่งมีชีวิตทุกชนิด นอกจากนี้ยังใช้ในการผลิตแอมโมเนีย ใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทน และเป็นพลังงานของเซลล์เชื้อเพลิง ไฮโดรเจนที่ใช้ในการค้าได้มาจากการย่อยก๊าซธรรมชาติ การแยกน้ำด้วยไฟฟ้า ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายแต่สิ้นเปลือง ปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์กำลังวิจัยเกี่ยวกับวิธีใหม่ ๆ ในการผลิตไฮโดรเจน เช่น การใช้สาหร่ายเขียว การใช้ผลิตภัณฑ์จากชีวมวล เป็นต้น

2.1.1 พลังงานจากไฮโดรเจน

ไฮโดรเจนเป็นก๊าซที่สามารถมีบทบาทสำคัญในด้านพลังงานในอนาคต ปัจจัยที่สำคัญที่สุดในการกำหนดบทบาทเฉพาะของไฮโดรเจนคือความต้องการพลังงาน คาดกันว่าไฮโดรเจนจะเป็นสิ่งที่มาทดแทนน้ำมันปิโตรเลียม และกลายเป็นแหล่งพลังงานของยานยนต์ในอนาคต

ปัจจุบันมีการผลิตไฮโดรเจนทั่วโลก 500,000 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ประมาณ 99% ผลิตจากซากฟอสซิลโดยการแปรรูปจากก๊าซธรรมชาติเป็นหลัก แต่ก็สามารถผลิตไฮโดรเจนด้วยวิธีการแบบอื่น และจากแหล่งพลังงานอื่น ๆ โดยแหล่งพลังงานหมุนเวียน เช่น พลังงานจากน้ำ แสงอาทิตย์ ลม ความร้อนจากใต้พื้นโลก คลื่นทะเล และของแข็งเสีย เป็นต้น นั้นสามารถนำมาใช้ผลิตไฮโดรเจนจากไฮโดรคาร์บอนและหรือน้ำ ยกตัวอย่างเช่น สามารถผลิตไฮโดรเจน 108.7 กิโลกรัมจากน้ำ 1 ลูกบาศก์เมตร โดยวิธีการแยกน้ำด้วยไฟฟ้า และสามารถให้พลังงานได้เทียบเท่ากับน้ำมัน 422 ลิตร ซึ่งไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตไฮโดรเจนนี้อาจได้จากซากฟอสซิลหรือแหล่งพลังงานหมุนเวียนก็ได้ นอกจากนี้ไฮโดรเจนยังสามารถผลิตได้จากการหมักทางชีวภาพซึ่งมีประโยชน์ทั้งในแง่ของการให้พลังงานและบำบัดของเสียได้หลากหลายชนิด เช่น ของเสียชุมชน, น้ำเสียจากกระบวนการแปรรูปอาหาร และโรงงานน้ำตาล เป็นต้น

ตารางที่ 2.1 และ 2.2 แสดงคุณสมบัติของเชื้อเพลิงไฮโดรเจน และการเปรียบเทียบคุณสมบัติสำคัญของเชื้อเพลิงไฮโดรเจนและเชื้อเพลิงชนิดอื่น ๆ ตามลำดับ

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของไฮโดรเจนในการเป็นเชื้อเพลิง (Midilli และคณะ, 2005)

คุณสมบัติ	หน่วย	ค่า
ความหนาแน่น	kg/m ³	0.0838
Higher heating value และ Lower heating value	MJ/kg (ของเหลว)	141.9-119.90
Higher heating value และ Lower heating value	MJ/m ³ (ปริมาตร)	11.89-10.05
จุดเดือด	K	20.41
จุดเยือกแข็ง	K	13.97
ความหนาแน่น (ของเหลว)	kg/m ³	70.8
สัมประสิทธิ์การแพร่ในอากาศ	cm ² /s	0.61
ความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่	kJ/kg K	14.89
ขีดจำกัดการเผาไหม้ในอากาศ	% (ปริมาตร)	4-75
พลังงานการเผาไหม้ในอากาศ	millijoule	0.02
อุณหภูมิการเผาไหม้	K	585
อุณหภูมิเปลวไฟในอากาศ	K	2318
พลังงานการระเบิด	kJ/g TNT	58.823
การปล่อยรังสีจากเปลวไฟ	%	17-25
Stoichiometric mixture in air	%	29.53
Stoichiometric air/fuel	kg/kg	34.3/1
ความเร็วของเปลวไฟ	cm/s	2.75
Motivity factor (อัตราส่วน พลังงานขับเคลื่อนที่ผลิตได้ของ เชื้อเพลิงต่อพลังงานขับเคลื่อนที่ ผลิตได้ของไฮโดรเจน)		1.00

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติสำคัญของไฮโดรเจนกับเชื้อเพลิงชนิดอื่น ๆ (Midilli และคณะ, 2005)

ชนิดเชื้อเพลิง	พลังงานต่อมวล (J/kg)	พลังงานต่อปริมาตร (J/m ³)	Motivity factor	คาร์บอนที่ได้จาก การเผาไหม้ (kg C/kg fuel)
ไฮโดรเจนเหลว	141.90	10.10	1.00	0.00
ก๊าซไฮโดรเจน	141.90	0.013	1.00	0.00
น้ำมันเชื้อเพลิง	45.50	38.65	0.78	0.84
ก๊าซโซลีน	47.40	34.85	0.76	0.86
น้ำมันเครื่องบินไอพ่น	46.50	35.30	0.75	-
LPG	48.80	24.40	0.62	-
LNG	50.00	23.00	0.61	-
เมทานอล	22.30	18.10	0.23	0.50
เอทานอล	29.90	23.60	0.37	0.50
ไบโอดีเซล	37.00	33.00	-	0.50
ก๊าซธรรมชาติ	50.00	0.04	0.75	0.46
ถ่าน	30.00	-	-	0.50

สำหรับในประเทศไทยมีการผลิตก๊าซไฮโดรเจนซึ่งเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเลียมและปิโตรเคมี โดยโรงงานบางแห่งใช้ก๊าซไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตไอน้ำ แต่ปริมาณที่ใช้ยังมีน้อยมาก การใช้ก๊าซไฮโดรเจนเพื่อผลิตพลังงาน คิดเป็นปริมาณ เท่ากับ 600 ตัน เทียบเท่ากับน้ำมันดิบ เพิ่มขึ้นจากปี 2545 คิดเป็นร้อยละ 42.9 (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2546)

2.1.2 ประวัติการพัฒนาพลังงานจากไฮโดรเจน

ไฮโดรเจนมาจากภาษากรีก คำว่า “hydro” แปลว่า “น้ำ” และ “genes” แปลว่า “สิ่งที่ให้กำเนิด” ไฮโดรเจนเป็นธาตุอันดับแรกในตารางธาตุที่ซับซ้อนน้อยที่สุด และมีมากที่สุดในจักรวาล

น้ำบนพื้นผิวโลกซึ่งมีมากกว่า 60 % นั้นมีไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบหลัก ไฮโดรเจนปรากฏอยู่ในรูปแบบต่าง ๆ ในพืช สัตว์ มนุษย์ เชื้อเพลิงฟอสซิล และสารประกอบทางเคมีอื่น ๆ

ประวัติความเป็นมาไฮโดรเจนถูกใช้ประโยชน์ครั้งแรกในการบรรจุในบอลลูน ก๊าซไฮโดรเจนเป็นก๊าซที่เบากว่าอากาศและเบาที่สุด มนุษย์เราจึงพยายามนำไฮโดรเจนมาใช้ประโยชน์ โดยนำไฮโดรเจนมาใส่ไว้ในบอลลูนและใส่ไว้ในเรือเหาะ แต่แล้วโศกนาฏกรรมเรือเหาะฮินเดนเบิร์ก ที่ระเบิดกลางอากาศก็ทำให้ไม่มีใครอยากนำไฮโดรเจนมาใช้ แต่ปัจจุบันนี้ความสนใจในการนำไฮโดรเจนมาใช้ประโยชน์นั้นหวนกลับมาอีกครั้ง นั่นคือการใช้ไฮโดรเจนเป็นแหล่งพลังงานสะอาด ด้วยสมบัติของไฮโดรเจนที่ว่าเมื่อเผาไฮโดรเจนกับอากาศจะเกิดน้ำ ทำให้นักวิทยาศาสตร์ยุคปัจจุบันสนใจ เพราะไฮโดรเจนจะเป็นเชื้อเพลิงสะอาดที่ใช้ในรถยนต์ หรือในเซลล์เชื้อเพลิงแทนที่จะต้องขุดพลังงานจากฟอสซิลขึ้นมาใช้เหมือนอย่างที่เป็นอยู่ทุกวันนี้

ในคริสต์ศตวรรษที่ 20 มีการใช้ไฮโดรเจนอย่างแพร่หลายในการผลิตแอมโมเนีย เมทานอล ก๊าซโซลีน และน้ำมันที่ให้ความร้อน รวมทั้งสินค้าที่ต้องใช้เป็นประจำ เช่น ปุ๋ย แก้ว โลหะบริสุทธิ์ วิตามิน เครื่องสำอาง วงจรเซมิคอนดักเตอร์ น้ำมันหล่อลื่น น้ำยาทำความสะอาด เนยเทียม และเชื้อเพลิงจรวด ภายหลังปี 1974 มีการศึกษามากมายเพื่อตรวจสอบการใช้ประโยชน์และส่งเสริมศักยภาพของไฮโดรเจนให้เป็นแหล่งพลังงาน ต่อมาในภาคอุตสาหกรรมทั่วโลกมีการตื่นตัวในการพัฒนาและผลิตไฮโดรเจน ยานพาหนะพลังงานไฮโดรเจน เซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน และเทคโนโลยีที่ใช้ไฮโดรเจนอื่น ๆ ตารางที่ 2.3 แสดงประวัติศาสตร์การพัฒนาเกี่ยวกับไฮโดรเจน

ตารางที่ 2.3 ประวัติศาสตร์การพัฒนาเกี่ยวกับไฮโดรเจน (Midilli และคณะ, 2005)

ช่วงเวลา	นักวิทยาศาสตร์	นำเสนอ
ศตวรรษที่ 16	Paracelsus	คุณสมบัติของไฮโดรเจน เช่น สมบัติการเผาไหม้
ศตวรรษที่ 16	Van Helmot	ระบุคุณสมบัติของก๊าซไฮโดรเจน
ศตวรรษที่ 17	Robert Boyle	ผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ขณะที่ทำการทดลองกับเหล็กและกรด
ศตวรรษที่ 18	Henry Cavendish	รู้จักไฮโดรเจนเป็นครั้งแรกในลักษณะของธาตุจำเพาะ
ศตวรรษที่ 18	Lavoisier	ตั้งชื่อไฮโดรเจน
ศตวรรษที่ 19	ไม่ระบุชื่อ	พัฒนาแนวความคิดที่ว่าสามารถนำไฮโดรเจนมาใช้เป็นพลังงานที่ส่งเสริมการใช้แหล่งพลังงานหมุนเวียน
ศตวรรษที่ 19	Carl Bosh	ใช้ไฮโดรเจนในการผลิตปุ๋ย
ศตวรรษที่ 20	Kordesch	ใช้ไฮโดรเจนในยานพาหนะ
ศตวรรษที่ 20	T.N. Veziroglu	มีการจัดการประชุมสัมมนาในหัวข้อพลังงานไฮโดรเจนนำไปสู่การขยายตัวในการศึกษาและใช้ประโยชน์จากพลังงานไฮโดรเจนทั่วโลก

2.1.3 ข้อดีข้อเสียของพลังงานจากไฮโดรเจน

ข้อดี

- ไฮโดรเจนเป็นแหล่งพลังงานที่สะอาดปราศจากสารพิษซึ่งให้พลังงานจำเพาะต่อมวลสูง กล่าวคือ พลังงานที่ได้จากไฮโดรเจน 9.5 กิโลกรัมเทียบเท่ากับค่าพลังงานที่ได้จากน้ำมันเบนซิน 25 กิโลกรัม
- กระบวนการผลิตไฮโดรเจนมีอยู่หลายแบบ รวมกระบวนการที่ได้ไฮโดรเจนมาจากน้ำมันปิโตรเลียม ยกตัวอย่างเช่น การเปลี่ยนรูปของก๊าซธรรมชาติหรือไฮโดรคาร์บอนเบาอื่น ๆ ก๊าซที่ได้จากถ่านหิน และไฮโดรคาร์บอนหนักอื่น ๆ นอกจากนี้ไฮโดรเจนยังเกิดมาจากการแยกน้ำด้วยไฟฟ้า การแยกทาง thermochemical ทั้งทางตรงและทางอ้อม และกระบวนการที่เกิดขึ้นโดยตรงจากแสงอาทิตย์

- ไฮโดรเจนสามารถขนส่งผ่านทางเส้นท่อได้อย่างปลอดภัย
- มีการใช้ประโยชน์อย่างมากจากก๊าซไฮโดรเจน อาทิเช่น ใช้เป็นสารเคมีในกระบวนการปิโตรเคมี อุตสาหกรรมอาหาร โลหะที่มีเหล็กและไม่มีเหล็ก การสังเคราะห์สารเคมี และโพลีเมอร์ อุตสาหกรรมการผลิตโลหะ และเป็นระบบพลังงานที่สะอาดและยั่งยืน
- การเผาไหม้ไฮโดรเจนไม่ทำให้เกิดสารพิษออกมา เว้นแต่ที่บางสัดส่วนการเผาไหม้ ที่อุณหภูมิเปลวไฟสูงอาจทำให้เกิดระดับ NO_x ที่ปล่อยออกมาสูงตามไปด้วย
- สามารถผลิตไฮโดรเจนได้จากหลาย ๆ แหล่งพลังงาน รวมไปถึงแหล่งพลังงานหมุนเวียนด้วย
- พลังงานไฮโดรเจนสามารถเก็บไว้ได้นานกว่าพลังงานไฟฟ้า
- ทุกส่วนของระบบเศรษฐศาสตร์มีการใช้ประโยชน์จากไฮโดรเจน เช่น เป็นเชื้อเพลิงยานยนต์ และ ผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง

ข้อเสีย

- ก๊าซไฮโดรเจนปริมาณน้อยสามารถเผาไหม้ได้เมื่อปนอยู่ในอากาศ ดังนั้นจึงต้องคำนึงถึงด้านความปลอดภัย
- การเก็บไฮโดรเจนในรูปของของเหลวทำได้ยาก เนื่องจากต้องใช้อุณหภูมิที่ต่ำมากในการทำไฮโดรเจนเหลว

2.2 การบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ (มันลิน ตันจตุเวศม์, 2542)

กระบวนการย่อยสลายทางชีววิทยาแบบไม่ใช้อากาศ (Anaerobic Process) เป็นกระบวนการย่อยสลายทางชีววิทยาที่ใช้แบคทีเรียชนิดไม่ใช้อากาศหลายกลุ่มทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลใหญ่และสลับซับซ้อนอันได้แก่คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน ผลพลอยได้จากกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศคือก๊าซชีวภาพ (Biogas)

ก๊าซชีวภาพเป็นก๊าซซึ่งประกอบด้วยก๊าซหลายชนิดโดยมีก๊าซมีเทน (CH_4) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นองค์ประกอบหลัก ส่วนก๊าซอื่น ๆ เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) มีปริมาณเล็กน้อย เนื่องจากก๊าซมีเทนเป็นก๊าซที่ให้ค่าพลังงานความร้อนสูง โดยสามารถให้พลังงาน

ความร้อนได้สูงถึงประมาณ 9,000 กิโลแคลอรี/ม³ หรือ 21,000 กิโลจูล/ม³ จึงสามารถนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์ในรูปของพลังงานได้ เช่น เผาเพื่อใช้ประโยชน์จากความร้อนโดยตรง ใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับขับเคลื่อนรถยนต์ หรือเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า เป็นต้น

กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกาศมีกระบวนการที่สลับซับซ้อนมาก โดยปฏิกิริยาทางชีวเคมีเกิดขึ้นนับร้อยกระบวนการซึ่งจะต้องอาศัยเอนไซม์หรือตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยในการเข้าทำปฏิกิริยาด้วย แม้ว่าการศึกษาเกี่ยวกับระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกาศจะมีการศึกษากันมาอย่างยาวนาน แต่ในปัจจุบันการศึกษาทางด้านนี้ก็ยังไม่หยุดนิ่ง ยังคงมีการศึกษาเพิ่มเติมอย่างต่อเนื่องเพื่อให้ทราบถึงกลไกและลักษณะการทำงานของแบคทีเรียเพื่อที่จะได้ออกแบบและควบคุมระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

2.3 กลไกการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกาศ (มันสิน ตันจุลเวศม์, 2542)

2.3.1 กลไกการย่อยสลายประกอบด้วย 4 ขั้นตอน ได้แก่

ก. ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

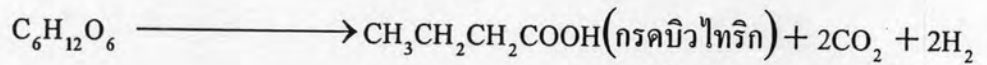
ขั้นตอนนี้แบคทีเรียสร้างกรดจะปล่อยเอนไซม์ออกมาภายนอกเซลล์ ย่อยสลายสารประกอบโมเลกุลใหญ่ เช่น โปรตีน ไขมัน และคาร์โบไฮเดรต ให้กลายเป็นสารประกอบโมเลกุลเล็ก เช่น น้ำตาล กรดอะมิโน เป็นต้น ซึ่งมีโมเลกุลเล็กจนผ่านเซลล์เมมเบรนเข้าสู่ภายในเซลล์ของแบคทีเรียสร้างกรดได้ ขั้นตอนนี้ค่อนข้างช้า และเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยา อัตราเร็วและความสมบูรณ์ของขั้นตอนนี้ขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น อุณหภูมิ เวลา กักน้ำ และค่าพีเอช

ข. การสร้างกรด (Acidogenesis)

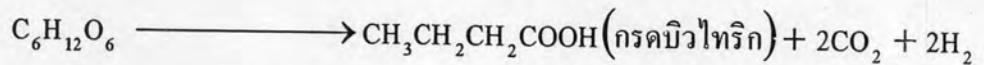
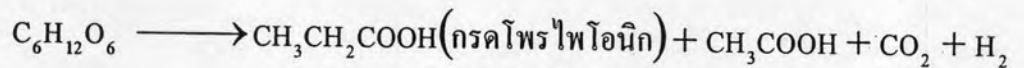
ผลผลิตของขั้นตอนที่ 1 จะเข้าสู่ภายในเซลล์ของแบคทีเรียสร้างกรด และถูกออกซิไดซ์ให้กลายเป็นกรดไขมันระเหย (Volatile fatty acid) เช่น กรดอะเซติก กรดโพรไพโอนิก กรดบิวไทริก เป็นต้น ซึ่งจะเป็นอะไรนั้นขึ้นกับค่าความดันพาร์เชียลไฮโดรเจนในระบบ ดังแสดงในปฏิกิริยา แบคทีเรียสร้างกรดส่วนใหญ่เป็นชนิดไร้ออกซิเจนอย่างเด็ดขาด มีเพียงส่วนน้อยประมาณ 1% เป็นชนิดกึ่งไร้ออกซิเจน

ปฏิกิริยาในขั้นตอนการสร้างกรด

ความดันพาร์เซิลไฮโดรเจนต่ำ



ความดันพาร์เซิลไฮโดรเจนสูง

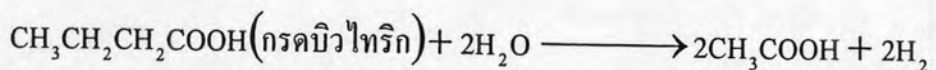
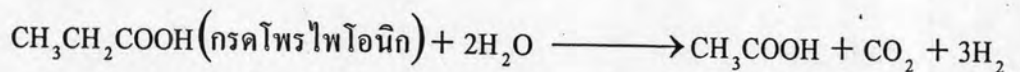


ค. การสร้างกรดอะเซติก (Acetogenesis)

แบคทีเรียสร้างกรดอะเซติกจะเปลี่ยนกรดไขมันระเหยที่ได้จากขั้นตอนการสร้างกรดเป็นกรดอะเซติก ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยจะเกิดภายใต้สภาวะความดันพาร์เซิลไฮโดรเจนต่ำเท่านั้น ดังแสดงในปฏิกิริยา ดังนั้นการสร้างมีเทนโดยใช้ก๊าซไฮโดรเจน และการใช้ก๊าซไฮโดรเจนโดยแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต จะช่วยไม่ให้เกิดการสะสมของกรดโพรไพโอนิกซึ่งเป็นพิษต่อแบคทีเรียสร้างมีเทน

ปฏิกิริยาในขั้นตอนการสร้างอะเซติก

ความดันพาร์เซิลไฮโดรเจนต่ำ

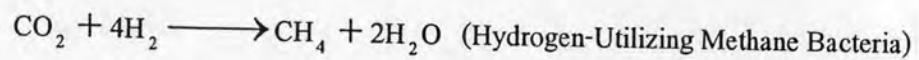
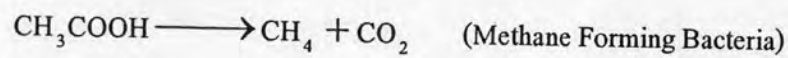


ง. การสร้างมีเทน (Methanogenesis)

แบคทีเรียสร้างมีเทนเป็นชนิดไร้ออกซิเจนอย่างเด็ดขาด ใช้สารอาหารจำเพาะเจาะจง แบ่งสารอาหารได้เป็น 3 ประเภทดังนี้

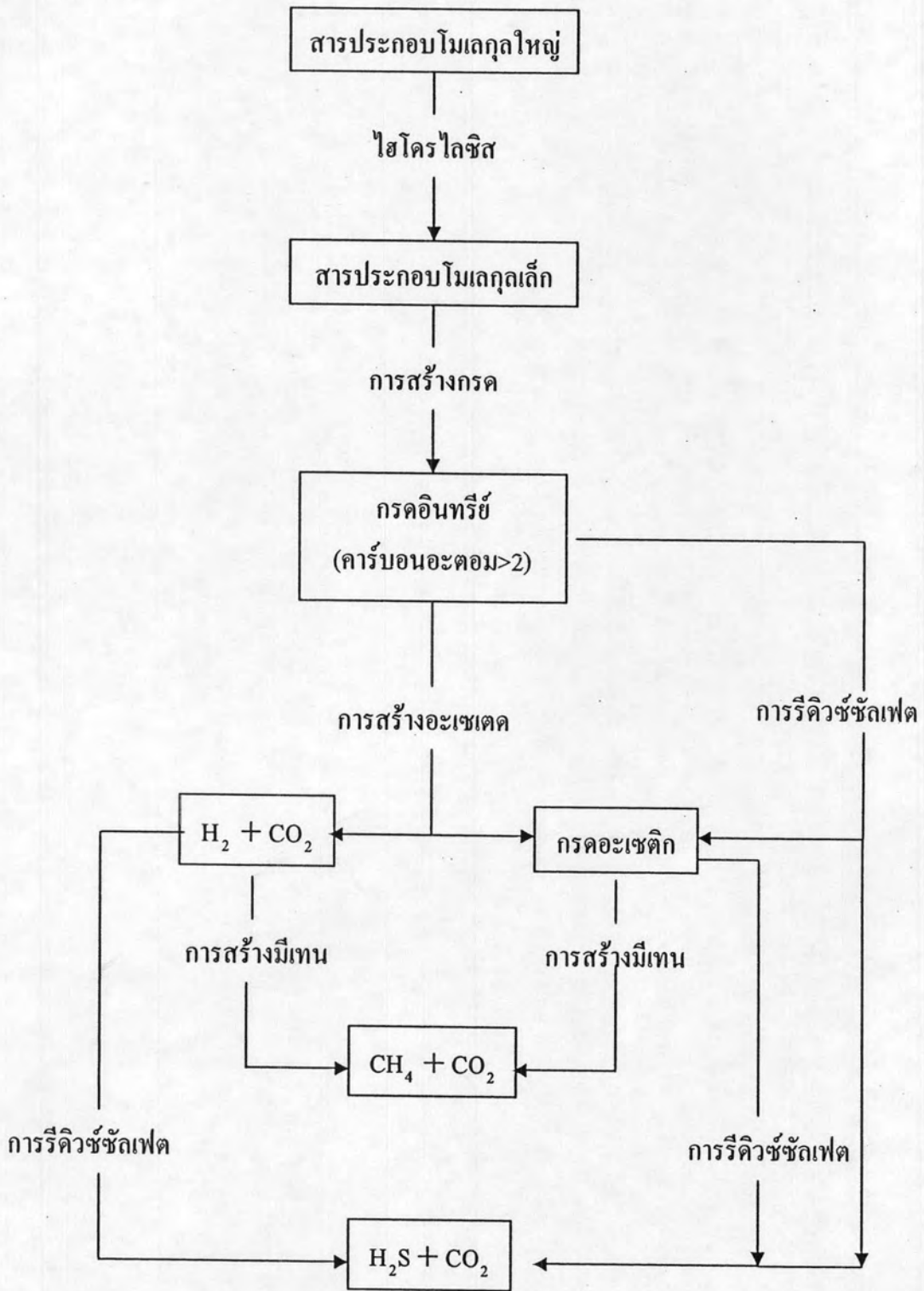
- (1) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ รวมทั้งฟอร์มิก (HCOOH) และคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยมีก๊าซไฮโดรเจนเป็นตัวให้อิเล็กตรอน
- (2) กลุ่มเมทิล (CH₃) ที่มีคาร์บอน 1 อะตอม เช่น เมทานอล (CH₃OH), เมทิลลาไมล์ (CH₃NH₃⁺)
- (3) กรดอะเซติก

การเกิดก๊าซมีเทนเกิดได้ 2 แบบ แบบแรกคือเกิดจากการเปลี่ยนกรดอินทรีย์ไปเป็นก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนนี้มีปริมาณเป็น 70% ของก๊าซมีเทนสามารถเกิดขึ้นได้ในระบบ อีกแบบหนึ่งจะเกิดจากการรีดิวซ์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนให้กลายเป็นก๊าซมีเทน โดยแบคทีเรียประเภท Hydrogen-Utilizing Methane Bacteria



แบคทีเรียที่เป็นตัวสร้างมีเทนเจริญเติบโตได้ช้า และสภาพแวดล้อมมีผลต่อการเจริญเติบโตค่อนข้างมาก ทำให้ช่วงค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการทำงานของแบคทีเรียชนิดนี้แคบ โดยสามารถเจริญเติบโตได้ในช่วงพีเอชประมาณ 6.5-7.2 นอกจากนี้อุณหภูมิก็มีผลต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียอีกด้วยและมีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (Specific Growth Rate) ต่ำ นอกจากนี้แล้วแบคทีเรียในกลุ่มนี้สามารถใช้เพียงสารอาหารที่โครงสร้างไม่ซับซ้อน ดังนั้นการเติบโตของแบคทีเรียที่เป็นตัวสร้างมีเทนนี้จึงขึ้นอยู่กับการทำงานของแบคทีเรียในขั้นตอนไฮโดรไลซิสและการสร้างกรดและแบคทีเรียทุกกลุ่มต้องทำงานอย่างสัมพันธ์กัน หากพิจารณากลุ่มของแบคทีเรียที่อยู่ร่วมกันในระบบการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนของสภาพการเจริญเติบโตแล้ว กลุ่มของแบคทีเรียที่เป็นตัวสร้างมีเทนจะเป็นกลุ่มแบคทีเรียหลักในการควบคุมปฏิกิริยาทั้งหมดในระบบเนื่องจากแบคทีเรียกลุ่มนี้มีอัตราการเติบโตช้าที่สุด และมีข้อจำกัดด้านสภาพแวดล้อมของระบบมากกว่าแบคทีเรียกลุ่มอื่น

ขั้นตอนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Process) ในขั้นต่าง ๆ ที่กล่าวมาแล้วสามารถสรุปและแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกาศ (Visser, Gaoy และ Lettinga, 1994)

2.3.2 แบคทีเรียในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกาศ

ในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการย่อยแบบไม่ใช้ออกาศนั้น จะเกี่ยวข้องกับแบคทีเรียหลายชนิดซึ่งมีหน้าที่การทำงานแตกต่างกัน แบคทีเรียพวกที่สร้างก๊าซมีเทน (Methanogenic bacteria) ไม่สามารถใช้สารอินทรีย์ที่ซับซ้อนเพื่อผลิตก๊าซมีเทนได้ จึงต้องมีแบคทีเรียพวกที่ไม่สร้างก๊าซมีเทน (Non-methanogenic bacteria) มาย่อยสลายสารอินทรีย์เหล่านี้ให้กลายเป็นสารที่แบคทีเรียพวกสร้างก๊าซมีเทนนำไปใช้ได้ สามารถแบ่งแบคทีเรียที่เกี่ยวข้องเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ

2.3.2.1 Non-methanogenic bacteria

เป็นกลุ่มของแบคทีเรียที่เกี่ยวข้องกับขั้นตอน Hydrolysis, Acidogenesis และ Acetogenesis แบคทีเรียพวกนี้สามารถเจริญเติบโตได้ดีที่ pH 4.0-6.5 มีทั้งพวกที่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนเท่านั้น (Obligate anaerobic bacteria) และพวกที่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ทั้งในสภาวะที่มีและไม่มีออกซิเจน (Facultative anaerobic bacteria) ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงที่สภาวะแวดล้อมต่าง ๆ ได้ดี มีอัตราการเจริญเติบโตสูง สามารถเพิ่มจำนวนเป็น 2 เท่าได้ภายในเวลา 24 ชั่วโมง แบคทีเรียในกลุ่มนี้ได้แก่ Fermentative bacteria และ Acetogenic bacteria

ก. Fermentative bacteria ทำหน้าที่ในขั้นตอน Hydrolysis และ Acidogenesis แบคทีเรียกลุ่มนี้จะผลิตเอนไซม์แล้วปล่อยออกมาออกเซลล์เพื่อย่อยสลายสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส แป้ง ไขมัน และโปรตีน ให้เป็นสารโมเลกุลเดี่ยวหรือสารที่มีขนาดโมเลกุลเล็กลงที่แบคทีเรียสามารถนำไปในเซลล์ได้ เช่น น้ำตาล กรดไขมัน กรดอะมิโน แล้วสารต่าง ๆ เหล่านี้จะผ่านเข้าไปในเซลล์และถูกเปลี่ยนไปเป็นกรดอินทรีย์ระเหย เช่น อะเซติก บิวไทริก โพรไพโอนิก แลคเตท เอทานอล ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการ

Carbohydrate \longrightarrow sugar \longrightarrow organic acids

Lipid \longrightarrow fatty acids \longrightarrow alcohols

Protein \longrightarrow amino acids \longrightarrow CO_2/H_2

การที่จะได้สารตัวใดเป็นผลผลิตนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 ประการ คือ ชนิดของสารตั้งต้น (Substrate) และความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจน (Hydrogen partial pressure) ในสภาวะที่มีความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนต่ำ (Low hydrogen partial pressure) แบคทีเรียจะผลิต

สารพวกอะเซติก ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา แต่ในสภาวะที่มีความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนสูง (High hydrogen partial pressure) แบคทีเรียจะผลิตสารพวกโพรไพโอ-นิก แลคเตท บิวไทริก และเอทานอล

ข. Acetogenic bacteria หรือ Acetogen ทำหน้าที่ในขั้นตอน Acetogenesis แบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มย่อย คือ

(1) กลุ่ม Hydrogen producing acetogenic bacteria เป็นแบคทีเรียที่สามารถย่อยสลายกรดอินทรีย์ระเหยที่มีคาร์บอนหลายอะตอม (คาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม) และเอทานอลให้เป็น อะเซติก ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Macleod และคณะ, 1990) และยังมีหน้าที่ที่สำคัญในฐานะเป็นตัวเชื่อมระหว่างแบคทีเรียที่สร้างกรดและแบคทีเรียที่สร้างก๊าซมีเทน พบว่าก๊าซไฮโดรเจนที่สร้างขึ้นนั้นมีบทบาทสำคัญในการควบคุมปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในระบบ โดยถ้ามีก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้นในปริมาณมากจะทำให้ไฮโดรเจนไอออน (H^+) เพิ่มมากขึ้น pH ในระบบเป็นกรดจนกระทั่งไปมีผลยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียพวกนี้ แต่ถ้าในระบบมีพวก Methanogenic bacteria อยู่ด้วย ก๊าซไฮโดรเจนจะถูกใช้รีดิวซ์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้กลายเป็นก๊าซมีเทนในขั้นตอนการสร้างก๊าซมีเทน จึงทำให้ในระบบมีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนไม่สูงมากจนถึงระดับที่เป็นพิษได้ ตัวอย่างของปฏิกิริยาการเกิดอะเซติก ดังสมการ



(Propionate)



(Butyrate)



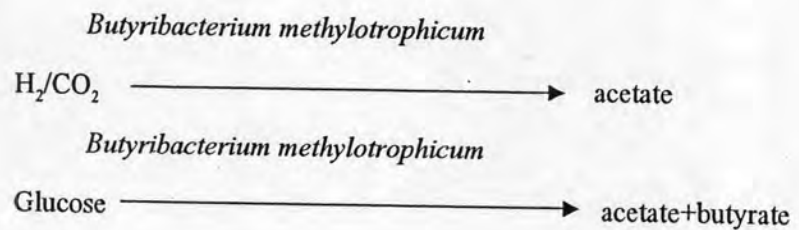
(Lactate)



(Ethanol)

ตัวอย่างแบคทีเรียในกลุ่มนี้ได้แก่ *Desulfovibrio*, *Selenomonas*, *Syntrophomonas* และ *Ruminococcus* แบคทีเรียเหล่านี้มีอยู่ประมาณ 10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตรในน้ำเสีย

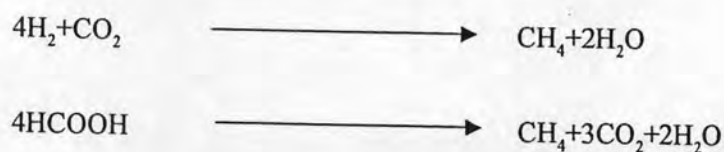
(2) กลุ่ม Homoacetogenic bacteria เป็นแบคทีเรียที่สามารถใช้สารประกอบที่มีคาร์บอน 1 อะตอม เช่น ฟอรัมเมท ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ได้ออกมาเป็นอะเซติกแต่ถ้าใช้สารประกอบที่มีคาร์บอนหลายอะตอม เช่น น้ำตาลกลูโคส แลคเตท และไพรูวาทจะได้ออกมาทั้งอะเซติกและบิวไทริก ดังสมการ

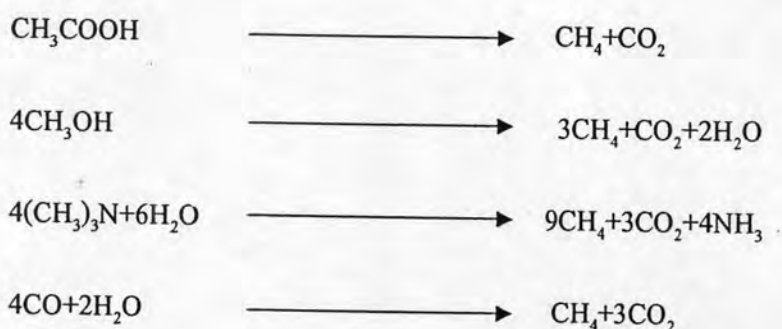


ตัวอย่างแบคทีเรียในกลุ่มนี้ได้แก่ *Butyribacterium methylotrophicum*, *Clostridium thermoaceticum*, *Acetobacterium woodii*, *A. carbinolium*, *Acetoanaerobicum naterae* และ *Eubacterium limosum* แบคทีเรียเหล่านี้มีอยู่ประมาณ 10^5 เซลล์ต่อมิลลิลิตรในน้ำเสีย

2.3.2.2 Methanogenic bacteria

Methanogenic bacteria หรือ Methanogen เป็นกลุ่มของแบคทีเรียที่เกี่ยวข้องกับขั้นตอน Methanogenesis แบคทีเรียกลุ่มนี้จัดเป็นพวกที่ไม่ต้องการออกซิเจนอย่างแท้จริง เนื่องจากออกซิเจนจะเป็นพิษต่อแบคทีเรียนี้ สามารถเจริญได้ดีใน pH ที่เป็นกลางประมาณ 6.8-7.2 อัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มนี้จะช้ากว่าแบคทีเรียกลุ่มอื่นในขั้นตอนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน ในการแบ่งเซลล์เพิ่มจำนวนเป็น 2 เท่าต้องใช้เวลา 3-5 วัน มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อมได้น้อยกว่า เช่น ไม่อาจทนต่อออกซิเจน แม้มีปริมาณเพียงเล็กน้อย หรือไม่อาจเจริญเติบโตได้ดีเมื่ออยู่ภายนอกช่วง pH ที่เหมาะสม เป็นต้น และมีข้อจำกัดคือสามารถใช้สารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อนเพียงไม่กี่ชนิด เช่น อะเซติก และสารประกอบที่มีคาร์บอน 1 อะตอมเท่านั้น เช่น ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ฟอรัมเมทาโนล และ เมทริลลามีน ดังสมการ





2.4 การผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากน้ำเสีย

ก๊าซไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงที่ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะ โดยที่การผลิตก๊าซไฮโดรเจนสามารถผลิตได้จากหลายแหล่ง ตัวอย่างเช่น ในสหรัฐอเมริกา ก๊าซไฮโดรเจนส่วนใหญ่ผลิตมาจากกระบวนการ Thermocatalytic และ Gasification ของก๊าซธรรมชาติซึ่งให้ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนประมาณ 50% จากอนุพันธ์ปิโตรเลียม Napthenes และ Distillates อีกประมาณ 30% และถ่านหิน 18% ส่วนที่เหลืออีก 2% ได้มาจากกระแสไฟฟ้า (Van Ginke, Oh และ Logan, 2005)

การผลิตไฮโดรเจนชีวภาพจากการหมักสารอินทรีย์ที่นำมาหมักเวียนใช้ได้ เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ดีแม้ว่าการใช้ของเหลือจากการผลิตอาหาร เช่น ข้าวโพด และ น้ำตาล จะยังไม่คุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ (Benemann, 1996)

น้ำเสียมีสักยภาพสูงสำหรับการผลิตไฮโดรเจนที่คุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เพราะการผลิตผลิตภัณฑ์จากของเสียสามารถลดค่าใช้จ่ายในการบำบัดและกำจัดของเสีย (Water Environment Research Foundation [WERF], 1999)

การผลิตไฮโดรเจนจากน้ำเสียสามารถผลิตได้ โดยอาศัยกลไกการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน 3 ขั้นตอนแรกคือ กลไกไฮโดรไลซิส กลไกการหมักกรด กลไกการสร้างกรดอะซิติก ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเกิดไฮโดรเจนขึ้นกับปัจจัยดังนี้

2.4.1 ปัจจัยที่มีผลต่อระบบบำบัดสภาวะไร้ออกซิเจน

เนื่องจากในระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน ประกอบด้วยแบคทีเรีย 2 กลุ่ม ที่เกี่ยวข้องกันได้แก่ แบคทีเรียพวกที่ไม่สร้างก๊าซมีเทนและแบคทีเรียพวกที่สร้างก๊าซมีเทน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องรักษาสภาวะแวดล้อมให้มีสภาพที่เหมาะสมที่จะทำให้แบคทีเรียเหล่านี้อยู่ด้วยกันได้เป็นอย่างดี ในการที่จะควบคุมระบบให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพจะต้อง

ทำให้แบคทีเรียอยู่ในสภาวะสมดุลกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 ประการคือ ปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อม และ ปัจจัยทางด้านการทำงาน (Price และ Cheremisinoff, 1981; Grady, Daigger และ Lim, 1999)

2.4.1.1 ปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อม (Environmental factor)

ก. อุณหภูมิ (Temperature)

การย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกาศมีอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ 2 ช่วง คือ อุณหภูมิระหว่าง 30-40 องศาเซลเซียส (Mesophilic temperature) แบคทีเรียที่ทำงานในช่วงนี้ เรียกว่า Mesophilic bacteria และอุณหภูมิระหว่าง 50-60 องศาเซลเซียส (Thermophilic temperature) แบคทีเรียที่ทำงานในช่วงนี้เรียกว่า Thermophilic bacteria ในช่วง Thermophilic temperature อัตราเร็วของปฏิกิริยาและประสิทธิภาพของระบบจะมากกว่าในช่วง Mesophilic temperature (Ahn และ Forster, 2002) ทำให้สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้มากที่ระยะเวลาในการย่อยสลายสารอินทรีย์สั้นลงและลดปริมาตรถังหมักลง แต่ระบบการหมักที่อุณหภูมิสูงมีข้อเสียคือ Thermophilic bacteria ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิได้ไม่ดีเท่า Mesophilic bacteria การควบคุมระบบจึงมีความเสี่ยงสูงต่อการล้มเหลวของระบบ และยังสิ้นเปลืองพลังงานในการควบคุมอุณหภูมิของระบบอีกด้วย ซึ่งเมื่อคำนึงถึงจุดนี้แล้วระบบการหมักที่อุณหภูมิต่ำน่าจะเหมาะสมกับประเทศไทยมากกว่าเพราะสภาพอากาศของประเทศไทยมีอุณหภูมิอยู่ในช่วงนี้

Masse และ Masse (2001) รายงานว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงฆ่าสัตว์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนคือ 20, 25 และ 30 องศาเซลเซียส สามารถกำจัด COD ไปเป็นมีเทนได้เท่ากับ 84.2, 88.7 และ 90.8 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการกำจัด COD ไปเป็นมีเทนจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากที่อุณหภูมิสูงนั้นแบคทีเรียที่สร้างก๊าซมีเทนจะมีกิจกรรมสูงด้วย

ข. ความเป็นกรดด่าง (pH)

pH เป็นปัจจัยที่สำคัญของระบบการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกาศที่ต้องรักษาให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมประมาณ 6.5-7.5 (Acher และ Kirsop, 1991) ถ้า pH มีค่าสูงหรือต่ำกว่านี้ประสิทธิภาพของระบบจะลดลง และถ้า pH มีค่าต่ำกว่า 6.2 ประสิทธิภาพของระบบจะลดลงตัวอย่างรวดเร็วเพราะที่สภาวะนี้จะเป็นอันตรายต่อแบคทีเรียพวกที่สร้างก๊าซมีเทนเนื่องจากแบคทีเรียเหล่านี้ใช้กรดอินทรีย์ระเหยไม่ทันทำให้ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยถูกสะสมเพิ่มมากขึ้น pH จึงลดต่ำลงอย่างรวดเร็ว ถ้า pH ลดต่ำลงถึง 4.5-5.0 จะทำให้ Methanogenic bacteria หยุดการเจริญเติบโต ซึ่งสามารถป้องกันได้โดยการเติมสารเคมีพวกต่างต่าง ๆ ลงไป เช่น ปูนขาว (CaO) โซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO₃) โซดาไฟ (NaOH) และ โซเดียมคาร์บอเนต (Na₂CO₃) เป็นต้นหรืออาจจะลดปริมาณสารอินทรีย์ที่เข้าระบบลง ในการใช้ด่างแก่หรือคาร์บอเนตปรับสภาพจะ

ทำให้คาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายน้ำเกิดสมดุลชั่วคราว เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศถูกดึงเข้าไปทดแทนคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำ เพื่อสร้างด่างไบคาร์บอเนตทำให้ pH เพิ่มขึ้น แต่เมื่อแบคทีเรียพวกสร้างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มาแทนที่จะทำให้จุดสมดุลเคลื่อนไปจนกระทั่งคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายน้ำสมดุลกับคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศสิ่งที่ใช้บ่งชี้สภาวะภายในถังหมักไร้ออกซิเจนได้อย่างหนึ่งคือค่า pH แต่มีปัญหาเนื่องจากเป็นค่าที่เปลี่ยนแปลงช้าในขณะที่กรดอินทรีย์ระเหยเพิ่มมากขึ้นแต่ค่า pH กลับเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้นเนื่องมาจากผลของบัฟเฟอร์ของความเป็นด่างภายในระบบ ดังนั้นการใช้ค่า pH สำหรับการแก้ไขสภาวะภายในระบบอาจจะไม่ทันการ เมื่อเปรียบเทียบกับความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ระเหยที่เกิดขึ้น แต่อย่างไรก็ตามค่า pH ก็ยังเป็นสิ่งสำคัญในการควบคุมระบบอยู่ดีเพราะสามารถหาค่าได้ง่ายและรวดเร็ว

ค. กรดอินทรีย์ระเหย (Volatile fatty acid, VFA)

กรดอินทรีย์ระเหยเกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ของแบคทีเรียพวกสร้างกรด ซึ่งจะถูกแบคทีเรียพวกสร้างก๊าซมีเทนนำไปใช้เป็นสารอาหารและแหล่งพลังงาน ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยจะมีส่วนสำคัญต่อค่า pH ของระบบ คือ เมื่อมีปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยสูงขึ้น pH จะต่ำลง ระดับของกรดอะเซติกที่มีค่าเกิน 800 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออัตราส่วนของกรดโพสไฟโอนิกต่อกรดอะเซติกเกิน 1.4 จะทำให้ระบบเกิดการล้มเหลวได้ (Marchaim และ Krause, 1993)

ง. ความเป็นด่าง (Alkalinity)

ความเป็นด่างในระบบการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของไบคาร์บอเนตที่เกิดมาจากการทำปฏิกิริยากันระหว่างแอมโมเนียกับคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำให้อยู่ในรูปของแอมโมเนียมไบคาร์บอเนต ความเป็นด่างนี้จะเป็บบัฟเฟอร์ที่ดีให้แก่ระบบที่จะควบคุม pH ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับการเจริญของแบคทีเรีย เมื่อความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ระเหยภายในระบบเพิ่มสูงขึ้น ความเป็นด่างไบคาร์บอเนตก็จะถูกทำลายไป การทำลายความสามารถในการเป็นบัฟเฟอร์นี้เป็นสาเหตุทำให้ pH ลดลง

จ. สารอาหาร (Nutrient)

สารอาหารแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ สารอาหารหลัก (macronutrient) ได้แก่ คาร์บอน (C) ไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) กำมะถัน (S) และสารอาหารรอง (micronutrient) ได้แก่ แคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) สังกะสี (Zn) แมงกานีส (Mn) ทองแดง (Cu) โคบอลต์ (Co) เหล็ก (Fe) นิกเกิล (Ni) ปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่แบคทีเรียต้องการในการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนอย่างน้อยที่สุดต้องมีอัตราส่วน BOD:N:P เท่ากับ

100:1.1:0.2 โดยใช้คาร์บอนในการสังเคราะห์พลังงาน ในโตรเจนในการสังเคราะห์โปรตีน และ ฟอสฟอรัสในการสังเคราะห์กรดนิวคลีอิก ดังนั้นในการควบคุมสภาวะให้เหมาะสม จึงต้องได้ สารอาหารให้เพียงพอแก่ความต้องการ เพราะของเสียที่เข้าสู่ระบบนั้นมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน ออกไป เช่น ขยะของเสียเศษอาหาร ผักผลไม้ มีสารอาหารเหล่านี้ในปริมาณที่เพียงพอต่อความต้องการของแบคทีเรียแล้วแต่ของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมบางอย่างไม่มี จึงจำเป็นต้องเติม สารอาหารเหล่านี้เพิ่ม นอกจากนี้สารอาหารรอนั้นแบคทีเรียมีความต้องการน้อยมาก และในธรรมชาติก็มีเพียงพอต่อความต้องการของแบคทีเรียอยู่แล้ว

2.4.1.2 ปัจจัยทางด้านการทำงาน (Operational factor)

ก. อัตราการป้อนสารอินทรีย์ (Organic loading rate, OLR)

เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญที่ใช้ในการกำหนดความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน การปรับอัตราการป้อนสารอินทรีย์ให้มีค่าแตกต่างกัน ทำได้โดยเปลี่ยนอัตราการไหลของของเสียที่ไหลผ่านถังหมัก หรือเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของของแข็งหรือความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่ใส่เข้าไป ซึ่งการเปลี่ยนอัตราการป้อนสารอินทรีย์จะมีผลต่อระยะเวลาเก็บกักด้วย

ข. ระยะเวลาเก็บกัก (Hydraulic retention time, HRT)

เป็นปัจจัยหนึ่งที่ใช้ในการควบคุมประสิทธิภาพของระบบการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน อัตราเร็วของการย่อยสลายจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาเก็บกักสารอินทรีย์จนถึงค่าสูงสุดค่าหนึ่ง ต่อจากนั้นก็ลดลงจนกระทั่งถึงขั้นหนึ่งที่แบคทีเรียถูกล้างออกจากระบบ (Wash out) ในอัตราที่เร็วกว่าแบคทีเรียจะเพิ่มจำนวนขึ้น (Yilmazer และ Yenigun, 1999) ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ระบบล้มเหลวได้ สามารถแก้ไขการที่แบคทีเรียถูกล้างออกจากระบบได้โดยการเพิ่มระยะเวลาเก็บกักให้นานขึ้น นอกจากนี้ระยะเวลาเก็บกักจะเป็นปัจจัยหลักในการออกแบบระบบการหมัก กล่าวคือ ระยะเวลาเก็บกักเป็นระยะเวลาที่ของเสียอยู่ในถังหมักสามารถหาได้โดยการหาร ปริมาตรถังหมักด้วยปริมาตรของเสียที่เติมลงในถังหมักต่อหน่วยเวลา ระยะเวลาที่แบคทีเรียอยู่ในระบบ (Solid retention time, SRT) หมายถึง มวลของของแข็งภายในระบบหารด้วยมวลของของแข็งที่ปล่อยออกจากระบบต่อวัน ในถังหมักแบบธรรมดาที่ไม่มีการหมุนเวียนตะกอน มีระยะเวลาที่แบคทีเรียอยู่ในระบบจะเท่ากับระยะเวลาเก็บกักน้ำเสีย (SRT=HRT) แต่ในถังหมักที่มีการหมุนเวียนตะกอน มีระยะเวลาที่แบคทีเรียอยู่ในระบบมากกว่าระยะเวลาเก็บกักน้ำเสีย (SRT>HRT)

ค. การกวน (Mixing)

การกวนเป็นสิ่งสำคัญในระบบการย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศ โดยมีหลักการ คือ ทำให้สารอินทรีย์อยู่ในสภาพแขวนลอย เพื่อให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างสารอาหารกับแบคทีเรีย เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบด้วย และป้องกันการเกิดการสะสมของสารอินทรีย์ตามจุดต่าง ๆ ของถังหมัก และทำให้ของเหลวภายในถังหมักมีสภาพเป็นเนื้อเดียวกัน วิธีในการกวนของเหลวในถังหมักมีหลายวิธี เช่น ใช้เครื่องกวน สูบอัดก๊าซไปทางด้านก้นของถังหมัก หมุนเวียนตะกอนด้วยปั๊ม ใช้การสูบผ่านท่อน้ำ เป็นต้น ซึ่งแต่ละวิธีจะมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันออกไป การที่จะเลือกใช้วิธีไหนต้องคำนึงถึงปัจจัยในหลาย ๆ ด้านประกอบกัน

2.5 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.5.1 สักยภาพในการผลิตไฮโดรเจน

Chang, Lee และ Lin (2002) ตรวจสอบการเกิดก๊าซไฮโดรเจนภายใต้ภาวะแบบไม่ใช้อากาศใน fixed-bed bioreactors โดยใช้ซูโครสเป็นแหล่งคาร์บอนหลัก พบว่าสามารถผลิตไฮโดรเจนได้ในอัตรา 0.415 l/h/l สำหรับ expanded clay (EC reactor, ปริมาตร 300 ml) ในทางตรงกันข้ามอัตราการเกิดไฮโดรเจนที่มีค่าเท่ากับ 1.32 l/h/l เป็นของ activated carbon (AC reactor, ปริมาตร 300 ml) โดยก๊าซชีวภาพที่ได้จากทั้ง EC และ AC reactors ดังกล่าวนี้อาจประกอบไปด้วยไฮโดรเจน 25-35% ส่วนที่เหลือเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

Zhang, Liu และ Fang (2003) ได้ทำการทดลองแบบแบดซ์เพื่อเปลี่ยนแป้งในน้ำเสียไปเป็นไฮโดรเจนสถานะ Thermophilic โดยค่าไฮโดรเจนสูงสุดที่ได้มีค่าเท่ากับ 92 ml/g แป้ง และอัตราการเกิดไฮโดรเจนสูงสุดมีค่าเท่ากับ 365 ml/(g-VSS·d) ส่วนก๊าซชีวภาพที่ได้พบว่ามีไฮโดรเจนอยู่ 60% โดยตรวจไม่พบก๊าซมีเทน

Shin, Youn และ Kim (2004) แนะนำว่าการผลิตไฮโดรเจนจากของเสียประเภทอาหารโดยแบคทีเรียสร้างกรดทั้งแบบ mesophilic และ thermophilic ควรปรับให้แบคทีเรียชินกับสภาพกับของเสียก่อนเป็นเวลา 5 วัน ส่วนก๊าซชีวภาพที่ได้จากแบคทีเรียสร้างกรดประเภท thermophilic นั้นพบว่าไม่มีก๊าซมีเทนอยู่เลย ปริมาณไฮโดรเจนมากที่สุดที่ได้มีค่าเท่ากับ 69% (v/v) ที่ 10 g VS/l และไฮโดรเจนยิลด์อยู่ในช่วง 0.9-1.8 mol-H₂/mol-hexose และสูงสุดที่ 6 g VS/l

Kim, Han และ Shin (2004) พบว่าศักยภาพในการผลิตไฮโดรเจนจากของเสียพวกเศษอาหารมีค่าสูงกว่าพวกกากตะกอนน้ำเสีย โดยค่าไฮโดรเจนสูงสุดที่ได้จากของเสียประเภทอาหาร

และกากตะกอนของเสีย (87:13) มีค่า 122.9 ml/g คาร์โบไฮเดรต-COD และอัตราการเกิดไฮโดรเจนสูงสุดมีค่าเท่ากับ 111.2 ml H₂/g VSS/h ดังนั้นของเสียพวกเศษอาหารและกากตะกอนน้ำเสียจึงเป็นสับเสตรหลักที่เหมาะสมและเป็นประโยชน์สำหรับการผลิตไฮโดรเจน

Han และ Shin (2004) เสนอว่ากระบวนการ BIOCELL ที่เป็น two-stage แบบประยุกต์นั้นสามารถเปลี่ยนของเสียประเภทอาหารไปเป็นไฮโดรเจนได้ 28.2% บนฐานของค่า COD เป็นเวลา 8 วัน โดยที่อัตราการเกิดไฮโดรเจนที่ได้มีค่าเท่ากับ 3.63 m³/m³·day และได้คายิลด์ 0.21 m³/kg VS_{added}

Khanal และคณะ (2004) ได้ทำการทดสอบแบบแบคทีเรียเพื่อตรวจสอบผลกระทบของพีเอชที่มีต่อการผลิตไฮโดรเจนโดยมีซูโครสและแป้งเป็นสับเสตรหลัก โดยที่สัทธิภาพการผลิตก๊าซไฮโดรเจนสูงสุดของซูโครสมีค่าเท่ากับ 214 ml H₂/g COD และแป้งมีค่าเท่ากับ 125 ml H₂/g COD ที่พีเอชตั้งต้น 4.5

Van Ginkel, Oh และ Logan (2005) ศึกษาสัทธิภาพในการผลิตไฮโดรเจนชีวภาพจากน้ำเสียอุตสาหกรรมการแปรรูปอาหารและน้ำเสียชุมชนโดยทำการทดสอบแบบแบคทีเรีย น้ำเสียที่มาจากอุตสาหกรรมการแปรรูปอาหาร 4 แหล่งให้ก๊าซไฮโดรเจน 60% โดยเทียบกับคาร์บอนไดออกไซด์ การเปลี่ยนรูปไปเป็นก๊าซไฮโดรเจนทั้งหมดมีค่า 0.7-0.9 L-H₂/L-wastewater จากน้ำเสียของการแปรรูปแอปเปิล, 0.1 L/L จากน้ำเสียโรงงานลูกกวาด A, 0.4-2.0 L/L จากน้ำเสียโรงงานลูกกวาด B และ 2.1-2.8 L/L จากน้ำเสียของการแปรรูปมันฝรั่ง ส่วนก๊าซไฮโดรเจนที่ได้จากน้ำเสียชุมชนมีเพียงแค่ 23±8% คิดเป็นผลผลิตโดยประมาณสูงสุดเพียงแค่ 0.01 L/L น้ำเสียตั้งต้น โดยที่ตรวจไม่พบค่าความเข้มข้นของก๊าซมีเทน

2.5.2 ลักษณะวิธีการทดลอง

Chang, Lee และ Lin (2002) วิจัยเรื่องการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ fixed-bed bioreactors ที่ประกอบด้วยแบคทีเรียผลิตไฮโดรเจนจากตะกอนน้ำเสียชุมชน โดยใช้วัสดุฟรอน 3 ประเภท ได้แก่ loofah sponge (LS), expanded clay (EC) และ activated carbon (AC) เป็นวัสดุฐานรองสำหรับฟิล์มจุลชีพ โดยมีเวลาในการกัก (HRT) 0.5-5 h

Zhang, Liu และ Fang (2003) ได้ทำการทดลองแบบแบคทีเรียเพื่อเปลี่ยนแป้งในน้ำเสียไปเป็นไฮโดรเจนที่ 55 °C (Thermophilic) โดยแบ่งออกเป็น 3 ชุด ใน 280 ml glass reactor การ

วิเคราะห์ก๊าซวัดโดยใช้เครื่องมือ glass syringe ส่วนองค์ประกอบของก๊าซใช้เครื่อง gas chromatograph (GC) สำหรับการวิเคราะห์ทาง phylogenetic จะใช้วิธี 16S rDNA

Shin, Youn และ Kim (2004) ได้ทำการทดลองการเกิดไฮโดรเจนจากทั้งของเสียอาหารและกากตะกอนของเสียซึ่งเป็นระบบ Anaerobic co-digestion ทำในขวดเซรุ่มภายใต้การแปรผันความเข้มข้นของ volatile solids (VS) 0.5-5.0% และอัตราส่วนผสมระหว่างของเสียประเภทอาหารและกากตะกอนของเสียมีค่าในช่วง 0:100-100:0 ทำโดยอาศัยวิธี response surface methodology และสูตร Empirical ในการหาค่าปริมาณไฮโดรเจน

Han และ Shin (2004) ได้ทำการศึกษาการหมักของเสียประเภทอาหารให้เกิดเป็นไฮโดรเจนใน leaching-bed reactor โดยอาศัย heat-shocked anaerobic sludge และตรวจสอบผลกระทบของ dilution rate (D) ที่มีต่อการเกิดไฮโดรเจน โดยที่ค่า D นี้ใช้เป็นตัวคงสภาพสภาวะที่เหมาะสมในการหมักให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนขึ้น นอกจากนี้ยังทำการศึกษาพัฒนากระบวนการหมักของเสียประเภทอาหารเพื่อผลิตก๊าซไฮโดรเจนใน leaching-bed reactor ที่ 35 °C โดยใช้เครื่อง wet gas meter ในการวัดก๊าซชีวภาพ

Khanal และคณะ (2004) ทำการทดสอบแบบเบดซ์เป็นชุด ๆ เพื่อศึกษาผลกระทบของพีเอชและผลิตภัณฑ์ในตัวกลางต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเกิดไฮโดรเจน โดยทดสอบในขวดซีรัมเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการเกิดก๊าซไฮโดรเจน ทำการวัดค่าความเข้มข้นต่าง ๆ รวมถึงค่าพีเอชตั้งต้นด้วย ผลที่ได้จากการวิจัยนี้จะนำไปออกแบบ bioreactor ที่มีประสิทธิภาพต่อไป

Van Ginkel, Oh และ Logan (2005) ทดสอบน้ำเสียที่ได้จากการแปรรูปอาหาร และ น้ำเสียชุมชน ซึ่งน้ำเสียชุมชนนี้จะถูกทำให้เข้มข้นขึ้นด้วยเครื่อง Rotoevaporation ที่อุณหภูมิ 100 °C เพื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสีย เนื่องจากคณะผู้วิจัยคาดว่าความเข้มข้นของกลูโคสในน้ำเสียนั้นไม่เพียงพอ จากนั้นจึงวัดความเข้มข้นของกลูโคส และ COD ส่วนความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนจะวัดโดยกระบอกเก็บก๊าซ และ เครื่องก๊าซโครโมโตกราฟ

2.5.3 ปัจจัยกระทบต่อการผลิตไฮโดรเจน

Van Ginkel, Lay และ Sung (2001) เสนอว่าปัจจัยด้านพีเอชมีผลต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจน โดยเขาได้ทำการศึกษาและพบว่าค่าพีเอชสุดท้าย 5.7 ± 0.3 เป็นค่าที่อยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการผลิตก๊าซไฮโดรเจน (5.5-6.0)

Zhang และคณะ (2003) เสนอว่าน้ำเสียอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ปล่อยน้ำทิ้งออกมาที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นการบำบัดน้ำเสียประเภทนี้จึงอยู่ภายใต้สภาวะอุณหภูมิก่อนข้างสูง (Thermophilic condition) ซึ่งเป็นผลดีต่อการย่อยสลาย นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังแสดงให้เห็นว่าในสภาวะ Thermophilic มีความต้องการ lag time ที่ยาวนานกว่าเพื่อเปลี่ยนแปลงในปริมาณมากให้กลายเป็นไฮโดรเจนแม้ว่ายังมีอัตราการเกิดที่ต่ำอยู่ การที่มีความต้องการช่วงเวลา lag time ที่ยาวนานก็เพราะว่าแบคทีเรียจำเป็นต้องใช้เวลาในการปรับตัวให้เข้ากับสภาวะแวดล้อมใหม่ ๆ สรุปได้ว่าการผลิตไฮโดรเจนจากแป้งภายใต้สภาวะ Thermophilic นั้นให้ค่าปริมาณไฮโดรเจนที่สูงกว่าสภาวะ Mesophilic ในการทดลองได้ทำการแปรผันค่าพีเอชตั้งต้นของน้ำเสีย (4.0-9.0) พบว่าที่พีเอช 6.0 จะให้ค่าไฮโดรเจนยิลด์สูงสุด ส่วนพีเอช 7.0 ให้ค่าอัตราการเกิดไฮโดรเจนสูงสุด แต่ที่พีเอช 4.0 กลับไม่พบไฮโดรเจน แสดงให้เห็นว่าที่พีเอชต่ำ ๆ มีการยับยั้งการผลิตก๊าซไฮโดรเจน นอกจากนี้ lag time ยังได้รับผลกระทบจากค่าพีเอชตั้งต้นกล่าวคือ ค่า lag time 21 h ที่พีเอช 8.0 จะมีค่าเพิ่มถึง 72 h ที่พีเอช 5.0 สรุปได้ว่าช่วงพีเอชตั้งต้นที่เหมาะสมสำหรับการเกิดไฮโดรเจนในงานวิจัยนี้คือ 6.0-7.0 ภายใต้สภาวะ thermophilic

นอกจากนี้ Zhang และคณะ (2003) ยังสรุปว่ากรดอินทรีย์ระเหยตัวหลัก ๆ ที่พบคือ อะเซเตตและบิวไทเรทในการหมักของทุกแบคทีเรีย ส่วน VFA และ alcohols นั้นเกิดจากการบำบัดน้ำเสียที่พีเอช 4.0 แม้ว่าจะไม่พบก๊าซไฮโดรเจนภายใต้สภาวะนี้ก็ตามแสดงให้เห็นว่าปริมาณของอะเซเตตและบิวไทเรทไม่ขึ้นกับพีเอชของน้ำเสีย อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของพีเอชมีผลทำให้โพโรไฟโอเนทเพิ่มตามด้วย

Liu และ Shen (2004) วิจัยเกี่ยวกับปัจจัยด้านสารอาหารคือ ความเข้มข้นของเหล็ก และความเข้มข้นของไนโตรเจน พบว่าความเข้มข้นของเหล็กที่เหมาะสมสำหรับแบคทีเรียในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนมีค่าเท่ากับ 10 mg/l ส่วนไนโตรเจนยังมีค่าความเข้มข้นสูงขึ้น lag time ก็สูงตามขึ้นไปด้วย พบว่าการเปลี่ยนแปลงในความเข้มข้นของไนโตรเจนอาจมีผลต่อสมดุลระหว่าง H_2 -bacteria และ Non- H_2 bacteria ในเชื้อแบคทีเรียผสมพบว่าความเข้มข้นไนโตรเจนที่เหมาะสมสำหรับแบคทีเรียที่ผลิตก๊าซไฮโดรเจนคือ 5.64 g/l และยังมีปริมาณไนโตรเจนเพิ่มขึ้นในน้ำเสียมากก็ยิ่งทำให้เกิดบิวไทเรทและโพโรไฟโอเนทมากขึ้นเช่นเดียวกันซึ่งหมายถึงการผันแปรของกรดอินทรีย์ระเหยในแต่ละตัวขึ้นกับค่าความเข้มข้นของไนโตรเจน

Shin และคณะ (2004) พบว่าก๊าซชีวภาพที่เกิดจากแบคทีเรียชนิด Thermophilic acidogenic นั้นไม่พบมีเทน แต่กลับพบในการใช้แบคทีเรียชนิด Mesophilic acidogenic ปริมาณ

ก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจากแบคทีเรียชนิด Thermophilic acidogenic มีค่ามากกว่าแบบ Mesophilic acidogenic เนื่องจากแบคทีเรียชนิด Thermophilic acidogenic ไม่ทำให้เกิดก๊าซมีเทนและเกิดโพรไฟโอเนตน้อย ที่สภาวะ Thermophilic นี้มีผลยับยั้งต่อการเกิดมีเทนและโพรไฟโอเนต ผลที่ได้จากการวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงความเหมาะสมของการผลิตไฮโดรเจนจากของเสียอินทรีย์ที่มีปริมาณคาร์โบไฮเดรตสูง เช่น ของเสียประเภทอาหาร โดยอาศัยแบคทีเรียชนิด Thermophilic acidogenesis

Liu และ Shen (2004) ศึกษาปัจจัยด้านพีเอชตั้งต้น (4.0-9.0) ที่มีผลต่อการเกิดไฮโดรเจนพบว่าที่พีเอช 4 ไม่เกิดไฮโดรเจนทั้งนี้ให้เหตุผลว่าการผลิตไฮโดรเจนจากแป้งจะถูกยับยั้งที่ค่าพีเอชต่ำ ๆ จากนั้นปริมาณไฮโดรเจนจะเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชเพิ่มจาก 5 ไป 8 แต่กลับลดลงเมื่อพีเอชเป็น 9 ค่าพีเอชตั้งต้นที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้มีค่า 7.0-8.0

Kim และคณะ (2004) ทำการศึกษาเรื่อง Anaerobic co-digestion ทั้งของเสียอาหารและกากตะกอนของเสียสำหรับการผลิตก๊าซไฮโดรเจนพบว่ามีการผลิตหลัก ๆ คือ n-butyrate, อะเซเตต และ โพรไฟโอเนต ในบรรดากากเหล่านี้ n-butyrate จะเกิดขึ้นพร้อมกับก๊าซไฮโดรเจนซึ่งปริมาณไฮโดรเจนสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าเป็นสัดส่วนกับจำนวน n-butyrate

Khanal และคณะ (2004) พบว่าค่าพีเอชตั้งต้นมีผลทั้งศักยภาพการเกิดไฮโดรเจน และอัตราการเกิดไฮโดรเจน สำหรับพีเอชตั้งต้นต่ำสุด 4.5 จะให้ปริมาณไฮโดรเจนได้มากที่สุด 214.0 ml H₂/g COD และ 125.0 ml H₂/g COD สำหรับซูโครสและแป้งตามลำดับ แต่กลับให้อัตราการเกิดไฮโดรเจนได้ต่ำสุด แม้ว่าการเกิดก๊าซไฮโดรเจนในช่วงต้นจะมีอัตราที่สูงที่ระดับพีเอชที่สูงแต่เป็นเพียงระยะเวลาสั้น และพบว่าช่วงพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการเกิดไฮโดรเจนคือ 5.5-5.7

Van Ginkel และคณะ (2005) แนะนำว่าการเติมสารอาหารเป็นผลทำให้ปริมาณการผลิตไฮโดรเจนสอดคล้องกับค่าความเข้มข้นของน้ำเสีย (COD) แต่ไม่ได้เพิ่มการผลิตไฮโดรเจนเสมอไป เป็นที่คาดว่าสารอาหารจะเสริมการผลิตไฮโดรเจนเมื่อใช้น้ำเสียที่มีวัตถุดิบหลักคือ น้ำตาล แต่การเติมสารอาหารกลับทำให้เกิดก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ถ้าคิดเป็นสัดส่วนปริมาณไฮโดรเจนที่ได้ต่อความเข้มข้น COD ของน้ำเสียพบว่ากรณีเติมสารอาหารมีค่าคงที่ อย่างไรก็ตามกรณีที่ไม่เติมสารอาหารค่าที่ได้จะแปรผันค่อนข้างมากและไม่เป็นสัดส่วนกับความเข้มข้น COD