

ผลของแหล่งคาร์บอนและจุลินทรีย์ที่มีต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจน
ในถังปฏิกิริยาไร้อากาศแบบไม่ต่อเนื่อง

ปริญญานิพนธ์

ของ

บุหงา รongไชย

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

พฤษภาคม 2548

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

546.2
บ 684 ๙
จ. 3

ผลของแหล่งคาร์บอนและจุลินทรีย์ที่มีต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจน
ในถังปฏิกิริยาไร้อากาศแบบไม่ต่อเนื่อง

บทคัดย่อ
ของ
บุหงา รongไชย

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
พฤษภาคม 2548

h 2548.22

129 น.ร. 2548

บุหงา รองไชย. (2548). ผลของแหล่งคาร์บอนและจุลินทรีย์ที่มีต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจน
ในถังปฏิกริยาไร้อากาศแบบไม่ต่อเนื่อง. ปรินทิพนิพนธ์ ทม. (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม)
กรุงเทพฯ : บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. คณะกรรมการควบคุม:
รองศาสตราจารย์ ดร.ยุวดี วัฒนโกศลสิน, อาจารย์สุภาภรณ์ ศิริโสภณา และ
อาจารย์ธัญญะ พรหมศร.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของแหล่งคาร์บอนและจุลินทรีย์ที่มีต่อการผลิตก๊าซ
ไฮโดรเจน ซึ่งได้ใช้แป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน โดยในการศึกษา
นั้นได้แบ่งออกเป็น 5 การทดลอง และใช้ความเข้มข้นของแป้ง 22 กรัมต่อลิตร ทุกการทดลอง
ซึ่งในการทดลองที่ 1 ได้ศึกษาและเปรียบเทียบความสามารถของตะกอนจากถังปฏิกริยาของระบบ
บำบัดน้ำเสียแบบยูเอสบี (UASB) จากบริษัท โรงเส้นไหม ช่อแฮ จำกัด และสลัดจ์จากถังหมัก
ตะกอนของโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำห้วยขวาง (AS) โดยใช้แป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเจ้า
เป็นแหล่งคาร์บอน ค่าพีเอชเริ่มต้น 5.5 เมื่อใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอนใช้สัญลักษณ์
1UASB และ 1AS ส่วนเมื่อใช้แป้งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอนใช้สัญลักษณ์ 2UASB และ 2AS ซึ่ง
ผลการทดลองพบว่า อัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนในถังปฏิกริยา 1AS 2AS 1UASB และ 2UASB
มีค่าเท่ากับ 0.22 0.94 1.04 และ 1.1 L/L/day ตามลำดับ ส่วนระยะเวลาที่เก็บที่เหมาะสมนั้นไม่
ควรเกิน 48 ชั่วโมง และในการทดลองที่ 2 เป็นการศึกษาผลของพีเอชเริ่มต้น เมื่อใช้ตะกอนจาก
ถังหมักตะกอนของระบบ AS ผลการทดลองพบว่าเมื่อใช้ค่าพีเอชเริ่มต้นในการหมักเป็น 4 5 6
และ 7 และแป้งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอนนั้น สามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ในอัตรา 0 0.58
1.00 และ 1.03 L/L/day. ตามลำดับ ส่วนในการทดลองที่ 3 เป็นการศึกษาผลของพีเอช
เริ่มต้น เมื่อใช้ตะกอนจากถังหมักตะกอนของระบบ AS ผลการทดลองพบว่าเมื่อใช้ค่าพีเอช
เริ่มต้นในการหมักเป็น 4 5 6 และ 7 และแป้งมันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอนนั้น สามารถผลิต
ก๊าซไฮโดรเจนได้ในอัตรา 0 0.42 0.78 และ 0.94 L/L/day ตามลำดับ ค่า Hydrogen yield
สูงสุดเป็น 4.95 m mole/g-COD เมื่อใช้แป้งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7

ในการทดลองที่ 4 เป็นการศึกษาผลของการขยายขนาดของถังปฏิกริยาที่มีต่อการผลิต
ก๊าซไฮโดรเจน จากการทดลองพบว่าเมื่อขยายขนาดของถังปฏิกริยาจากปริมาตรใช้งานจริง
1 ลิตร เป็น 4 ลิตร แล้ว พบว่ามีอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนมากขึ้นเท่ากับ 0.17 L/L/day
ส่วนการทดลองที่ 5 เป็นการศึกษาผลของการเติมเชื้อจุลินทรีย์บริสุทธิ์สายพันธุ์ SWU1 และ
SWU2 จากการทดลองพบว่าการเติมเชื้อจุลินทรีย์ทั้งสองสายพันธุ์ลงไป ทำให้ระบบผลิตก๊าซ
ชีวภาพได้เร็วกว่าถึงควบคุม 5 และ 6 ชั่วโมง ตามลำดับ แต่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนในก๊าซ
ชีวภาพนั้นมีค่าต่ำกว่าถึงควบคุม การทดลองทั้งหมดนี้กระทำที่อุณหภูมิห้อง และพบว่าอุณหภูมิใน
ถังปฏิกริยามีค่าอยู่ในช่วง 33 ± 1 องศาเซลเซียส

**THE EFFECT OF CARBON SOURCES AND MICROORGANISMS
ON HYDROGEN GAS PRODUCTION IN ANAEROBIC BATCH REACTOR**

AN ABSTRACT

BY

BU-NGA RONGCHAI

**Presented in partial fulfillment of the requirements
for the Master of Science degree in Environmental Science
at Srinakharinwirot university
May 2005**

Bu-nga Rongchai. (2005). *The Effect of Carbon Source and Microorganism on Hydrogen Gas Production in Anaerobic Batch Reactor*. Master thesis, M.S. (Environmental Science). Bangkok : Graduate School, Srinakharinwirot University. Advisor Committee: Assoc. Prof. Dr.Yuwadee Watanapokasin, Supaporn Sirisopana and Thanya Promsorn.

The aim of this research was to study the effect of carbon sources and microorganisms on hydrogen gas production from cassava starch and rice flour in anaerobic batch reactors. This study consisted of 5 experiments, all with fixed concentration of cassava starch and rice flour at 22 g/L. Firstly, to compare hydrogen production ability from different sources of microorganisms from UASB reactor of Cho Heng Rice Vermicelli Factory and from municipal solid waste in digested sludge tank of Huay Khwang municipal wastewater treatment plant (AS) . Initial pH 5.5 . Using cassava starch as a carbon source in the reactors were named as 1UASB and 1AS, whereas using rice flour as a carbon source known as 2UASB and 2AS. The result indicated that hydrogen production rate of reactors 1AS, 2AS, 1UASB and 2UASB were 0.22, 0.94, 1.04 and 1.1 L/L/day, respectively. The best retention time for hydrogen gas production must not exceed 48 hrs. Secondly, to study the effect of different initial pH when using AS sludge with cassava starch as a carbon sources. The result showed that the hydrogen production rate of reactor with initial pH 4, 5, 6 and 7 were 0, 0.42 0.78 and 0.94 L/L/day. Thirdly, to study the effect of different initial pH when using AS sludge with rice flour as a carbon source. The result showed that the hydrogen production rate of reactor with initial pH 4, 5, 6 and 7 were 0, 0.58 ,1.00 and 1.03 L/L/day. Maximum hydrogen yield obtained at 4.95 m mole/g-COD from rice flour with initial pH 7.

Fourthly, to study the ability of hydrogen gas production rate in a scaled-up reactor from 1 L to 4 L .The result showed that the efficiency of hydrogen gas production rate of the larger reactor was better than the smaller 0.17 L/L/day . Finally, the culture of pure bacteria strain SWU1 and SWU2 were added into mixed culture (AS) .The results indicated that adding SWU1 and SWU2, increased biogas production up to 5 and 6 hr faster than the control, respectively but the concentration of hydrogen were low than the control. All of experiments were performed at ambient temperature and the temperature in the reactors were 33 ± 1 °C.

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

ผลของแหล่งคาร์บอนและจุลินทรีย์ที่มีต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจน
ในถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบไม่ต่อเนื่อง

ของ

นางสาวบุหงา ร่องไชย

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ



..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญสิริ จีระเดชากุล)

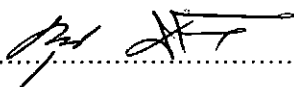
วันที่....๑๕....เดือน....พฤษภาคม....พ.ศ.2548

คณะกรรมการสอบปริญญานิพนธ์



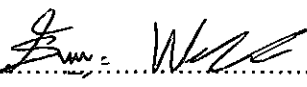
..... ประธาน

(รองศาสตราจารย์ ดร.ยุวดี วัฒนโกศลสิน)



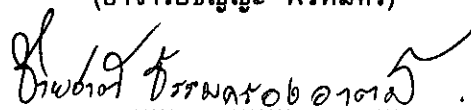
..... กรรมการ

(อาจารย์สุภาภรณ์ ศิริโสภณา)



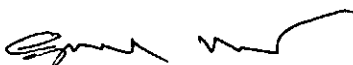
..... กรรมการ

(อาจารย์รัชฎูญะ พรหมศรี)



..... กรรมการที่แต่งตั้งเพิ่มเติม

(อาจารย์ชายชาติ ธรรมครองอาตม์)



..... กรรมการที่แต่งตั้งเพิ่มเติม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ยุทธนา มหัจฉริยวงศ์)

ประกาศคุณูปการ

งานวิจัยนี้สำเร็จลงได้ เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือจากหลายๆ ฝ่าย ผู้วิจัยขอขอบคุณเป็นอย่างยิ่ง ขอขอบพระคุณ อาจารย์สุภาภรณ์ ศิริโสภณา รศ.ดร. ยุวดี วัฒนโกศาสิน และอาจารย์ ธัญญะ พรหมศร ที่ได้คอยให้คำปรึกษาและแนะนำในการทำวิจัย ตลอดจนช่วยเหลือผู้วิจัยในด้านต่างๆ จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบพระคุณ คุณบุญชัย ศิริโสภณา และ Dr. John Middleton ที่ได้ให้ความช่วยเหลือด้านทุนทรัพย์ในการเริ่มต้นของงานวิจัย ขอขอบคุณเป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณสำนักงานนโยบายและแผนพลังงานแห่งชาติซึ่งเป็นเจ้าของเงินทุนในการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ คุณสันติ จำรูญรัตน์ ผู้จัดการแผนกห้องปฏิบัติการวิเคราะห์ พร้อมทั้งคุณมรติ วีรุตตะเศรษฐ พนักงานแผนกห้องปฏิบัติการวิเคราะห์ ของบริษัท โรงกลั่นบางจากปิโตรเลียม จำกัดมหาชน ที่ให้ความกรุณาให้ผู้วิจัยใช้เครื่อง GC และคอยอำนวยความสะดวกและช่วยเหลือให้คำแนะนำผู้วิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ บริษัทโรงเส้นไหมช่อเฮง เอรารวรรณ จำกัด จังหวัดนครปฐม และโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำห้วยขวาง ที่ได้ให้ตะกอนมาศึกษา

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณคุณพ่อ คุณแม่ พี่สาว พี่เขย น้องชาย และญาติๆ ทุกคนที่คอยให้กำลังใจและช่วยเหลือผู้วิจัยมาโดยตลอด และขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ๆ และทุกคนที่มีส่วนทำให้ปริญญาณิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

บุหงา รongไชย

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย

จาก

สำนักงานนโยบายและแผนพลังงานแห่งชาติ

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
ภูมิหลัง	1
ความมุ่งหมายของการวิจัย	3
ความสำคัญของการวิจัย	3
ขอบเขตของการวิจัย	4
ตัวแปรที่ศึกษา	5
นิยามศัพท์เฉพาะ	5
กรอบแนวคิดในการวิจัย	8
สมมุติฐานในการวิจัย	9
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	10
ไฮโดรเจน	10
ระบบบำบัดน้ำเสียชนิดไร้ออกซิเจน	20
ความรู้เบื้องต้นและความสำคัญของแป้ง	29
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	31
3 วิธีดำเนินการวิจัย	36
การออกแบบและสร้างถังปฏิกริยาไร้อากาศแบบไม่ต่อเนื่อง	36
อุปกรณ์สำหรับเก็บก๊าซและอุปกรณ์สำหรับไล่อากาศในถังเก็บก๊าซ	36
การเตรียมตะกอนจุลินทรีย์และน้ำแป้งสังเคราะห์เพื่อใช้ในการทดลอง	39
การทดลองเพื่อผลิตก๊าซไฮโดรเจน	41
การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์	42
การศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซไฮโดรเจน	43
โดยการเติมเชื้อจุลินทรีย์บริสุทธิ์ลงในถังปฏิกริยา	43
4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	45
การทดลองที่ 1 ศึกษาและเปรียบเทียบผลของแหล่งตะกอนที่มีผลต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจนของแหล่งคาร์บอนแต่ละชนิด	46
การทดลองที่ 2 ศึกษาค่าพีเอชเริ่มต้นที่มีต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจน	56
เมื่อใช้ตะกอนจากระบบ AS และแป้งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน	56

สารบัญ(ต่อ)

บทที่		หน้า
	การทดลองที่ 2 ศึกษาค่าพีเอชเริ่มต้นที่มีต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจน.....	
	เมื่อใช้ตะกอนจากระบบ AS และแบ่งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน.....	56
	การทดลองที่ 3 ศึกษาค่าพีเอชเริ่มต้นที่มีต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจน	
	เมื่อใช้ตะกอนจากระบบ AS และแบ่งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน.....	63
	การทดลองที่ 4 ศึกษาและเปรียบเทียบ ผลของการขยายขนาดของ	
	ถังปฏิกริยาที่มีผลต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจน.....	72
	การทดลองที่ 5 ศึกษาผลของการเติมเชื้อจุลินทรีย์บริสุทธิ์ ที่มีต่อการ	
	ผลิตก๊าซไฮโดรเจน.....	78
5	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	82
	สรุปผลการทดลอง	82
	ข้อเสนอแนะ.....	84
	บรรณานุกรม	86
	ภาคผนวก ก วิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ.....	91
	ภาคผนวก ข การใช้เครื่องมือ.....	95
	ภาคผนวก ค การคำนวณ	98
	ภาคผนวก ง ภาพประกอบ.....	101
	ภาคผนวก จ ผลการทดลอง.....	106
	ภาคผนวก ฉ ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซ.....	123
	ประวัติย่อผู้วิจัย.....	150

บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 แสดงสมบัติพื้นฐานของไฮโดรเจน.....	11
2 แสดงคุณค่าทางความร้อนของเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ.....	13
3 แสดงค่าพารามิเตอร์ และความถี่ในการเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อตรวจวิเคราะห์.....	44
4 แสดงลักษณะทั่วไปของตะกอน.....	46
5 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ตรวจวัดได้เมื่อทำการทดลอง.....	
ในถังปฏิกริยาขนาด 4 ลิตร.....	73
6 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ตรวจวัดได้เมื่อมีการเติมเชื้อจุลินทรีย์บริสุทธิ์.....	80

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 ลักษณะขั้นตอนของปฏิกิริยาย่อยสลายสารอินทรีย์.....	
ในสภาวะไร้ออกซิเจน.....	23
2 ขั้นตอนการย่อยสลาย ไวมัน โปรตีน และคาร์โบไฮเดรต.....	
แบบไร้ออกซิเจน.....	28
3 แสดงการจัดวางถังปฏิกิริยาขนาด 1.10 ลิตร ที่ต่ออยู่กับสำหรับเก็บก๊าซ.....	37
4 แสดงการจัดวางถังปฏิกิริยาขนาด 5.51 ลิตร ที่ต่ออยู่กับสำหรับเก็บก๊าซ.....	38
5 แสดงลักษณะของอุปกรณ์สำหรับใส่อากาศออกจากถุงเก็บตัวอย่างก๊าซ.....	40
6 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ MLVSS ในถังปฏิกิริยา 1AS 2AS.....	
1UASB และ 2UASB.....	47
7 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช ในถังปฏิกิริยา 1AS 2AS.....	
1UASB และ 2UASB.....	49
8 แสดงร้อยละของการกำจัดซีโอटीของแต่ละถังปฏิกิริยาในถังปฏิกิริยา 1AS 2AS	
1UASB และ 2UASB.....	50
9 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารตัวกลางในถังปฏิกิริยา 1AS.....	51
10 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารตัวกลางในถังปฏิกิริยา 2AS.....	52
11 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารตัวกลางในถังปฏิกิริยา 1UASB.....	52
12 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารตัวกลางในถังปฏิกิริยา 2UASB.....	53
13 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ในแต่ละถังปฏิกิริยา.....	54
14 แสดงปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้ในแต่ละถังปฏิกิริยา.....	55
15 แสดงร้อยละของไฮโดรเจนในก๊าซชีวภาพ ทั้ง 5 วัน ในแต่ละถังปฏิกิริยา.....	55
16 แสดงค่าความเข้มข้นของ MLVSS ในถังปฏิกิริยาที่มีพีเอชเริ่มต้นค่าต่างๆ.....	
เมื่อใช้แป้งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน.....	56
17 แสดงค่าพีเอชของวันที่ 1 และ วันที่ 2 ในถังปฏิกิริยาที่มีพีเอชเริ่มต้นค่าต่าง ๆ.....	
เมื่อใช้แป้งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน.....	57
18 แสดงร้อยละของการกำจัดซีโอटीในถังปฏิกิริยาที่มีพีเอชเริ่มต้นค่าต่างๆ.....	
เมื่อใช้แป้งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน.....	58

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ

หน้า

19	แสดงความเข้มข้นของสารตัวกลางที่เกิดขึ้นในถังปฏิกริยาที่มีพีเอชเริ่มต้นค่าต่าง ๆ..... เมื่อใช้แป้งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน.....	59
20	ปริมาณของก๊าซชีวภาพในถังปฏิกริยาที่มีพีเอชเริ่มต้นค่าต่าง ๆ..... เมื่อใช้แป้งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน.....	60
21	แสดงปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นในถังปฏิกริยาที่มีพีเอชเริ่มต้นค่าต่าง ๆ..... เมื่อใช้แป้งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน.....	61
22	แสดงร้อยละของก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นในถังปฏิกริยาที่มีพีเอชเริ่มต้นค่าต่าง ๆ..... เมื่อใช้แป้งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน.....	61
23	แสดงอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนในถังปฏิกริยาที่มีพีเอชเริ่มต้นค่าต่าง ๆ..... เมื่อใช้แป้งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน.....	62
24	แสดงประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแป้งไปเป็นก๊าซไฮโดรเจนในถังปฏิกริยา..... ที่มีพีเอชเริ่มต้นค่าต่าง ๆ เมื่อใช้แป้งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน.....	63
25	แสดงความเข้มข้นของ MLVSS ในถังปฏิกริยาที่มีพีเอชเริ่มต้นค่าต่าง ๆ..... เมื่อใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอน.....	64
26	แสดงการเปลี่ยนแปลงของพีเอชในถังปฏิกริยาที่มีพีเอชเริ่มต้นค่าต่าง ๆ..... เมื่อใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอน.....	64
27	แสดงร้อยละของการกำจัดซีโอดีในถังปฏิกริยา ในถังปฏิกริยาที่มีพีเอชเริ่มต้นค่าต่าง ๆ.. เมื่อใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอน.....	66
28	แสดงความเข้มข้นของสารตัวกลาง ในถังปฏิกริยาที่มีพีเอชเริ่มต้นค่าต่าง ๆ..... เมื่อใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอน.....	67
29	แสดงปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น ในถังปฏิกริยาที่มีพีเอชเริ่มต้นค่าต่าง ๆ..... เมื่อใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอน.....	68
30	แสดงปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นในถังปฏิกริยาที่มีพีเอชเริ่มต้นค่าต่าง ๆ..... เมื่อใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอน.....	69
31	แสดงร้อยละของก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นในถังปฏิกริยาที่มีพีเอชเริ่มต้นค่าต่าง ๆ..... เมื่อใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอน.....	69
32	แสดงอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนในถังปฏิกริยาที่มีพีเอชเริ่มต้นค่าต่าง ๆ..... เมื่อใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอน.....	70

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
33 แสดงประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแก๊สไปเป็นก๊าซไฮโดรเจนในถังปฏิกรณ์ที่มี..... พีเอชเริ่มต้นต่าง ๆ เมื่อใช้แก๊สสำหรับปฏิกิริยาเป็นแหล่งคาร์บอน.....	71
34 แสดงการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของค่า MLVSS..... ในถังปฏิกรณ์ที่มีปริมาตรใช้งานจริงขนาด 4 ลิตร และถังปฏิกรณ์..... ที่มีปริมาตรใช้งานจริงขนาด 1 ลิตร	74
35 แสดงการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอช..... ในถังปฏิกรณ์ที่มีปริมาตรใช้งานจริงขนาด 4 ลิตร และถังปฏิกรณ์..... ที่มีปริมาตรใช้งานจริงขนาด 1 ลิตร	75
36 แสดงการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของค่าซีโอดี..... ในถังปฏิกรณ์ที่มีปริมาตรใช้งานจริงขนาด 4 ลิตร และถังปฏิกรณ์..... ที่มีปริมาตรใช้งานจริงขนาด 1 ลิตร	74
37 แสดงความเข้มข้นของสารตัวกลางที่เกิดขึ้น..... ในถังปฏิกรณ์ที่มีปริมาตรใช้งานจริงขนาด 4 ลิตร และถังปฏิกรณ์..... ที่มีปริมาตรใช้งานจริงขนาด 1 ลิตร	76
38 แสดงการเปรียบเทียบอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพและอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจน..... ในถังปฏิกรณ์ที่มีปริมาตรใช้งานจริงขนาด 4 ลิตร และถังปฏิกรณ์..... ที่มีปริมาตรใช้งานจริงขนาด 1 ลิตร	77
39 แสดงการไล่อากาศออกจากถังเก็บก๊าซ โดยใช้วิธีการแทนที่น้ำ.....	96
40 แสดงลักษณะของถังเก็บก๊าซก่อนที่จะนำไปเก็บตัวอย่างก๊าซ.....	102
41 แสดงลักษณะของถังเก็บก๊าซหลังจากที่เก็บตัวอย่างก๊าซแล้ว.....	102
42 แสดงวิธีการเก็บตัวอย่างก๊าซเพื่อนำไปวิเคราะห์.....	103
43 แสดงวิธีการเติมน้ำเข้าไปในถังปรับความดัน.....	103
44 แสดงลักษณะการจัดวางถังปฏิกรณ์ขนาด 1.1 ลิตร และอุปกรณ์สำหรับเก็บก๊าซ.....	104
45 แสดงลักษณะการจัดวางถังปฏิกรณ์ขนาด 5.51 ลิตร และอุปกรณ์สำหรับเก็บก๊าซ.....	104
46 แสดงลักษณะของเชื้อจุลินทรีย์บริสุทธิ์สายพันธุ์ SWU1 (ข้าว) และ SWU2 (ขมิ้น).....	105
47 แสดงลักษณะของสไลด์จากถังหมักตะกอน ของโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำ..... ห้วยขวาง (ข้าว) และตะกอนชนิดเม็ดจากถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบี ของบริษัท..... โรงเส้นไหม ขอนแก่น จำกัด (ขมิ้น).....	105

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
48 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซของถังปฏิกริยา 1AS.....	
วันที่ 1 ของการหมัก (การทดลองที่ 1).....	124
49 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซของถังปฏิกริยา 2AS.....	
วันที่ 1 ของการหมัก (การทดลองที่ 1).....	125
50 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซของถังปฏิกริยา 1UASB.....	
วันที่ 1 ของการหมัก (การทดลองที่ 1).....	126
51 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซของถังปฏิกริยา 2UASB.....	
วันที่ 1 ของการหมัก (การทดลองที่ 1).....	127
52 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซของถังปฏิกริยา 1AS.....	
วันที่ 2 ของการหมัก (การทดลองที่ 1).....	128
53 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซ ของถังปฏิกริยา 2AS.....	
วันที่ 2 ของการหมัก (การทดลองที่ 1).....	129
54 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซ ในถังปฏิกริยา 1UASB.....	
วันที่ 2 ของการหมัก (การทดลองที่ 1).....	130
55 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซในถังปฏิกริยา 2UASB.....	
วันที่ 2 ของการหมัก (การทดลองที่ 1).....	131
56 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซในถังปฏิกริยา 1AS.....	
วันที่ 3 ของการหมัก(การทดลองที่ 1).....	132
57 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซ ในถังปฏิกริยา 2AS.....	
วันที่ 3 ของการหมัก การทดลองที่ 1.....	133
58 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซในถังปฏิกริยา 1UASB.....	
วันที่ 3 ของการหมัก (การทดลองที่ 1).....	134
59 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซ ในถังปฏิกริยา 2UASB.....	
วันที่ 3 ของการหมัก (การทดลองที่ 1).....	135
60 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซ ของถังปฏิกริยา 1UASB.....	
วันที่ 4 ของการหมัก (การทดลองที่ 1).....	136
61 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซของถังปฏิกริยา 2UASB.....	
วันที่ 4 ของการหมัก (การทดลองที่ 1).....	137

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
62 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซของถังปฏิบัติการพีเอชเริ่มต้น 4..... แบ่งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน (การทดลองที่ 2).....	138
63 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซของถังปฏิบัติการพีเอชเริ่มต้น 5..... แบ่งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน (การทดลองที่ 2).....	139
64 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซ ของถังปฏิบัติการพีเอชเริ่มต้น 6..... แบ่งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน (การทดลองที่ 2).....	140
65 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซของถังปฏิบัติการพีเอชเริ่มต้น 7..... แบ่งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน (การทดลองที่ 2).....	141
66 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซของถังปฏิบัติการพีเอชเริ่มต้น 4..... แบ่งมันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอน (การทดลองที่ 3).....	142
67 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซของถังปฏิบัติการพีเอชเริ่มต้น 5..... แบ่งมันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอน (การทดลองที่ 3).....	143
68 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซของถังปฏิบัติการพีเอชเริ่มต้น 6..... แบ่งมันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอน (การทดลองที่ 3).....	144
69 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซของถังปฏิบัติการพีเอชเริ่มต้น 7..... แบ่งมันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอน (การทดลองที่ 3).....	145
70 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซของถังปฏิบัติการขนาด 4 ลิตร..... แบ่งมันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอน(การทดลองที่ 4).....	146
71 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซของถังปฏิบัติการพีเอชเริ่มต้น 7..... แบ่งมันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอน เดิมเชื้อจุลินทรีย์บริสุทธิ์สายพันธุ์ SWU1..... (การทดลองที่ 5).....	147
72 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซของถังปฏิบัติการพีเอชเริ่มต้น 7..... แบ่งมันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอน เดิมเชื้อจุลินทรีย์บริสุทธิ์สายพันธุ์ SWU2... (การทดลองที่ 5).....	148

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ภูมิหลัง

ประเทศไทยจัดอยู่ในกลุ่มประเทศกำลังพัฒนา จึงทำให้มีการขยายตัวทั้งภาคธุรกิจและภาคอุตสาหกรรมอย่างรวดเร็ว จะเห็นว่าพลังงานเป็นปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญเป็นอย่างยิ่งต่อการพัฒนาประเทศ เนื่องจากในอุตสาหกรรมการผลิต การคมนาคมขนส่ง การเกษตรกรรม ตลอดจนการดำเนินชีวิตประจำวันของประชาชนนั้นจำเป็นที่จะต้องใช้พลังงานทั้งสิ้น จากการรายงานสถานการณ์พลังงานของประเทศไทยปี พ.ศ. 2543 พบว่าประเทศไทยมีการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นจากปี พ.ศ.2542 ร้อยละ 1.3 โดยใช้พลังงานสมัยใหม่อันประกอบด้วย น้ำมันสำเร็จรูป ก๊าซธรรมชาติ ถ่านหินและไฟฟ้า เพิ่มขึ้นร้อยละ 1.0 และใช้พลังงานหมุนเวียน เช่น พิน แกลบ และกากอ้อย เพิ่มขึ้นร้อยละ 2.7 ซึ่งพลังงานเหล่านี้มีทั้งการผลิตภายในประเทศและการนำเข้าจากแหล่งต่างประเทศ ทั้งนี้พบว่าในปี พ.ศ. 2543 ได้มีการนำเข้าพลังงานรวมทั้งสิ้นเทียบเท่าน้ำมันดิบ 39,730,000 ตัน ซึ่งเพิ่มขึ้นจากปี พ.ศ. 2542 ถึงร้อยละ 2.0 และคิดเป็นมูลค่าการนำเข้ารวมทั้งสิ้นมากถึง 313,816 ล้านบาท เพิ่มขึ้นจากปี พ.ศ. 2542 ร้อยละ 68.5 จะเห็นว่าการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศนั้นมีมูลค่าสูงมาก ดังนั้นจึงควรหาแนวทางในการเพิ่มกำลังการผลิตพลังงานจากแหล่งภายในประเทศให้มากขึ้น เพื่อจะได้ลดการนำเข้าพลังงานจากแหล่งต่างประเทศลงได้ (กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน. 2543 : I – II)

นักวิทยาศาสตร์ได้มีการคาดการณ์ปริมาณพลังงานจากฟอสซิล (Fossil fuels) สำรองของโลก โดยพิจารณาจากอัตราการเพิ่มของประชากรและความต้องการใช้พลังงานของโลกแล้วพบว่าปริมาณน้ำมันดิบที่มีสำรองในธรรมชาตินั้นจะหมดไปในระหว่าง ปี ค.ศ. 2020 – 2040 (Pohl. 1995 : summary) จากอดีตจนถึงปัจจุบันจะเห็นว่าการใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้นนั้น ได้ทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก ทั้งนี้เนื่องจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนนั้นจะทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และ ออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) ซึ่งพบว่าร้อยละ 50 ของก๊าซที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อนหรือภาวะเรือนกระจก (Greenhouse effect) นั้นคือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ นอกจากนี้แล้วยังพบว่าออกไซด์ของไนโตรเจนนั้น ก็ยังเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่มีส่วนทำให้โอโซนในชั้นบรรยากาศลดลงไปได้ด้วย ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่ควรหาแหล่งพลังงานเพื่อมาทดแทนพลังงานจากฟอสซิลที่กำลังจะหมดไป (Pohl. 1995 : summary) พร้อมทั้งแก้ปัญหามลพิษทางอากาศ และลดปริมาณก๊าซที่เป็นตัวการสำคัญที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก

พลังงานจากไฮโดรเจนเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยแก้ปัญหาวิกฤตการณ์ด้านพลังงานของโลกในอนาคตได้ และยังช่วยรักษาสีเขียวสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ไฮโดรเจนยังมีน้ำหนักเบา เป็นพลังงานสะอาด เผาไหม้แล้วจะได้น้ำ ให้พลังงานความร้อนต่อน้ำหนักโมเลกุลสูงและสามารถจัดเก็บอยู่ในรูปของเมทัลไฮไดรด์ ได้ (Metal hydride) (Billings. 1991 : 66 – 76)

กระบวนการในการผลิตไฮโดรเจนนั้นมีอยู่หลายวิธี เช่น กระบวนการรีฟอร์มมิงเมทานอลด้วยไอน้ำ (Methanol reforming) กระบวนการแยกน้ำด้วยไฟฟ้า (Electrolysis) กระบวนการทางเทอร์โมเคมีคอล (Thermochemical process) และกระบวนการผลิตไฮโดรเจนทางชีวภาพ (Biological process) ซึ่งแต่ละกระบวนการนั้นก็ยังมีขั้นตอนในการผลิตที่แตกต่างกันออกไป และพบว่าในบางกระบวนการนั้น ในขั้นตอนของการผลิตยังเกิดสารที่ก่อให้เกิดมลพิษทางสิ่งแวดล้อมได้ ปัจจุบันกระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนทางชีวภาพกำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างยิ่ง ทั้งนี้เพราะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดของเสียและน้ำเสียจากกระบวนการผลิตได้ด้วย ซึ่งนอกจากจะบำบัดน้ำเสียแล้ว ยังได้ไฮโดรเจนซึ่งเป็นพลังงานสะอาด เผาไหม้แล้วไม่เกิดสารที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย (Hansel & Lindblan. 1998 : 153 – 160)

สำหรับประเทศไทยมีการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยี Fuel cell และการศึกษาการดัดแปลงใช้เชื้อเพลิงไฮโดรเจนกับยานพาหนะอยู่เช่นกัน (สถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2538 : 2) แต่ยังไม่ปรากฏว่ามีการพัฒนาการผลิตก๊าซไฮโดรเจนที่จะนำมาเป็นแหล่งพลังงานที่จะใช้กับ fuel cell เลย ทั้ง ๆ ที่ประเทศไทยก็เป็นประเทศเกษตรกรรมมีวัตถุดิบสำหรับการผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยใช้เทคโนโลยีชีวภาพอยู่อย่างมากมาย และเนื่องจากว่าในช่วงที่ผ่านมาได้มีการสนับสนุนและส่งเสริมอุตสาหกรรมการเกษตรและอาหารแปรรูปอย่างมาก จึงทำให้มีโรงงานที่ใช้วัตถุดิบทางการเกษตรเพิ่มมากขึ้น และแน่นอนว่าปริมาณน้ำเสียที่จะต้องบำบัดก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งถ้าสามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียเพื่อนำมาใช้เป็นพลังงานหมุนเวียนได้ก็จะเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่จะช่วยลดต้นทุนในการผลิตลงไปได้ (เกรียงศักดิ์ เลิศประภามงคล. 2546 : 19) และเป็นการกระตุ้นให้ผู้ประกอบการมีความสนใจที่จะบำบัดน้ำเสีย

ในแต่ละปีประเทศไทยมีผลิตผลทางการเกษตรเป็นปริมาณมาก เช่น ข้าว ข้าวโพด และมันสำปะหลัง เป็นต้น วัสดุดังกล่าวแม้จะถูกแปรรูปไปเป็นแป้งชนิดต่าง ๆ แล้ว ก็ยังมีราคาไม่แพง ดังนั้นถ้าสามารถนำมาผลิตก๊าซไฮโดรเจนก็จะเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุดังกล่าวได้ จากเหตุผลตามที่ได้กล่าวมาแล้วจึงทำให้ผู้วิจัยมีความสนใจที่จะศึกษาการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากระบบไร้อากาศโดยใช้แป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน ทั้งนี้เพื่อเป็นการค้นหาแนวทางในการเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตผลทางการเกษตร และเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับแนวคิดในการใช้ประโยชน์จากน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการแปรรูปทางอุตสาหกรรมของวัสดุดังกล่าวนี้ โดยนำมาผลิตก๊าซไฮโดรเจนซึ่งเป็นพลังงานหมุนเวียน และยังเป็นอีกทางเลือกหนึ่งของแหล่งพลังงานแหล่งใหม่ในอนาคต ที่จะนำมา

ทดแทนพลังงานฟอสซิลที่กำลังจะหมดไปในอนาคตอันใกล้นี้ นอกจากนี้แล้วยังอาจช่วยลดค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียจากแป้งได้อีกด้วย

1.2 ความมุ่งหมายในการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ตั้งความมุ่งหมายของการวิจัยไว้ดังนี้คือ

- 1.2.1 ศึกษาการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากแหล่งคาร์บอนราคาถูก ได้แก่ แป้งมันสำปะหลัง และแป้งข้าวเจ้า
- 1.2.2 เปรียบเทียบปริมาณและอัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจนเมื่อใช้แหล่งคาร์บอนต่างชนิดกัน
- 1.2.3 เปรียบเทียบปริมาณและอัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจน เมื่อใช้จุลินทรีย์จากแหล่งที่ต่างกัน
- 1.2.4 เปรียบเทียบค่า พีเอช (pH) เริ่มต้นที่มีผลต่อปริมาณและอัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจนของแหล่งคาร์บอนแต่ละชนิด
- 1.2.5 ศึกษาผลของการเติมเชื้อจุลินทรีย์บริสุทธิ์ที่มีผลต่อปริมาณและอัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจน
- 1.2.6 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของ เอ็มแอลวีเอสเอส (MLVSS) พีเอช ซีโอดี และกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (VFA) ที่เกิดขึ้นในระบบ

1.3 ความสำคัญของการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการผลิตก๊าซไฮโดรเจนด้วยวิธีทางชีวภาพ (Biological process) โดยได้ทำการศึกษาในถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch reactor) ซึ่งมีความสำคัญดังนี้คือ

- 1.3.1 ได้แนวทางในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากแหล่งคาร์บอนราคาถูก ได้แก่ แป้งมันสำปะหลัง และแป้งข้าวเจ้า ซึ่งเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตผลทางการเกษตรของไทย
- 1.3.2 ได้ข้อมูลเบื้องต้นที่สามารถนำไปใช้พัฒนาการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมแปรรูปผลิตผลทางการเกษตร ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นพลังงานหมุนเวียนภายในโรงงาน เพื่อช่วยลดต้นทุนในการจัดซื้อเชื้อเพลิงลงได้
- 1.3.3 ได้แนวทางในการผลิตพลังงานสะอาดจากแหล่งใหม่ ซึ่งสามารถใช้เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะนำมาทดแทนพลังงานจากฟอสซิล (Fossil fuels) นอกจากนั้นแล้วยังช่วยลดปัญหามลพิษทางอากาศได้ด้วย

ผลของการวิจัยในครั้งนี้ จึงเป็นแนวทางในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนด้วยวิธีทางชีวภาพอีกวิธีหนึ่ง ซึ่งจะเป็นข้อมูลพื้นฐานที่จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอนาคตต่อไปได้

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

การทดลองศึกษาการผลิตก๊าซไฮโดรเจนในถังปฏิกริยาไร้อากาศแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch reactor) ในครั้งนี้ ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 5 การทดลอง ดังนี้คือ

1.4.1 การทดลองที่ 1 ศึกษาและเปรียบเทียบผลของแหล่งจุลินทรีย์ที่มีผลต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจนของแหล่งคาร์บอนแต่ละชนิด ซึ่งในการทดลองครั้งนี้ใช้ตะกอนจุลินทรีย์จาก 2 แหล่งด้วยกัน ดังนี้คือ ใช้สลัดจ์ (Sewage sludge) จากถังหมักตะกอน (Digested sludge tank) ของระบบบำบัดน้ำเสียแบบ AS (Activated sludge system) ของโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำห้วยขวาง จังหวัดกรุงเทพมหานคร และตะกอนจุลินทรีย์ชนิดเม็ด (Granule sludge) ของระบบบำบัดน้ำเสียแบบ UASB (Upflow anaerobic sludge blanket) ของบริษัทโรงเส้นไหม ช่อแฮง จำกัด จังหวัดนครปฐม ในการทดลองครั้งนี้ใช้ค่า พีเอช เป็นเริ่มต้น 5.5 โดยทำการทดลองและติดตามผลของการเปลี่ยนแปลง มีระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน

1.4.2 การทดลองที่ 2 ศึกษาผลของค่าพีเอชเริ่มต้นที่มีต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจน เมื่อใช้ตะกอนจุลินทรีย์จากสลัดจ์ของถังหมักตะกอน ระบบ AS และแบ่งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน โดยแปรเปลี่ยนค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4 5 6 และ 7 ตามลำดับ ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน

1.4.3 การทดลองที่ 3 ศึกษาผลของค่าพีเอชเริ่มต้นที่มีต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจน เมื่อใช้ตะกอนจุลินทรีย์จากสลัดจ์ของถังหมักตะกอน ระบบ AS และแบ่งมันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอน โดยแปรเปลี่ยนค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4 5 6 และ 7 ตามลำดับ รอบการทำงาน 2 วัน

1.4.4 การทดลองที่ 4 ศึกษาและเปรียบเทียบผลของการขยายขนาดของถังปฏิกริยาที่มีผลต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจน โดยเลือกชนิดของแบ่งและค่าพีเอชเริ่มต้นจากการทดลองที่ 2 และการทดลองที่ 3 ที่สามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้สูงที่สุด ทั้งนี้พิจารณาจากปัจจัยหลาย ๆ ด้าน ภาชนะขนาดขึ้นมาผลิตในถังปฏิกริยาขนาดความจุ 5.51 ลิตร ซึ่ง กว้าง 18 เซนติเมตร ยาว 18 เซนติเมตร และสูง 17 เซนติเมตร ซึ่งมีปริมาตรใช้งานจริง 4 ลิตร และทำการทดลองทั้งหมด 3 ครั้ง ๆ ละ 3 ถึง ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน

1.4.5 การทดลองที่ 5 ศึกษาผลของการเติมเชื้อจุลินทรีย์บริสุทธิ์ ที่มีต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจน โดยเลือกชนิดของแบ่งและค่าพีเอชเริ่มต้นจากการทดลองที่ 2 และการทดลองที่ 3 ที่สามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้สูงที่สุด มาเติมเชื้อจุลินทรีย์บริสุทธิ์สายพันธุ์ SWU1 และ SWU2 ตามลำดับ ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน

ในการทดลองที่ 1 - 3 และการทดลองที่ 5 นี้ ทำการทดลองในถังปฏิกริยาขนาดความจุ 1.10 ลิตร ซึ่งมีปริมาตรใช้งานจริง 1 ลิตร และความเข้มข้นของแบ่งเริ่มต้นเป็น 22 กรัมต่อลิตร โดยทำการทดลองทั้งหมด 5 ครั้ง ๆ ละ 4 ถึง

การทดลองทั้งหมดนี้ได้ติดตั้งเครื่องมือเพื่อทำการทดลองที่ห้อง 15-624 และทำการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ห้อง 15 – 623 ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป และห้องปฏิบัติการของภาควิชาชีวเคมี คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ และทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์ของบริษัท บางจากปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน) ซึ่งตั้งอยู่ ถ.สุขุมวิท 64 เขตพระโขนง จ. กรุงเทพมหานคร

ก. ตัวแปรที่ศึกษา

1. ตัวแปรอิสระ แบ่งเป็นดังนี้

- 1.1 แหล่งจุลินทรีย์ ได้แก่ ตะกอนจุลินทรีย์จากสลัดจ์ในถังหมักตะกอนของระบบเอเอส และ ตะกอนจากถังปฏิกริยาของระบบยูเอเอสบี
- 1.2 แหล่งคาร์บอนได้แก่ แป้งมันสำปะหลัง และแป้งข้าวเจ้า
- 1.3 ค่าพีเอชเริ่มต้น ได้แก่ 4 5 6 และ 7
- 1.4 ชนิดของเชื้อจุลินทรีย์บริสุทธิ์ ได้แก่ SWU1 และ SWU2

2. ตัวแปรตาม

- 2.1 อัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจน
- 2.2 ร้อยละของก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้
- 2.3 ซีไอดีของน้ำที่ออกจากระบบ
- 2.4 กรดอินทรีย์ระเหยง่าย

3. ตัวแปรควบคุม

- 3.1 ความเข้มข้นของน้ำแป้งสังเคราะห์
- 3.2 ปริมาตรของตะกอนเริ่มต้น
- 3.3 รอบของการกวน

ข. นิยามศัพท์เฉพาะ

1. ถังปฏิกริยาไร้อากาศแบบไม่ต่อเนื่อง (Anaerobic batch reactor) เป็นถังปฏิกริยาที่ผู้วิจัยได้สร้างขึ้นเพื่อการศึกษาในครั้งนี้ โดยกระทำการในสภาวะไร้อากาศ และมีการเติมน้ำเสียเพียง 1 ครั้งต่อรอบการทำงาน

2. ระบบเอเอส (AS : Activated Sludge) หมายถึง ระบบบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยาวีหนึ่งที่ใช้จุลินทรีย์ในการบำบัด โดยมีการเติมอากาศและนำตะกอนบางส่วนกลับมาใช้ในระบบใหม่

3. ระบบยูเอเอสบี (UASB : Upflow Anaerobic Sludge Blanket) หมายถึง ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจนวิธีหนึ่ง ที่มีทิศทางการไหลของน้ำเสียจากข้างล่างขึ้นข้างบนแต่ไม่ใช่ตัวกลางแบคทีเรียจะถูกเลี้ยงให้จับตัวกันเป็นเม็ดและลอยตัวอยู่เป็นชั้นสลัดจ์ไม่จมลงก้นถัง

4. แหล่งจุลินทรีย์ หมายถึง ตะกอนจุลินทรีย์ที่นำมาใช้ในการทดลอง โดยนำมาจากระบบบำบัดน้ำเสียแหล่งต่าง ๆ ได้แก่ สลัดจ์จากถังหมักตะกอนของระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอเอส ของโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำห้วยขวาง จังหวัดกรุงเทพมหานคร และตะกอนจุลินทรีย์ชนิดเม็ดจากถังปฏิกริยาของระบบบำบัดน้ำเสียแบบยูเอเอสบี ของบริษัทโรงเส้นไหม ช่อแฮง จำกัด จังหวัดนครปฐม

5. เชื้อจุลินทรีย์บริสุทธิ์ (Microorganism pure culture) หมายถึง เชื้อแบคทีเรียที่แยกมาจากแหล่งธรรมชาติ ในการทดลองนี้มี 2 ชนิด คือ SWU 1 และ SWU 2 ซึ่งมีความสามารถในการย่อยสลายสูง โดยได้รับความอนุเคราะห์จาก รศ.ดร.ยุวดี วัฒนโกศลสิน ภาควิชาชีวเคมี คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

6. แหล่งคาร์บอน หมายถึง แป้งที่ละลายลงในน้ำเพื่อทำน้ำแป้งสังเคราะห์ เพื่อให้จุลินทรีย์ย่อยสลายใช้เป็นแหล่งอาหาร และนำสารอาหารที่ได้จากการย่อยสลายนั้นมาเป็นพลังงานในการดำรงชีวิต โดยแป้งที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ ได้แก่ แป้งมันสำปะหลัง และแป้งข้าวเจ้า

7. ความสามารถของระบบ (Ability) หมายถึง ความสามารถของระบบไร้อากาศแบบไม่ต่อเนื่องในสภาวะการทดลองนั้นๆ ที่มีผลต่ออัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจน โดยวัดจากปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้ และค่าร้อยละของความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซชีวภาพที่ได้จากระบบนั้น

8. อัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogen production rate) หมายถึง ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้ ซึ่งคิดจากปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้ทั้งหมดใน 1 รอบของการทำงานหารด้วยจำนวนวันของรอบการทำงานนั้น และหารด้วยปริมาตรที่ใช้งานจริงของถังปฏิกริยา ซึ่งมีหน่วยเป็น L/L/day หรือ ลิตรไฮโดรเจน/ปริมาตรใช้งานถัง(ลิตร)/วัน

9. Hydrogen yield หมายถึง ความสามารถในการเปลี่ยนแป้งไปเป็นก๊าซไฮโดรเจน มีหน่วยเป็น m mole/g-COD

10. เอ็มแอลวีเอสเอส (MLVSS : Mixed liquor volatile suspended solids) หมายถึง ปริมาณหรือความเข้มข้นของจุลินทรีย์ในถังปฏิกริยา คิดเป็นปริมาณสารแขวนลอยของ Mixed Liquor ซึ่งเป็นของผสมระหว่างน้ำแป้งสังเคราะห์กับตะกอนจุลินทรีย์ในถังปฏิกริยา เป็นปริมาณอินทรีย์สารที่เป็นของแข็งที่ระเหยไปหลังจากนำไปเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส โดยทั่วไปจะมีค่าประมาณร้อยละ 50-80 ของค่าเอ็มแอลเอสเอส

11. ซีโอดี (COD : Chemical oxygen demand) หมายถึง ปริมาณออกซิเจนทั้งหมดที่ต้องการใช้เพื่อออกซิไดซ์สารอินทรีย์ในน้ำให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ

12. วีเอฟเอ (VFA : Volatile fatty acid) หมายถึง กรดอินทรีย์ที่มีจำนวนอะตอมของคาร์บอนไม่เกิน 6 อะตอม ละลายน้ำได้ และสามารถกลั่นได้ด้วยความดันบรรยากาศ ในการวิจัยในครั้งนี้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของกรดอินทรีย์ 3 ชนิด คือ อะซิติก บิวทริก และโพรพิโอนิก

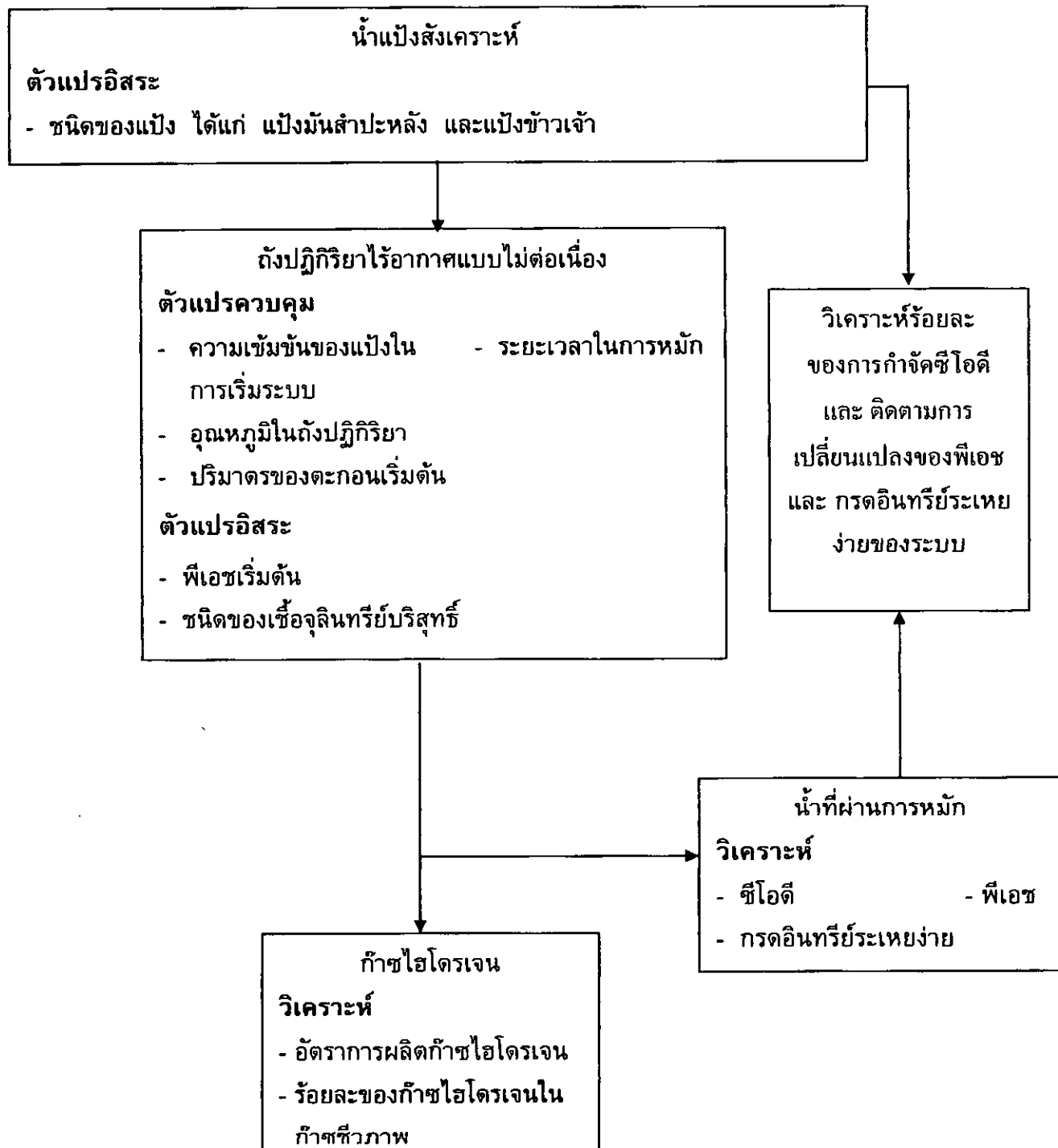
13. อัตราส่วนสารอาหารต่อมวลจุลินทรีย์ (F/M ratio : Food/Microorganism ratio)
หมายถึง อัตราส่วนระหว่างอาหารต่อมวลจุลินทรีย์ โดยรักษาอัตราส่วนของน้ำหนักปิไอดีหรือซีไอดีที่ส่งเข้ามาบำบัดต่อตะกอนจุลินทรีย์ซึ่งวัดในรูปของเอ็มแอลเอสเอสหรือเอ็มแอลวีเอสเอสให้มีค่าตามที่ต้องการ

14. ระยะเวลากักเก็บ (Retention time) หมายถึง ระยะเวลาในการหมักแบ่ง(วัน) ในถังปฏิกริยาของระบบไร้อากาศแบบไม่ต่อเนื่อง

15. ค่าพีเอชเริ่มต้น (Initial pH) หมายถึงค่า พีเอชที่ใช้ในการเริ่มต้นของการหมักในแต่ละถังปฏิกริยา

1.5 กรอบแนวคิดในการวิจัย

การวิจัยในครั้งนี้มีกรอบแนวคิดในการวิจัยดังนี้



1.6 สมมุติฐานในการวิจัย

- 1.6.1 อัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนในถังปฏิกิริยาไร้อากาศแบบไม่ต่อเนื่องจะแตกต่างกันเมื่อ
 - 1.6.1.1 ใช้แหล่งคาร์บอนที่ต่างกัน
 - 1.6.1.2 ใช้จุลินทรีย์จากแหล่งที่ต่างกัน
 - 1.6.1.3 ใช้ค่าพีเอชเริ่มต้นที่แตกต่างกัน
- 1.6.2 อัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนในถังปฏิกิริยาไร้อากาศแบบไม่ต่อเนื่อง มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน เมื่อมีการขยายขนาดของถังปฏิกิริยาขึ้นเป็น 4 เท่า
- 1.6.3 อัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนในถังปฏิกิริยาไร้อากาศแบบไม่ต่อเนื่อง จะมีประสิทธิภาพมากขึ้น เมื่อเติมเชื้อจุลินทรีย์บริสุทธิ์

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และนำเสนอตามหัวข้อต่อไปนี้

2.1 ไฮโดรเจน

2.2 ระบบบำบัดน้ำเสียชนิดไร้ออกซิเจน

2.3 ความรู้เบื้องต้นและความสำคัญของแปรง

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไฮโดรเจน

ไฮโดรเจนมีลักษณะและสมบัติต่าง ๆ ที่รวบรวมและสรุปได้ดังต่อไปนี้ (ชัยวัฒน์ เจนวานิชย์, 2525 : 250 – 257)

2.1.1 ลักษณะทั่วไปของไฮโดรเจน

นักวิทยาศาสตร์ได้รู้จักก๊าซไฮโดรเจนมานานหลายร้อยปีแล้ว แต่ความรู้เกี่ยวกับก๊าซนี้ในสมัยนั้น ยังไม่ชัดเจนมากนัก ในการค้นพบนั้นมีความเป็นมาดังนี้คือ เมื่อประมาณศตวรรษที่ 16 พาราเซลซัส (Paracelsus, B.F.) พบว่าก๊าซนี้เกิดขึ้นจากการละลายผงเหล็กในกรดซัลฟิวริก ซึ่งเขาได้บันทึกไว้ว่าก๊าซนี้เป็นเสมือนอากาศที่พุ่งขึ้นมาราวกับสายลม ต่อมานักวิทยาศาสตร์คนอื่น ๆ ก็เตรียมก๊าซนี้ได้และให้รายละเอียดแตกต่างกันไป แต่มีสิ่งเหมือนกันสิ่งหนึ่งคือ สามารถติดไฟได้และไม่ช่วยในการเผาไหม้ ต่อมาในปี ค.ศ. 1766 เฮนรี คาร์เวนดิช (Henry Cavendish) นักเคมีชาวอังกฤษ ซึ่งเป็นผู้ที่ได้รับการยกย่องว่าค้นพบสมบัติที่แท้จริงของไฮโดรเจน นอกจากนี้แล้วเขายังค้นพบวิธีเตรียมก๊าซนี้ได้หลายวิธีและยังได้ศึกษาจนทราบแท้จริงถึงองค์ประกอบของน้ำ และในปี ค.ศ. 1783 พริเอสเต (Priestley) ซึ่งเป็น ผู้ค้นพบก๊าซออกซิเจนเรียกก๊าซนี้ว่า อากาศที่ติดไฟได้ และหลังจากนั้นต่อมาใน ค.ศ. 1783 ลาวัซซีเออร์ (Lavoisier) ได้ตั้งชื่อก๊าซนี้ว่า ไฮโดรเจน (Hydrogen) ซึ่งหมายถึงตัวทำให้เกิดน้ำ

ส่วนแหล่งที่พบไฮโดรเจนนั้นพบว่า ไฮโดรเจนในรูปธาตุอิสระมีน้อยมาก แหล่งที่พบได้แก่ แหล่งที่เป็นภูเขาไฟ และก๊าซธรรมชาติซึ่งพบ H_2 ปะปนอยู่กับก๊าซอื่น ๆ ในบรรยากาศมี H_2 อยู่ประมาณ 1 ppm ที่ชั้นบรรยากาศสูงขึ้นไปจะพบ H_2 มากขึ้น เพราะก๊าซนี้เบามาก จึงมีแนวโน้มแพร่ขึ้นไปสู่ข้างบนและอวกาศอย่างรวดเร็ว จากการศึกษาโดยใช้สเปกโตรสโคป พบว่ามี H_2 มากมายมหาศาลบนดวงอาทิตย์ และดวงดาวอื่นเป็นจำนวนมาก

นอกจากไฮโดรเจนจะเป็นองค์ประกอบของน้ำแล้ว ยังเป็นองค์ประกอบของสารเป็นจำนวนมาก เช่น ไฮโดรคาร์บอน (มีไฮโดรเจนและคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ) โปรตีน คาร์โบไฮเดรต

และสารประกอบของคาร์บอนหรือที่เรียกว่าสารอินทรีย์อีกเป็นจำนวนมาก ล้วนแล้วแต่มีไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบทั้งสิ้น

ส่วนลักษณะพื้นฐานของไฮโดรเจน (H_2) นั้น พบว่าเป็นธาตุที่เบาที่สุดในบรรดาธาตุทั้งหมดในตารางธาตุ ณ อุณหภูมิ และความดันปกติ มีสถานะเป็นแก๊ส และมีโมเลกุลเป็นแบบอะตอมคู่ (Diatomic Molecule) หมายถึงไฮโดรเจน 1 โมเลกุล จะมีองค์ประกอบอยู่ 2 อะตอม ดังนั้นตามปกติแล้วสัญลักษณ์ของไฮโดรเจนจึงเขียนแทนด้วย H_2 นอกจากนี้แล้วไฮโดรเจนยังมีสมบัติพื้นฐานต่าง ๆ ที่สำคัญซึ่งมีรายละเอียดดังแสดงไว้ในตาราง 1 ส่วนสมบัติของไฮโดรเจนนั้นแบ่งออกเป็นสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีซึ่งกล่าวโดยสรุปได้ดังนี้ ไฮโดรเจนเป็นก๊าซที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น และไม่มีรสติดไฟได้ เป็นธาตุที่เบาที่สุดหนักเพียง $1/16$ ของ O_2 และหนักน้อยกว่า $1/4$ ของอากาศและละลายในน้ำได้เล็กน้อย ไฮโดรเจนไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยา ณ อุณหภูมิห้อง ติดไฟได้แต่ไม่ช่วยการเผาไหม้ ค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีของ H_2 น้อยกว่าโลหะทั่วไป ดังนั้นสารประกอบทั่วไปของ H_2 จึงมีพันธะแบบโควาเลนต์

ตาราง 1 แสดงสมบัติพื้นฐานของไฮโดรเจน

ประเภท	ค่าของสมบัติ
เลขอะตอม	1 อาจจัดอยู่ในหมู่ IA หรือหมู่ VIIA หรือไม่จัดเป็นหมู่ใดหมู่หนึ่งก็ได้ เป็นอโลหะ
น้ำหนักอะตอมมีค่า	1.00797 amu
จุดหลอมเหลวที่ 1 atm	$-259.1^{\circ}C$
จุดเดือดที่ 1 atm	$-252.7^{\circ}C$
(แก๊สที่ $0^{\circ}C$ 1 atm)	0.889 g/L
โครงสร้างอิเล็กตรอนิกเป็น	$1s^1$
เลขออกซิเดชันสามัญ	+1, -1

ที่มา : ชัยวัฒน์ เจนวาณิชย์. (2525). สารานุกรมธาตุ. หน้า 250

2.1.2 คุณสมบัติของไฮโดรเจนในการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง

นักวิทยาศาสตร์พบว่าก๊าซไฮโดรเจนนั้นเป็นก๊าซที่ไวไฟมาก ด้วยเหตุนี้จึงได้นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการขับเคลื่อนจรวด โดยปรกตินั้นก๊าซไฮโดรเจนมักจะถูกจัดเก็บไว้ในรูปของไฮโดรเจนเหลว และคุณสมบัติที่จะต้องคำนึงถึงในแง่ของการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงนั้นประกอบด้วย อุณหภูมิจุดเดือด คุณค่าทางความร้อน (Heating value) ค่าความร้อนแฝงในการระเหย (Latent heat of evaporation) ค่าความหนาแน่นของก๊าซกับอากาศที่จะทำให้ติดไฟได้ ค่าความหนาแน่นของก๊าซเมื่อเป็นของเหลวค่า

ความหนืด (Viscosity) ค่าอุณหภูมิจุดติดไฟ และค่าความเร็วของเปลวไฟ (Flame speed) เป็นต้น ซึ่งสามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังนี้

2.1.2.1 อุณหภูมิจุดเดือด

ไฮโดรเจนที่สภาวะปกติอุณหภูมิจุดเดือดจะมีค่าต่ำมาก ซึ่งค่าอุณหภูมิจุดเดือดของไฮโดรเจน มีเทน (CH_4) โพรเพน (C_3H_8) บิวเทน (C_4H_{10}) เมทานอล และ น้ำมันก๊าซโซลีน ที่สภาวะปกตินั้นจะมีค่าเป็น 20 112 231 273 338 และ 310–478 เคลวิน (K) ตามลำดับ จากข้อมูลนี้แสดงให้เห็นว่า ไฮโดรเจน มีเทน โพรเพน และบิวเทน จะเปลี่ยนสถานะเป็นไอ ณ ความดันบรรยากาศบนพื้นโลก และที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดเดือดของก๊าซ

2.1.2.2 คุณค่าความร้อน

คุณค่าทางความร้อนของเชื้อเพลิงนั้น เป็นสิ่งสำคัญและบ่งบอกถึงคุณภาพของเชื้อเพลิงนั้น ๆ ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วคุณค่าทางความร้อนของเชื้อเพลิงจะเป็นตัวกำหนดราคาของเชื้อเพลิงนั้น ๆ ด้วย คุณค่าทางความร้อนของไฮโดรเจนที่เปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงชนิดอื่น ๆ ได้ดังแสดงไว้ตามตาราง 2

2.1.2.3 ค่าความร้อนแฝงในการระเหย

ค่าความร้อนแฝงในการระเหยของไฮโดรเจน มีเทน โพรเพน บิวเทน เมทานอล และ น้ำมันก๊าซโซลีนนั้น มีค่าเป็น 0.45 0.51 0.364 0.376 1.1 และ 0.25 – 0.4 กิโลจูลต่อกรัม ตามลำดับ จากข้อมูลข้างต้นนี้แสดงให้เห็นว่าถ้าของเหลวของไฮโดรเจน มีเทน โพรเพน และบิวเทน เกิดการรั่วไหลออกมาภายนอกของเหลวนั้นจะเกิดการระเหยโดยการดึงความร้อนจากบริเวณใกล้เคียง และจะทำให้บริเวณรอบข้างมีความเย็นจัด และมีสภาพไหม้เช่นเดียวกับถูกความร้อนลวก ดังนั้นผู้ที่ต้องปฏิบัติงานเกี่ยวกับสารดังกล่าวจะต้องระมัดระวังและควรใช้อุปกรณ์ในการป้องกันด้วย

2.1.2.4 ค่าความหนาแน่นของก๊าซ

ก๊าซไฮโดรเจนที่อุณหภูมิห้องจะมีค่าความหนาแน่นต่ำมาก ดังนั้นก๊าซไฮโดรเจนจะเบาและลอยตัวขึ้นสู่ที่สูงได้ง่าย ทั้งไฮโดรเจนและมีเทนมีค่าความหนาแน่นที่เบากว่าอากาศ ซึ่งตรงกันข้ามกับของโพรเพนและก๊าซโซลีนที่ไอสารทั้งสองหนักกว่าอากาศ ดังนั้นเมื่อก๊าซโพรเพนหรือ น้ำมันก๊าซโซลีน เกิดการรั่วไหลออกมาจะไปรวมตัวในบริเวณที่ต่ำ และก่อให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์ได้มากกว่าไฮโดรเจนและมีเทน เพราะเมื่อก๊าซทั้งสองนี้เกิดการรั่วไหลจะเกิดการฟุ้งกระจายขึ้นทางตอนบนทำให้เกิดอันตรายน้อยลง ไฮโดรเจนนั้นจะมีค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่สูงจึงช่วยให้การเกิดของผสมเป็นเนื้อเดียวกันระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศที่จะป้อนเข้าเครื่องยนต์กระทำได้ง่ายขึ้น และในกรณีที่ไฮโดรเจนเหลวเกิดการรั่วไหลออกมาจากถังเก็บนั้นไฮโดรเจนเหลวจะดึงความร้อนจากรอบข้างแล้วระเหยกลายเป็นไออย่างรวดเร็ว เพราะในขณะที่ก๊าซเย็นยังคงดึงความร้อนจากสิ่งแวดล้อมรอบข้าง

อยู่ต่อไปนั้น อุณหภูมิของก๊าซก็จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นทั้งไอน้ำ ก๊าซออกซิเจน และไนโตรเจนในอากาศจะเริ่มเกิดการควบแน่นและแข็งตัว ก๊าซไฮโดรเจนจะขยายตัวอย่างต่อเนื่อง และเมื่อความหนาแน่นของก๊าซมีค่าน้อยกว่าอากาศเย็นที่อยู่ล้อมรอบ ก๊าซไฮโดรเจนจะเกิดการลอยตัวขึ้นสูง ในขณะเดียวกันโมเลกุลของก๊าซไฮโดรเจนแต่ละโมเลกุลจะเกิดการแพร่ผ่านก๊าซไปในทุกทิศทางทุกทาง ถ้าการหกหล่นเกิดในบริเวณที่เปิดโล่ง ไฮโดรเจนจะเกิดการกระจายตัวอย่างรวดเร็ว แต่ถ้าการหกหล่นเกิดภายในตึกอาคาร ก๊าซไฮโดรเจนจะถูกกักไว้ และจากการที่ก๊าซไฮโดรเจนเกิดการขยายตัวอันเนื่องมาจากการระเหย อากาศจะถูกผลักออกจากบริเวณดังกล่าวปริมาณการหกหล่นและอัตราการกระจายตัวตลอดจนสภาพแวดล้อมที่อยู่รอบข้าง จะเป็นตัววิเคราะห์ว่าไฮโดรเจนจะเกิดการลุกติดไฟหรือไม่

ตาราง 2 แสดงคุณค่าทางความร้อนของเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ

ชนิดของเชื้อเพลิง	คุณค่าทางความร้อน (KJ/g)
ไฮโดรเจน	120
มีเทน	50
โพรเพน	46
บิวเทน	45.6
เมทานอล	20
น้ำมันก๊าซโซลีน	44
น้ำมันเจ็ต	43

ที่มา : ดัดแปลงมาจาก อภิชัย เทอดเทียนวงษ์. (2541). วารสารเทคโนโลยี(Technology Journal).

หน้า 54.

2.12.5 ขอบเขตของการลุกติดไฟและอุณหภูมิของเปลวไฟ

เป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของเชื้อเพลิง เพราะว่าตัวแปรเหล่านี้จะเป็นการวัดช่วงของอัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศที่การเผาไหม้ยังคงดำเนินต่อไปได้ หรือที่ซึ่งเครื่องยนต์สันดาปภายในยังคงสามารถทำงานได้ ก๊าซไฮโดรเจนนั้นจะมีขอบเขตของการลุกติดไฟที่กว้างเมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงชนิดอื่น ๆ และข้อได้เปรียบอีกอย่างหนึ่งของไฮโดรเจนคือ ไฮโดรเจนสามารถนำมาใช้เผาไหม้ได้ถึงแม้จะอยู่ในสภาพที่เป็นของผสมแบบเจือจาง (Lean mixture) โดยทั่ว ๆ ไปแล้ว ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อเครื่องยนต์ทำงานที่สภาวะของผสมที่มีการเจือจางเล็กน้อย ทั้งนี้เพราะปฏิกิริยาการเผาไหม้จะเกิดได้สมบูรณ์มากกว่า นอกจากนี้อุณหภูมิสุดท้ายของการเผาไหม้จะถูกทำให้มี

ค่าต่ำลงได้ โดยการใช้ของผสมที่มีปริมาณเชื้อเพลิงเจือจางมาก ๆ อันจะนำไปสู่การลดปริมาณไฮโดรเจนออกไซด์ที่ถูกปล่อยออกมาลงได้ แต่อย่างไรก็ตามในการพิจารณาใช้งานจะต้องพิจารณาถึงจุดเหมาะสมสูงสุดด้วย เพราะการทำงานที่สภาพเจือจางจะทำให้กำลังงานที่จะได้จากเครื่องยนต์มีค่าต่ำลงซึ่งมีสาเหตุมาจากการลดลงของอุณหภูมิทางความร้อนเชิงปริมาตรของของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ

2.1.2.6 พลังงานการจุดไฟต่ำสุด (Minimum Ignition energy)

คือค่าพลังงานที่ต้องการต่ำสุดเพื่อให้เกิดการจุดติดไฟจะมีค่าน้อยกว่าที่ต้องการสำหรับน้ำมันก๊าซโซลีนประมาณ 10 เท่า และนี่คือเหตุผลที่ทำให้เครื่องยนต์ที่ใช้ก๊าซไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงนั้นสามารถทำงานได้ดี ถึงแม้จะทำงานที่สภาพความเข้มข้นของเชื้อเพลิงเจือจางก็ยังคงมีการจุดระเบิดที่เหมาะสมกับจังหวะเวลา แต่คุณสมบัติข้อดีก็มีข้อเสียได้เช่นกัน เนื่องจากอัตราส่วนของผสมของไฮโดรเจนกับอากาศสามารถลุกติดไฟได้ในช่วงกว้าง จึงทำให้ก๊าซร้อนหรือจุดที่ร้อนบนกระบอกสูบสามารถทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดในการลุกติดไฟ และทำให้เกิดปัญหาของการจุดระเบิดก่อนเวลาอันสมควรของค่าพลังงานต่ำสุดในการจุดติดไฟที่เป็นฟังก์ชันกับเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของไฮโดรเจน

2.1.2.7 อุณหภูมิจุดติดไฟอัตโนมัติ (Autoignition temperature)

เป็นอุณหภูมิที่ซึ่งของผสมที่สามารถเผาไหม้ได้นั้น จะต้องมีค่าอุณหภูมิถึงก่อนที่ตัวมันจะลุกติดไฟโดยปราศจากแหล่งพลังงานจากภายนอก สำหรับไฮโดรเจนเมื่อเปรียบเทียบกับของเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ อุณหภูมิดังกล่าวมีค่าค่อนข้างสูง ดังนั้นไฮโดรเจนจึงไม่ใช่เชื้อเพลิงที่ติดไฟง่าย หากไม่มีแหล่งประกายไฟจากภายนอก

2.1.2.8 ค่าความหนืด (Viscosity)

พบว่าค่าความหนืดของก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซมีเทนและไอของก๊าซโซลีน ที่สภาวะมาตรฐาน (1 atm, 20°C) นั้นมีค่าเป็น 0.0000875 0.000110 และ 0.000052 g/cm-s ตามลำดับ ส่วนค่าความหนืดของเชื้อเพลิงของเหลวที่สภาวะจุดเดือดปกติมีค่าดังนี้คือ ไฮโดรเจน 0.000133 g/cm-s ก๊าซมีเทน 0.001130 g/cm-s และไอของก๊าซโซลีน 0.002 g/cm-s ค่าความหนืดข้างต้นจะเป็นข้อมูลที่สำคัญในการออกแบบปั๊มและเครื่องอัดก๊าซให้มีสภาพเหมาะสมต่อการสึกหรอ นอกจากนี้ยังนำมาใช้ในขณะที่มีการไหลผ่านท่อ ระบบข้อต่อ ตลอดจนวาล์วต่าง ๆ

2.1.2.9 ค่าการขยายตัวของของเหลว (Volume expansivity, $\beta = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p$ หรือค่า

สัมประสิทธิ์การขยายตัวที่สภาวะจุดเดือดตามปกติ (Normal boiling point) ของไฮโดรเจนเหลว มีเทนเหลว และน้ำมันก๊าซโซลีน มีค่าเป็น 0.01658 0.00346 และ 0.00120 K⁻¹ ตามลำดับ ซึ่งตัวเลขนี้สามารถใช้เป็นข้อมูลในการคำนวณหาความดันที่เพิ่มขึ้นเมื่อของเหลวที่บรรจุในถังจนเต็มถูกทำให้

อุณหภูมิสูงขึ้น และยังสามารถใช้เป็นข้อมูลในการบรรจุเชื้อเพลิงเหลวในถังปิด ทั้งนี้ในการบรรจุนั้นไม่ควรบรรจุให้เต็ม และควรมีช่องว่างไว้เพื่อการขยายตัวเมื่ออุณหภูมิมีค่าสูงขึ้นด้วย

2.1.2.10 ค่าความเร็วของเปลวไฟ (Flame speed)

ค่าความเร็วของเปลวไฟของไฮโดรเจนจะมีค่าสูงกว่าของก๊าซโซลีนเกือบ 10 เท่า ซึ่งย่อหมายความว่า สำหรับของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศตามทฤษฎีมวลสารสัมพันธ์แล้วนั้น เครื่องยนต์ไฮโดรเจนจะสามารถปฏิบัติงานได้ใกล้เคียงกับวัฏจักรเครื่องยนต์จิกนภาพเชิงเทอร์โมไดนามิก (Thermodynamically ideal engine cycle) แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อของผสมมีปริมาณเชื้อเพลิงเจือจางนั้น ค่าความเร็วของเปลวไฟจะมีค่าลดลงเป็นอย่างมาก ซึ่งค่าความเร็วของเปลวไฟของเชื้อเพลิงชนิดจาก ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซมีเทน น้ำมันก๊าซโซลีน และเมทานอล ในอากาศที่สภาวะมาตรฐานมีค่าเป็น 2.65 – 3.25 0.37 – 0.45 0.37 – 0.43 และ 0.41 เมตรต่อวินาที

จากคุณสมบัติของไฮโดรเจนในการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงดังที่ได้กล่าวไปแล้วนี้ จึงเป็นข้อสนับสนุนที่ทำให้นักวิทยาศาสตร์มั่นใจว่าก๊าซไฮโดรเจนมีความเหมาะสมเพียงพอที่จะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้

2.1.3 กระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจน

กระบวนการผลิตไฮโดรเจนกระทำได้หลายวิธี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งกระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนที่ฮาฟแมนได้กล่าวไว้แล้วนั้นพอสรุปได้ ดังต่อไปนี้ (Haffman, 1935 : 12 – 16)

2.1.3.1 การผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากเชื้อเพลิงฟอสซิล

ก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นเป็นการค้าเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมเคมี อุตสาหกรรมปิโตรเคมีนั้น ผลิตจากก๊าซธรรมชาติซึ่งจัดเป็นเชื้อเพลิงฟอสซิล โดยผ่านการทำ Steam reforming ซึ่งเป็นการกระทำปฏิกิริยาระหว่าง ก๊าซไฮโดรคาร์บอนกับน้ำในรูปไอน้ำโดยอาศัยพลังงานความร้อนทำให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน กระบวนการนี้ต้องใช้อุณหภูมิสูงถึง 700 - 1,000°C (Kurse, 2002: 17) แต่กระบวนการทางอุตสาหกรรมที่นิยมใช้ในการผลิตก๊าซไฮโดรเจน คือกระบวนการที่เรียกว่า Coal gasification

แม้ว่าการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง แต่วิธีนี้ยังมีข้อเสียที่ควรคำนึงถึงอีกเป็นอย่างยิ่งคือ ผลิตภัณฑ์ที่ได้ยังก่อให้เกิดมลพิษอันเนื่องมาจากการตกค้างของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้ คาร์บอนไดออกไซด์ และซัลเฟอร์ เป็นต้น นอกจากนี้เชื้อเพลิงฟอสซิลยังเป็นแหล่งของพลังงานที่จะหมดไปได้ในอนาคต

2.1.3.2 การผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยวิธีอิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis)

วิธีการนี้เป็นการใช้กระแสไฟฟ้าในการแตกแยกโมเลกุลของน้ำโดยตรง ซึ่งจะทำให้ได้ไฮโดรเจนอะตอมและออกซิเจนอะตอม ทั้งนี้โดยอาศัยอิเล็กโทรด (Electrode) 2 ขั้วที่ตรงกันข้ามกัน คือ อิเล็กโทรดขั้วบวก (Positive electrode) และอิเล็กโทรดขั้วลบ (Negative electrode) วิธีการนี้ทำได้โดยจุ่มอิเล็กโทรดลงในน้ำที่ทำให้มีความเป็นด่างมากขึ้น โดยการเติมสารจำพวกอิเล็กโทรไลต์ อะตอมจะแยกตัวออกจากกันแล้วไฮโดรเจนอะตอมจะไปเกาะที่อิเล็กโทรดขั้วลบ และออกซิเจนอะตอมจะไปเกาะที่อิเล็กโทรดขั้วบวก แต่ในระดับอุตสาหกรรมนั้นโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้วิธีอิเล็กโทรไลซิสผลิตไฮโดรเจนจะใช้ถัง อิเล็กโทรไลเซอร์ (Electrolyzer) ที่ประกอบด้วย อิเล็กโทรด อิเล็กโทรไลต์ และตัวแยก (Separator) ที่ทำหน้าที่ป้องกันอิเล็กโทรดและแยกก๊าซที่เกิดขึ้นจากขั้วต่าง ๆ นอกจากนี้ ยังประกอบด้วยภาชนะบรรจุ (Container) ที่ค่อนข้างซับซ้อน ในการทำอิเล็กโทรไลซิสที่สมบูรณ์นั้นต้องใช้กระแสไฟฟ้ามากถึง 90 กิโลวัตต์ ซึ่งจะสามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ 1,000 ลูกบาศก์ฟุต หรือ 28 ลูกบาศก์เมตร แต่ถึงแม้ว่าวิธีนี้จะให้ไฮโดรเจนที่มีความบริสุทธิ์สูงก็ตาม ควรจะใช้ในกรณีที่ราคาของไฟฟ้ามีราคาถูกเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากต้องใช้กระแสไฟฟ้าจำนวนมาก นอกจากนี้แล้วข้อเสียอีกประการหนึ่งของวิธีนี้ก็คือ การทำกระบวนการอิเล็กโทรไลซิสในแต่ละขั้นตอนนั้น จะเกิดการสูญเสียพลังงานไป นอกจากนี้แล้วการแยกโมเลกุลของน้ำให้เป็นไฮโดรเจนและออกซิเจนนั้น ยังต้องทำในสภาวะที่อุณหภูมิสูงกว่า 2,500 องศาเซลเซียส อีกด้วย ทั้งนี้เพราะแรงดึงดูดระหว่างอะตอมของไฮโดรเจนและอะตอมของออกซิเจนมีค่าสูงมาก จึงต้องใช้พลังงานความร้อนสูงเพื่อช่วยในการแยกอะตอมทั้งสองออกจากกัน

2.1.3.3 การผลิตไฮโดรเจนโดยใช้วิธี Thermochemistry

เนื่องจากการผลิตก๊าซไฮโดรเจนด้วยวิธีอิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis) นั้นจะต้องอาศัยความร้อนสูงมาก ซึ่งเมื่อเทียบกับความร้อนที่ได้จากถึงปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่ให้ความร้อนเพียง 220 – 320 องศาเซลเซียสเท่านั้น ดังนั้นจึงมีการพัฒนากระบวนการผลิตโดยใช้สารประกอบของปรอทโบรไมด์และแคลเซียมในกระบวนการ ซึ่งจะทำให้สามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้โดยอาศัยความร้อนที่อุณหภูมิต่ำลง คือ อุณหภูมิประมาณ 200 – 780 องศาเซลเซียส เรียกขั้นตอนในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยวิธีนี้เรียกว่า Thermochemistry วิธีการนี้มีข้อดีคือ สามารถใช้ความร้อนในช่วงที่ถึงปฏิกรณ์นิวเคลียร์สามารถผลิตได้ และพลังงานทั้งหมดถูกนำไปใช้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด นอกจากนี้ผลผลิตที่ได้ยังสามารถแยกออกได้ง่าย อย่างไรก็ตามจะพบปัญหามลพิษอย่างรุนแรงจากการใช้สารประกอบโลหะหนัก อันได้แก่ ปรอท และโบรไมด์

2.1.3.4 วิธีการอื่น ๆ

นอกจากวิธีการดังกล่าวข้างต้นแล้ว ยังมีวิธีการผลิตก๊าซไฮโดรเจนวิธีที่ดัดแปลงและพัฒนาอื่น ๆ อีก ได้แก่ อิเล็กโทรไลซิส ที่อาศัย Semiconductor electrode ที่ใช้พลังงานจาก

แสงอาทิตย์ ซึ่งอิเล็กโทรด ที่ใช้เป็นชนิดไททาเนียม (TiO_2) เมื่ออิเล็กโทรด (Electrode) ได้รับพลังงานแสงอาทิตย์ จะเกิดการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าจากขั้วที่ทำจากแพลาทินัม (Platinum black electrode) ไปยังขั้วที่เป็นไททาเนียมโดยอาศัยกระแสไฟฟ้าจากภายนอก เมื่อแยกโมเลกุลของน้ำไปเป็นออกซิเจนอะตอมและไฮโดรเจนอะตอมแล้ว ไฮโดรเจนอะตอมที่แยกได้นั้นจะไปจับที่ขั้วที่ทำจากแพลาทินัม (Platinum electrode) และออกซิเจนอะตอมจะจับที่ขั้วที่ทำจากไททาเนียม (Titanium electrode)

นอกจากนี้ยังมีการผลิตไฮโดรเจนโดยกิจกรรมของจุลินทรีย์อีกหลายชนิด . . . ซึ่งมีกลุ่มของจุลินทรีย์ที่มีกิจกรรมในการเจริญและให้ก๊าซไฮโดรเจนเป็นผลผลิต แบ่งได้เป็น 4 กลุ่มใหญ่ ๆ ได้แก่

- ก. กลุ่มของจุลินทรีย์สังเคราะห์แสง (Photosynthetic microorganisms)
- ข. กลุ่ม Heterotrophic strictly anaerobes
- ค. กลุ่ม Heterotrophic facultative anaerobes
- ง. กลุ่ม *Desulfovibrio desulfuricans*

โดยแบคทีเรียทั้ง 4 กลุ่ม นี้ จะย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ต่างชนิดกัน ทั้งนี้เพื่อที่จะได้นำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลายแล้วนี้ไปใช้เป็นแหล่งให้อิเล็กตรอนในกระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจน ซึ่งในกระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนของแบคทีเรียทั้ง 4 กลุ่ม มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ก. การผลิตไฮโดรเจนโดยกลุ่มของจุลินทรีย์สังเคราะห์แสง (Photosynthetic microorganisms)

จุลินทรีย์ผลิตก๊าซไฮโดรเจนที่มีแหล่งให้อิเล็กตรอน (Electron donor) คือ reduced pyridine nucleotide ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ของสารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ โดยกลไกจะเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) ของอ็อกโซนไฮโดรเจน โดยอิเล็กตรอนที่ได้จากคลอโรฟิลล์ที่ได้รับการกระตุ้นจากแสง

ข. การผลิตไฮโดรเจนโดยกลุ่ม Heterotrophic strictly anaerobes

จุลินทรีย์กลุ่มนี้จะสามารถผลิต Pyruvate ที่เป็นสารตัวกลาง (Intermediate) ในกระบวนการหมักได้ แล้วจึงย่อยสลาย Pyruvate ต่อไปโดย Phosphoroclastic Cleavage ดังสมการ



ทำให้มีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนระหว่างกระบวนการข้างต้น หรือที่เรียกว่ากระบวนการ Oxidative decarboxylation ของ Pyruvate อิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยออกมาจะอยู่ในรูปก๊าซไฮโดรเจน การศึกษาใน *Clostridium pasteurianum* พบว่า Ferredoxin เป็นสารตัวกลางในการส่งผ่านอิเล็กตรอนจาก Pyruvate หรือ hydrosulfate ไปเป็นก๊าซไฮโดรเจน โดยมีเอนไซม์ Hydrogenase เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst)

ค. กลุ่ม Heterotrophic facultative anaerobes

จุลินทรีย์กลุ่มนี้จะสามารถย่อยสารประกอบอินทรีย์โดยกระบวนการ Glycolysis ให้เกิดเป็นสารประกอบ Pyruvate ซึ่งจะถูกรับย่อยสลาย (Metabolize) ต่อไปอีกโดยปฏิกิริยา Phosphoroclastic cleavage ดังสมการ



Pyruvate จะถูกเปลี่ยนไปเป็นสารประกอบ Formate แล้ว Formate ที่เกิดขึ้นก็จะเปลี่ยนต่อไปเป็นก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยกระบวนการที่ไม่ใช้ออกซิเจน กระบวนการดังกล่าวจะถูกกระตุ้นโดยเอนไซม์ Formic Hydrogenase enzyme complex ซึ่งจะต้องประกอบด้วยเอนไซม์อย่างน้อย 2 ชนิด คือ Soluble Formate dehydrogenase และ Hydrogenase

ง. การผลิตไฮโดรเจนโดยกลุ่ม *Desulfovibrio desulfuricans*

แบคทีเรียชนิดนี้เป็น Heterotrophic Strictly Anaerobe ที่มี Cytochrome C₃ ทำหน้าที่ในการถ่ายเทอิเล็กตรอนโดยมี Ferredoxin ชนิดที่แตกต่างจาก Anaerobe อื่น ๆ เป็นสารตัวกลางในการขนถ่ายอิเล็กตรอนและอาจเป็นไปได้ว่า แบคทีเรียชนิดนี้มี Hydrogenlyase cleavage เช่นเดียวกับพวก *Clostridium* sp. แบคทีเรียชนิดนี้จะใช้สารประกอบ Sulfate ในการผลิตไฮโดรเจน แต่บางสายพันธุ์จะผลิตไฮโดรเจนจาก Pyruvate และ Formate ได้ เช่นกันแม้จะไม่มีสารประกอบ Sulfate

จะเห็นว่ากระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนแต่ละกระบวนการนั้น จะมีวิธีในการผลิตไม่เหมือนกันซึ่งบางวิธีในขั้นตอนของการผลิตนั้น จะต้องลงทุนสูงมาก นอกจากนั้นแล้วยังมีของเสียเกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย แต่การผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยกิจกรรมของจุลินทรีย์นั้นเป็นวิธีการทางชีวภาพที่ไม่เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม และยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดของเสียที่เป็นสารอินทรีย์ได้ด้วย

2.1.4 เทคนิคการจัดเก็บก๊าซไฮโดรเจน

วิธีการจัดเก็บเชื้อเพลิงไฮโดรเจนมีหลายวิธี ซึ่งวิธีที่ใช้กันอยู่แพร่หลายในปัจจุบันก็คือ การเก็บไฮโดรเจนในรูปของก๊าซความดันสูง และเก็บไว้ในรูปของไฮโดรเจนเหลว นอกจากนี้ยังมีวิธีจัดเก็บไฮโดรเจนโดยใช้เทคนิคใหม่ ซึ่งไฮโดรเจนจะถูกดูดซับไว้ในสารที่ใช้เป็น Adsorbed สามารถจัดเก็บไฮโดรเจนดังรายละเอียดดังต่อไปนี้ (สถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2540 : 13 – 15)

2.1.4.1 การเก็บในรูปก๊าซความดันสูง

สำหรับการเก็บในรูปก๊าซความดันสูงนั้นมีอยู่ 2 วิธี คือ เก็บไว้ในโพร่งใต้ดิน และเก็บไว้ในถังความดันสูง การเก็บไฮโดรเจนในโพร่งใต้ดินนั้นปัจจุบันนี้ยังไม่แพร่หลายเท่าใดนัก เทคโนโลยีที่ใช้ก็เช่นเดียวกับการเก็บก๊าซธรรมชาติไว้ในโพร่งใต้ดินที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน สำหรับการ

ลงทุนนั้นก็ขึ้นอยู่กับตัวแปรอีกหลายตัว ส่วนการเก็บไว้ในถังความดันสูง ที่เห็นกันทั่วไปนั้นจะมีท่อขนาดเล็ก 50 ลิตร ความดันภายใน 200 บาร์ (bar) จนถึงถังเก็บแบบประจำที่ (Stationary) ความดันสูงกว่า 200 บาร์ หรือเก็บที่ความดันระหว่าง 12 – 16 บาร์ โดยปริมาตรที่เก็บสูงกว่า 150,000 ลูกบาศก์เมตร

2.1.4.2 การเก็บในรูปไฮโดรเจนเหลว

การเก็บในรูปของไฮโดรเจนเหลว เป็นวิธีการเก็บที่สำคัญที่สุดวิธีหนึ่งที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน ขนาดของถังเก็บมีหลายขนาด ตั้งแต่ขนาดเล็ก ความจุ 100 ลิตร จนถึง 5,000 ลูกบาศก์เมตร (m^3) ซึ่งถังเก็บจะมีผนังสองชั้น ช่องว่างระหว่างผนังทั้งสองจะเป็นสุญญากาศ ภายในบรรจุด้วยฉนวนอย่างดี สำหรับถังเก็บขนาดใหญ่ ฉนวนที่ใช้จะเป็นวัสดุที่เรียกว่า Perlite ส่วนถังเก็บขนาดเล็กแบบเคลื่อนย้ายได้ ภายในช่องว่างระหว่างผนังจะบรรจุด้วยฉนวนที่เรียกว่า Superisolation มีลักษณะเป็นแผ่นฟรอยอะลูมิเนียมชั้นด้วยแผ่นพลาสติก โดยทั่วไปจะเรียงกันอยู่ 30 ชั้น สำหรับฉนวนชนิดนี้การสูญเสียที่เกิดจากความร้อนจากภายนอกจะแปรผันตรงกับพื้นที่ผนังด้านนอกต่อปริมาตรบรรจุ หรือเรียกว่าพื้นที่ผนังจำเพาะก็ได้ สำหรับถังขนาดใหญ่ที่อยู่ในช่องว่างระหว่างผนังทั้งสองบุด้วยผนังที่เรียกว่า Perlite จะมีอัตราการสูญเสียเนื่องจากความร้อนจากภายนอกไม่เกิน 0.1 เปอร์เซ็นต์ต่อวัน ส่วนถังที่ใช้ในการขนส่งไฮโดรเจนเหลวที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีการอัตราการสูญเสียไม่เกิน 1 เปอร์เซ็นต์ต่อวัน และถังเชื้อเพลิงไฮโดรเจนเหลว ปัจจุบันมีอัตราการสูญเสียไม่เกิน 2 – 3 เปอร์เซ็นต์ต่อวัน แต่เนื่องจากถังเชื้อเพลิงไฮโดรเจนเหลวในรถยนต์ทำงานที่ความดันค่าหนึ่ง ดังนั้น การสูญเสียจะเกิดขึ้นได้ต่อเมื่อรถจอดทิ้งไว้เกิน 2 – 3 วันไปแล้ว

2.1.4.3 การเก็บในรูปเมทัลไฮไดรด์ (Metal hydride)

ในการเกิดเมทัลไฮไดรด์นั้นกระทำได้ในอุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิสูงกว่า $200^{\circ}C$ โดยถ้ากระทำในอุณหภูมิห้องนั้นจะมีการผสม $FeTi$ และ $LaNi_5$ เข้าไปด้วย จึงทำให้สามารถจัดเก็บไฮโดรเจนได้น้อยกว่า 2 wt % ไฮโดรเจน แต่ถ้ากระทำที่อุณหภูมิสูงจะจัดเก็บรวมอยู่กับแมกนีเซียม เช่น Mg_2Ni จะจัดเก็บได้มากกว่า 7 wt % ไฮโดรเจน (Lakeman, 2001:17) การเก็บในรูปเมทัลไฮไดรด์นั้น โมเลกุลของไฮโดรเจนจะแตกตัวเป็นอะตอม จากนั้นอะตอมของไฮโดรเจนจะแทรกตัวเข้าไปอยู่ระหว่างเกรน (Grain) ของโลหะผสมที่ใช้เก็บไฮโดรเจน ซึ่งขีดความสามารถในการกักเก็บไฮโดรเจนในรูปแบบนี้นั้น จะพิจารณาที่ค่าความจุจำเพาะโดยน้ำหนัก

สำหรับโลหะผสมที่ใช้งานกันอยู่ในปัจจุบันนี้จะมีค่าความจุจำเพาะโดยปริมาตรค่อนข้างคงที่ โลหะผสมที่มีความหนาแน่นต่ำนั้นค่าความจุจำเพาะโดยน้ำหนักจะต้องสูงขึ้น นอกจากนี้ระดับของอุณหภูมิและปริมาณความร้อนที่ต้องถ่ายเทเข้าออกขณะทำงาน ก็สูงขึ้นด้วย (การทำให้เกิดเมทัลไฮไดรด์ต้องมีการถ่ายเทความร้อนออก และในการนำไฮโดรเจนกลับมาใช้งานจะต้องให้พลังงานเข้าไปก่อน)

เมื่อเปรียบเทียบการเก็บไฮโดรเจนในรูปเมทัลไฮไดรด์กับการเก็บในรูปก๊าซความดันสูงจะพบว่า การเก็บในรูปของเมทัลไฮไดรด์สำหรับปริมาณไฮโดรเจนที่เท่ากันจะต้องการปริมาตรของถังเก็บน้อยกว่าสำหรับเชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่ใช้ในรถยนต์ เมื่อพิจารณาในแง่ของความปลอดภัยและปริมาตรของถังเก็บแล้ว การเก็บในรูปเมทัลไฮไดรด์จะดีกว่าเก็บในรูปก๊าซความดันสูง เนื่องจากเมทัลไฮไดรด์มีน้ำหนักสูง การบรรจุเชื้อเพลิงไฮโดรเจนจำนวนมากจะทำให้เกิดการสั่นเปลื้องสูง ดังนั้นปริมาณเชื้อเพลิงจะต้องพอเหมาะและเหมาะสมด้วย ปัจจุบันพบว่ารถยนต์ที่ใช้เมทัลไฮไดรด์สำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงนั้น ในการบรรจุแต่ละครั้งนั้นจะมีระยะทางที่วิ่งได้ประมาณ 150 – 180 กิโลเมตร

2.1.4.4 การเก็บในรูป Cryoadsorber

การเก็บวิธีนี้ถือได้ว่าเป็นเทคนิควิธีใหม่ เช่นเดียวกับการเก็บในรูปเมทัลไฮไดรด์ แต่สำหรับวิธีนี้โมเลกุลของไฮโดรเจนจะถูกดูดไว้ด้วย Adhesion force ให้ติดกับผิวของ Adsorber ซึ่งจะเห็นได้ว่าไฮโดรเจนยังคงอยู่ในรูปก๊าซ เมื่อทำการลดอุณหภูมิลงที่ 60 – 100 K Adsorber จะดูดไฮโดรเจนไว้ โดยความหนาแน่นไฮโดรเจนที่เกาะอยู่ที่ผิวของเมทัลไฮไดรด์นั้น ค่าความจุจำเพาะ w_i และ v_i จะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของวัสดุที่ใช้เป็น Adsorber สำหรับค่าความจุจำเพาะโดยปริมาตร v_i เมื่อเทียบกับการเก็บในรูปของเมทัลไฮไดรด์จะน้อยกว่ามาก

จะเห็นได้ว่าในปัจจุบันมีการพัฒนาเทคนิคและวิธีในการจัดเก็บเชื้อเพลิงไฮโดรเจนอยู่หลายวิธีด้วยกัน ซึ่งก็เป็นข้อยืนยันได้ว่าก๊าซไฮโดรเจนมีวิธีในการจัดเก็บที่ปลอดภัยเพียงพอและเหมาะสมต่อการนำมาเป็นเชื้อเพลิง

2.2 ระบบบำบัดชนิดไร้ออกซิเจน

ปฏิกิริยาการบำบัดน้ำเสียไม่ว่าจะเป็นแบบใช้ออกซิเจนหรือไม่ใช้ออกซิเจน ล้วนแล้วแต่มีกลไกพื้นฐานร่วมกัน (มันสิน ตันจุลเวศม์, 2542 : 9/1 – 9/17) กล่าวคือทั้งคู่นั้นเป็นปฏิกิริยาเคมีแบบออกซิเดชัน – รีดักชัน หรือปฏิกิริยารีดอกซ์ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่มีการถ่ายเทอิเล็กตรอนเกิดขึ้นระหว่างสารให้และสารรับอิเล็กตรอน ทั้งนี้สารอินทรีย์หรือมลสารในน้ำเสียจะเป็นสารให้อิเล็กตรอน (เนื่องจากมีพลังงานอยู่ในตัวสูง) และสารอย่างอื่นที่อยู่ในน้ำเป็นสารรับอิเล็กตรอน ซึ่งความแตกต่างระหว่างปฏิกิริยาใช้ออกซิเจนและไม่ใช้ออกซิเจนนั้นจะอยู่ที่ประเภทของสารรับอิเล็กตรอน โดยถ้าสารรับอิเล็กตรอนเป็นออกซิเจนปฏิกิริยาก็เป็นแบบใช้ออกซิเจนหรือแอโรบิก และถ้าสารรับอิเล็กตรอนไม่ใช่ ออกซิเจน แต่เป็นคาร์บอนไดออกไซด์หรือไนเตรตหรือซัลเฟต ปฏิกิริยาก็จะเป็นแบบไร้ออกซิเจน

กระบวนการไร้ออกซิเจนมีหน้าที่ 2 ประการคือ บำบัดสลัดจ์หรือสร้างเสถียรภาพให้กับตะกอนอินทรีย์ (อาจเป็นจุลินทรีย์หรือสารอินทรีย์ใด ๆ ก็ได้) และบำบัดน้ำเสีย เมื่อพิจารณาในด้านการบำบัดสลัดจ์ กระบวนการไร้ออกซิเจนมักเป็นส่วนหนึ่งที่จำเป็นของระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้ทำลายสารอินทรีย์

ในตะกอนสลัดจ์ ซึ่งเป็นผลมาจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ เมื่อพิจารณาในการบำบัดน้ำเสีย กระบวนการไร้ออกซิเจนนั้นมักเป็นกระบวนการขั้นต้น ที่ใช้ในการลดความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสียให้เหลือน้อยลงก่อนส่งต่อไปให้กระบวนการแอโรบิก เพื่อทำการกำจัดสารอินทรีย์ส่วนที่เหลือ วิธีการเช่นนี้ช่วยประหยัดพลังงานและสารเคมีที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียได้มากและเป็นที่ยอมรับกันทั่วไป

กระบวนการไร้ออกซิเจนมีลักษณะเฉพาะตัวซึ่งแตกต่างจากกระบวนการใช้ออกซิเจนอย่างเด่นชัดหลายประการยกตัวอย่าง เช่น

- กระบวนการไร้ออกซิเจนได้ก๊าซมีเทนเป็นผลสุดท้ายของปฏิกิริยา
- มีอัตราการสร้างตะกอนสลัดจ์ต่ำมาก
- ไม่สามารถลดความเข้มข้นของสารอินทรีย์ให้เหลือน้อยได้
- มีเสถียรภาพต่ำ
- ต้องการไนโตรเจนและฟอสฟอรัสต่ำ

ลักษณะเฉพาะตัวเหล่านี้ล้วนแล้วแต่เป็นผลสืบเนื่องมาจากลักษณะสมบัติทางชีวเคมีของกระบวนการไร้ออกซิเจนทั้งสิ้น ซึ่งกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนนั้น มีขั้นตอนและวิธีการที่สำคัญดังต่อไปนี้

2.2.1 ลักษณะทั่วไป

ภายในถังปฏิกรณ์หรือถังย่อยแบบไร้ออกซิเจนนั้น สารประกอบอินทรีย์ขนาดเล็กจะถูกชนเข้าไปในเซลล์เมมเบรนของแบคทีเรียได้โดย ส่วนสารประกอบที่มีขนาดใหญ่เกินไปจะต้องถูกย่อยด้วยเอนไซม์ให้มีขนาดเล็กจนสามารถถูกส่งผ่านเข้าไปในเซลล์ได้เสียก่อน เมื่อสารอินทรีย์สามารถส่งผ่านเข้าไปอยู่ในเซลล์ได้แล้วจะถูกออกซิไดซ์หลายครั้ง จนในที่สุดกลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ และมีเทนซึ่งในการเปลี่ยนแปลงของสารอินทรีย์จนกระทั่งได้ผลสุดท้ายนั้น มีอยู่หลายขั้นตอนดังแสดงในภาพ 1

ปฏิกิริยาที่ใช้ลดขนาดสารอินทรีย์ เพื่อให้สามารถนำเข้าไปในเซลล์ได้นั้นมักจะเป็นปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ซึ่งใช้เอนไซม์ที่ปล่อยออกมาจากเซลล์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โมเลกุลขนาดเล็กที่สร้างขึ้นโดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะถูกใช้เป็นแหล่งคาร์บอน และแหล่งพลังงานของแบคทีเรีย โดยผ่านกระบวนการเฟอร์เมนเตชัน (Fermentation) ซึ่งผลสุดท้ายจะมีทั้งสารที่อยู่ในรูปปริดิวิสและรูปออกซิไดส์โดยผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในรูปออกซิไดส์ส่วนใหญ่ได้แก่ กรดอินทรีย์ระเหย (Volatile acids) ที่มีคาร์บอนไม่เกิน 5 อะตอม ปฏิกิริยาในการสร้างกรดอินทรีย์เหล่านี้เรียกว่าเอซิโดเจเนซิส (Acidogenesis) และแบคทีเรียที่ทำหน้าที่ในขั้นนี้เรียกว่าแบคทีเรียสร้างกรด ส่วนผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในรูปปริดิวิสนั้นจะเป็นสารอินทรีย์หลายประเภทที่มีปริมาณแตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของแบคทีเรียและสภาวะแวดล้อมของถังปฏิกรณ์เช่น แบคทีเรียสร้างกรดบางชนิดนั้นสามารถใช้โอโซนของ

ไฮโดรเจนเป็นสารรับอิเล็กตรอน (แทนสารอินทรีย์) ทำให้เกิดโมเลกุลของไฮโดรเจนเป็นผลสุดท้ายของปฏิกิริยา ซึ่งในกรณีเช่นนี้จะไม่มีผลผลิตของปฏิกิริยาที่อยู่ในรูปรีดิวซ์เกิดขึ้นหรือมีเกิดขึ้นน้อยมาก

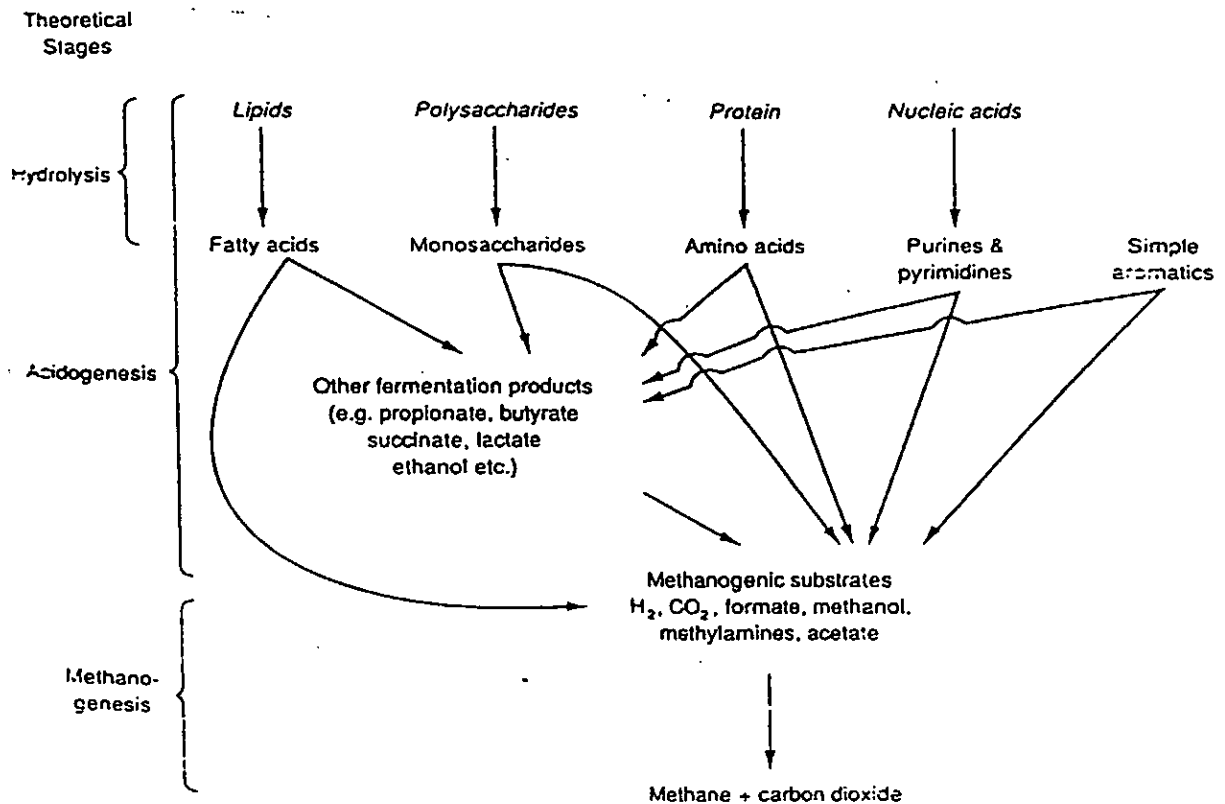
นอกจากนี้แบคทีเรียบางตัวยังสามารถใช้กรดอินทรีย์ขนาดใหญ่ หรือสารอินทรีย์อื่นในการสร้างกรดอะซิติก คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนดังภาพ 1 ปฏิกิริยาหลังที่สามารถสร้างไฮโดรเจนได้จากกรดอินทรีย์ขนาดใหญ่เรียกว่า ไฮโดรจีโนจีเนซิส (Hydrogeno – Genesis) เนื่องจากแบคทีเรียที่สร้างไฮโดรเจนมักสร้างกรดอินทรีย์ได้ด้วยแต่แบคทีเรียที่สร้างกรดได้อาจจะไม่สามารถสร้างไฮโดรเจนได้ก็ได้ ดังนั้นนักวิทยาศาสตร์จึงถือว่าแบคทีเรียที่สร้างไฮโดรเจนนั้นเป็นชนิดหนึ่งของแบคทีเรียที่สร้างกรด แบคทีเรียทั้งสองชนิดอาจรวมเรียกได้ว่าเป็นแบคทีเรียที่ไม่สร้างมีเทน (Non – Methanogenic Bacteria) แบคทีเรียอีกประเภทหนึ่งสามารถย่อยสลายไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ กรดฟอร์มิก และกรดอะซิติกเพื่อสร้างก๊าซมีเทน แบคทีเรียประเภทหลังนี้เรียกว่า แบคทีเรียสร้างมีเทน

2.2.2 ชนิดของแบคทีเรียในปฏิกิริยาย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน

ก. แบคทีเรียที่ไม่สร้างมีเทน

แบคทีเรียประเภทนี้จะประกอบไปด้วยเซลล์ที่ไม่ต้องการออกซิเจนอย่างเด็ดขาด (Obligate Anaerobes) และพวกที่ใช้ออกซิเจนได้บ้าง (Facultative Anaerobes) เดิมเชื่อว่าประเภทหลังมีจำนวนมากกว่า แต่ในปัจจุบันได้พบแล้วว่า ประเภทแรกมีจำนวนมากกว่าหลายสิบเท่าเนื่องจากเมตาบอซึมของแบคทีเรียประเภทไม่สร้างมีเทนมีได้หลายแบบ ดังนั้นผลของปฏิกิริยาที่ได้จึงเป็นไปได้ต่าง ๆ นานา ดังที่กล่าวไปแล้วว่าผลของปฏิกิริยาที่จะได้จะอยู่ในโมเลกุลอย่างง่าย เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน กรดฟอร์มิก กรดอะซิติกและเมทานอล ซึ่งจะถูกเปลี่ยนไปเป็น กรดอะซิติก ไฮโดรเจน หรือสารโมเลกุลอย่างง่ายอย่างอื่นเสียก่อนถึงจะถูกเปลี่ยนไปเป็นมีเทนได้

ในปัจจุบันนี้พบว่า แบคทีเรียประเภทไม่สร้างมีเทนที่สามารถสร้างไฮโดรเจนได้จากกรดอินทรีย์ขนาดใหญ่มีบทบาทสำคัญในฐานะเป็นตัวเชื่อมระหว่างแบคทีเรียที่สร้างกรดแบบธรรมดาและแบคทีเรียที่สร้างมีเทน ทั้งนี้เพราะปฏิกิริยาที่สร้างไฮโดรเจน เช่น ปฏิกิริยาฟอสฟอโรคลาสติก (Phosphoroclastic) นั้นจะสามารถสร้างกรดอะซิติกได้จากสารอินทรีย์ชนิดอื่น ๆ ด้วย นักวิจัยได้พบว่าไฮโดรเจนที่สร้างขึ้นหากสะสมตัวอยู่ภายในถึงปฏิกิริยาจะเป็นพิษต่อแบคทีเรียที่สร้างมันขึ้นมา แต่ทั้งนี้ไฮโดรเจนถูกใช้รีดิวส์คาร์บอนไดออกไซด์ให้กลายเป็นมีเทน



ภาพประกอบ 1 ลักษณะขั้นตอนของปฏิกิริยาย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน
ที่มา : Matcalf & Eddy. (1991). Waste Engineering (treatment disposal reuse) 3rd p.425.

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการอยู่ร่วมกันระหว่างแบคทีเรียที่สร้างและไม่สร้างมีเทนให้ประโยชน์ซึ่งกันและกัน แบคทีเรียที่ไม่สร้างมีเทนมอบกรดอะซิติกและสารอินทรีย์อย่างง่าย ให้เป็นอาหารของแบคทีเรียสร้างมีเทน ส่วนแบคทีเรียที่สร้างมีเทนช่วยทำลายก๊าซไฮโดรเจนให้กับแบคทีเรียที่ไม่สร้างมีเทน ลักษณะการดำรงชีวิตร่วมกันของแบคทีเรีย 2 กลุ่มดังกล่าวเรียกว่ามีชีวิตร่วมแบบ Syntrophic

ข. แบคทีเรียที่สร้างมีเทน

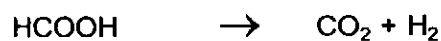
จากการรายงานผลของงานวิจัยต่าง ๆ ได้แสดงให้เห็นแล้วว่าแบคทีเรียที่สร้างมีเทนนั้นจะเจริญเติบโตได้ช้ามาก และยังเป็นเซลล์ที่พิถีพิถันในการเลือกชนิดของอาหารมากและบอบบาง เช่น ไม่อาจทนต่อออกซิเจนแม้มีปริมาณเพียงเล็กน้อยหรือไม่อาจเจริญเติบโตได้ดีเมื่ออยู่

ภายนอกช่วงของพีเอชระหว่าง 6.8 – 9.2 เป็นต้น ด้วยเหตุนี้การศึกษาวิจัยที่เกี่ยวกับแบคทีเรียชนิดนี้ จึงต้องประสบกับความยุ่งยากนานาและไม่สามารถหาหนทางไปได้เร็วเท่าที่ควร จะเห็นได้ว่าสับสเตรตที่แบคทีเรียสร้างมีเทนทุกกลุ่มสามารถใช้ได้มีเพียง ไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ และกรดฟอร์มิก เท่านั้น ซึ่งจะมีเพียงกลุ่มเดียวที่ใช้กรดอะซิติกและเมทานอลได้ ข้อเท็จจริงที่ว่าแบคทีเรียสามารถสร้างกรดอินทรีย์ได้หลายชนิดและสารอินทรีย์อื่น ๆ ด้วย แต่กลับพบว่าตัวที่สร้างมีเทนต้องการสารอินทรีย์บางชนิดอย่างเจาะจง ทำให้ต้องมีสารอีกจำนวนมากยังคงค้างอยู่ ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ระบบไร้ออกซิเจนมักจะไม่สามารถลดซีโอดีของน้ำเสียให้เหลือต่ำได้เท่ากับกรณีของระบบที่ใช้ ออกซิเจน

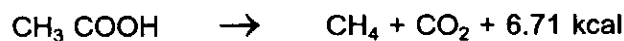
แบคทีเรียที่สร้างมีเทนแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ชนิดแรกสร้างมีเทนจาก คาร์บอนไดออกไซด์และได้พลังงานจำนวนมากจากไฮโดรเจน ซึ่งเรียกแบคทีเรียชนิดแรกนี้เรียกว่า hydrogenotrophic methanogen หรือเรียกสั้น ๆ ว่า Hydrogen utilizer หรือผู้บริโภคไฮโดรเจน



แบคทีเรียชนิดนี้สามารถใช้กรดฟอร์มิกเป็นสับสเตรตได้ ทั้งนี้เนื่องมาจากว่ากรดฟอร์มิกสามารถเปลี่ยนไปเป็นไฮโดรเจน และ คาร์บอนไดออกไซด์ได้ง่าย



แบคทีเรียที่สองสร้างมีเทนจากกรดอะซิติก จากการทดลองที่ใช้กัมมันตภาพรังสีเป็นตัวจับร่องรอยพบว่า มีเทนส่วนใหญ่ได้จากการแตกตัวของกรดอะซิติก ดังนี้



ซึ่งเรียกแบคทีเรียชนิดนี้ว่า Acetoclastic methanogen แต่ผลปรากฏว่าปฏิกิริยานี้ให้พลังงานไม่พอเพียงในการดำรงชีวิตของเซลล์ แต่นักวิจัยพบว่าการสร้าง ATP (Adenosine triphosphate) เพื่อให้ได้พลังงานในการดำรงชีวิตของแบคทีเรียนั้น สามารถเกิดขึ้นได้โดยใช้พลังงานจากการเคลื่อนที่ของ H^+ (Proton Motive Force) ผ่านเซลล์เมมเบรน วิธีการสร้างพลังงานแบบนี้เรียกว่า Chemosmosis

2.2.3 ขั้นตอนของปฏิกิริยาการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน

ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ แบบไร้ออกซิเจนนั้นมีอยู่หลายขั้นตอนด้วยกัน ซึ่งจะเกิดขึ้นตามลำดับขั้นของปฏิกิริยาชีวเคมี โดยในการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนนั้นมีอยู่ทั้งหมด 4 ขั้นตอนดังต่อไปนี้คือ (เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ. 2538 : 274 – 275)

- ก. ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)
- ข. กระบวนการอะซิโดเจเนซิส (Acidogenesis)
- ค. การสร้างอะซิโดเจเนซิส (Acetogenesis)
- ง. การสร้างมีเทน (Methanogenesis)

ซึ่งขั้นตอนทั้ง 4 นี้ต้องอาศัยแบคทีเรีย 3 ประเภท ได้แก่ แบคทีเรียสร้างอะซิเตด แบคทีเรียสร้างกรด และแบคทีเรียสร้างมีเทน ดังภาพ 2 แสดงวิธีการเปลี่ยนแปลงตัวกระบวนการใช้ออกซิเจนของไขมัน โปรตีนและคาร์โบไฮเดรต หรือ แป้ง ขั้นตอนต่าง ๆ ในการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ก. ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

กระบวนการนี้อาจเรียกอีกอย่างหนึ่งว่ากระบวนการแตกสลายโพลีเมอร์ (Polymer break – down) ในขั้นนี้สารประกอบอินทรีย์ประเภทซับซ้อนทั้งที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมันจะถูกทำให้ละลายน้ำ โดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสซึ่งใช้เอนไซม์ที่ขับออกมาสู่ภายนอกเซลล์ของแบคทีเรีย เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะได้สารประกอบอินทรีย์ที่ไม่ซับซ้อน และละลายน้ำได้ เช่น น้ำตาลกลูโคส กรดอะมิโน กรดไขมัน ในขั้นกระบวนการนี้เป็นเพียงการเปลี่ยนสารประกอบอินทรีย์ที่ซับซ้อนไปเป็นสารประกอบอินทรีย์อย่างง่ายเท่านั้น ยังไม่มีการลดซีโอดีในขั้นตอนนี้

ข. กระบวนการอะซิโดเจเนซิส (Acidogenesis)

สารประกอบอินทรีย์อย่างง่ายที่ละลายน้ำ ที่สร้างขึ้นโดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส จะถูกแบคทีเรียประเภทที่ดำรงชีวิตอยู่ได้ทั้งสภาพที่มีและไม่มีออกซิเจนอิสระ (Facultative bacteria) โดยใช้เป็นแหล่งคาร์บอนและพลังงานโดยกระบวนการเฟอร์เมนเตชัน (Fermentation) ผลของปฏิกิริยาจะได้กรดโวลาทิลที่มีคาร์บอนไม่เกิน 5 ตัว เช่น กรดอะซิติก (Acetic acid) กรดโพรไพโอนิก (Propionic acid) กรดบิวไทริก (butyric acid) กรดวาเลอริก (Valeric acid) แบคทีเรียจำพวกนี้เรียกว่า แบคทีเรียพวกสร้างกรด (Acid former หรือ non – methanogenic bacteria) ซึ่งชนิดของแบคทีเรียแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของสารอินทรีย์ นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับความเข้มข้นและสภาพแวดล้อมของปฏิกิริยาด้วย

ค. การสร้างอะซิโดเจเนซิส (Acetogenesis)

กรดโวลาทิลที่เกิดขึ้นจากกระบวนการอะซิโดเจเนซิสจะถูกเปลี่ยนโดยแบคทีเรียโฮโมอะซิโตเจนิก (Homoacetogenic bacteria) ให้เป็นอะซิเตด (Acetate) ฟอर्मेट (Formate) ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นสารประกอบสำคัญในการสร้างมีเทน แบคทีเรียกลุ่มนี้อาจเรียกว่าแบคทีเรียที่สร้างไฮโดรเจน (Hydrogen forming bacteria) เนื่องจากแบคทีเรียที่สร้างไฮโดรเจนมักสร้างกรดอินทรีย์ได้ แต่ตัวที่สร้างกรดได้อาจจะไม่สามารถสร้างไฮโดรเจน จึงถือว่าแบคทีเรียที่สร้างไฮโดรเจนเป็นชนิดของแบคทีเรียที่สร้างกรด แบคทีเรียทั้งสองชนิดอาจรวมเรียกได้ว่าเป็นแบคทีเรียที่ไม่สร้างมีเทน (Non – methanogenic bacteria)

ทั้งกระบวนการสร้างกรดและกระบวนการอะซิโดเจเนซิส นี่ถือเป็นกระบวนการที่สำคัญในการสร้างไฮโดรเจน เช่น ในการย่อยสลายน้ำตาลกลูโคสซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ได้จากขั้นไฮโดรไลซิส

ถ้าในการย่อยสลายนั้นได้เป็นการดอะเซติกเพียงอย่างเดียว พบว่าใน 1 โมลของกลูโคสหลังจากถูกย่อยสลายแล้ว จะมีไฮโดรเจนเกิดขึ้น 4 โมล ดังสมการ (Hobson & Wheatley. 1992 : 40)



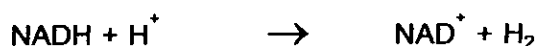
ง. การสร้างมีเทน (Methanogenesis)

ไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ กรดฟอร์มิก และกรดอะซิติก ซึ่งเป็นผลของปฏิกิริยาของแบคทีเรียที่สร้างกรดและไฮโดรเจน ซึ่งจะถูกใช้โดยแบคทีเรียอีกประเภทหนึ่งเพื่อสร้างมีเทนแบคทีเรียประเภทนี้เรียกว่า แบคทีเรียสร้างมีเทน (Methanogenic bacteria) ซึ่งกรดอะซิติกและไฮโดรเจนจะถูกแบคทีเรียใช้สร้างก๊าซมีเทน ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน แต่กรดอินทรีย์ระยะเหยที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม ไม่สามารถถูกเปลี่ยนเป็นมีเทนได้โดยตรง แบคทีเรียจะต้องเปลี่ยนกรดอินทรีย์ระยะเหยต่าง ๆ ให้เป็นกรดอะซิติกหรือไฮโดรเจนเสียก่อนจึงจะใช้ผลิตมีเทนได้ ดังภาพ 2

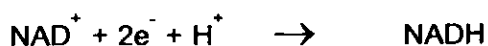
ซึ่งในการศึกษาเรื่องผลของแหล่งคาร์บอนและจุลินทรีย์ที่มีผลต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจน ในถังปฏิกริยาไร้อากาศแบบไม่ต่อเนื่องในครั้งนี ก็มีขั้นตอนเป็นไปตามกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน แต่จะควบคุมกระบวนการย่อยสลายให้สิ้นสุดถึงเพียงแค่กระบวนการอะซิโดเจเนซิสเท่านั้น ได้ทำการทำลายแบคทีเรียที่สร้างมีเทน โดยการต้มสัจด์หรือตะกอนที่จะใช้ในการเริ่มต้นของการหมัก ที่อุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที เพื่อกำจัดแบคทีเรียที่สร้างมีเทน ทั้งนี้เพราะแบคทีเรียที่สร้างมีเทนนั้นจะสามารถเจริญเติบโตอยู่ได้ที่อุณหภูมิ 2 ช่วง คือ ที่อุณหภูมิปานกลาง คือ 35-40 องศาเซลเซียส และ ช่วงอุณหภูมิสูงคือ 55 – 60 องศาเซลเซียส (เครือวัลย์ เคลื่อนสูงเนิน. (2537) และเมื่อนำมาต้มที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสจึงทำให้แบคทีเรียที่สร้างมีเทนไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้และตายไป ทำให้เหลือแต่เพียงแบคทีเรียที่สร้างไฮโดรเจน เพราะแบคทีเรียที่สร้างไฮโดรเจนสามารถดำรงชีวิตในช่วงอุณหภูมิสูง และในการต้มนี้ยังช่วยเร่งการสร้างสปอร์ของแบคทีเรียดังกล่าวอีกด้วย (Preheat tretment)(Sung. S. 2002)

2.2.4 บทบาทของไฮโดรเจนที่มีต่อกระบวนการย่อยไร้ออกซิเจน

เป็นที่ทราบกันแน่นอนแล้วว่าขั้นตอนต่าง ๆ ของการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน มีการผลิตไฮโดรเจนเกิดขึ้นตลอดเวลา ไฮโดรเจนเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาปลดปล่อย H^+ ของโคเอนไซม์ NADH (Nicotinamide Adenine Dinucleotide Hydrogen) ดังสมการ

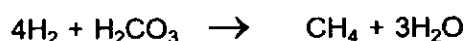


ปฏิกิริยาข้างต้นนี้ เป็นการฟื้นอำนาจของ NAD^+ (Nicotinamide Adenine Dinucleotide) เพื่อนำมาใช้เป็นพาหะของอิเล็กตรอนในปฏิกิริยารีดอกซ์ ซึ่งผลของปฏิกิริยาจะได้ NADH (ดังสมการ)



ในสภาวะที่ความดันพาหะของไฮโดรเจนมีค่าต่ำกว่า H_2 จะสามารถลอยหนีจากน้ำในบรรยากาศขึ้นไปสู่ถังย่อย เป็นผลให้ปฏิกิริยา H_2 สามารถเกิดขึ้นจากซ้ายไปขวาได้ตลอดเวลาปฏิกิริยา

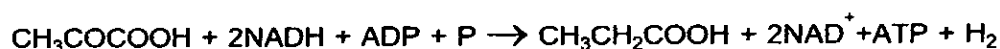
เช่นนี้ จึงเกิดขึ้นได้เอง ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการถ่ายเทของอิเล็กตรอนของปฏิกิริยาย่อยไร้ออกซิเจนจะมี H_2 เกิดขึ้นพร้อม ๆ กัน หากปฏิบัติการไร้ออกซิเจนสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพแล้ว ไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจะถูกใช้ผลิตมีเทนโดยอาศัยแบคทีเรียที่สร้างมีเทนที่เรียกว่า hydrogen utilizer หรือ ผู้บริโภคไฮโดรเจน ดังสมการ



การสะสมตัวของไฮโดรเจนจึงไม่เกิดขึ้นความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนจึงมีค่าต่ำตลอดเวลา อย่างไรก็ตามถ้าการทำลายไฮโดรเจนมิได้เกิดขึ้น อาจเป็นเพราะไม่มีแบคทีเรียผู้บริโภคไฮโดรเจนหรือเพราะสาเหตุอื่น ๆ ไฮโดรเจนสะสมตัวมากขึ้นจนถึงจุดอิ่มตัวและทำให้ความดันพาร์เชียลสูงขึ้น สภาพเช่นนี้มีผลกระทบต่อปฏิบัติการไร้ออกซิเจน 2 อย่างคือ ผลกระทบต่อการสร้างกรดอินทรีย์ระเหย และผลกระทบต่อการสร้างกรดอะเซติกจากกรดไพรูวอิก ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.2.5 ผลกระทบต่อการสร้างกรดอินทรีย์ระเหย

เมื่อไฮโดรเจนละลายน้ำมากจนมีความดันพาร์เชียลสูง NADH จะไม่สามารถปลดปล่อย H^+ ได้ด้วยวิธีปกติ แบคทีเรียจึงจำเป็นต้องใช้วิธีอื่นในการปลดปล่อย H^+ จาก NADH ให้กลับคืนเป็น NAD^+ ใหม่ นักวิจัยพบว่า การปลดปล่อย H^+ ของ NADH สามารถเกิดขึ้นควบคู่กับปฏิกิริยาออกซิเดชันของกรดไพรูวิก ให้กลายเป็นกรดไพรูวอิก ดังนี้

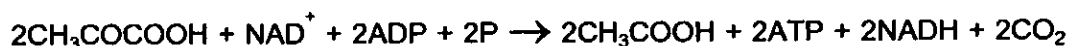


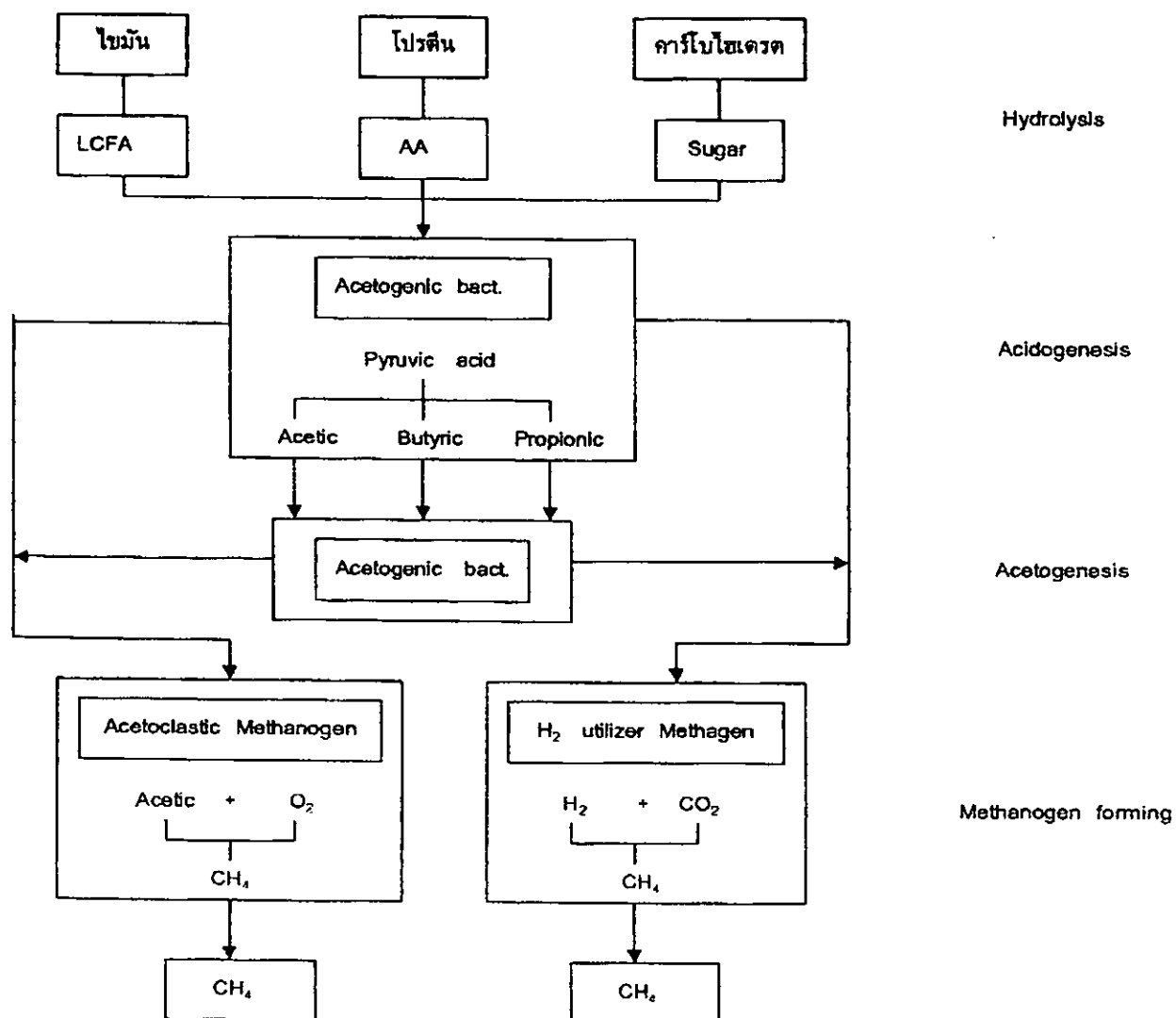
เมื่อ ADP = Adenosine Diphosphate

ATP = Adenosine Triphosphate

NADH = Nicotinamide Adenine Dinucleotide Hydrogen

ปฏิกิริยาข้างต้นเกิดขึ้นได้ภายใต้สภาวะที่ความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจน มีระดับสูงกว่า 2×10^{-3} บรรยากาศ (เท่ากับไฮโดรเจนละลายน้ำ 4×10^{-3} มิลลิกรัมต่อลิตร) อนึ่งถ้าความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนมีระดับต่ำ กรดไพรูวิกจะถูกออกซิไดซ์กลายเป็นกรดอะซิติก ดังสมการ

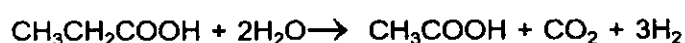




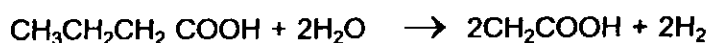
ภาพประกอบ 2 ขั้นตอนการย่อยสลายไขมัน โปรตีน และคาร์โบไฮเดรต แบบไร้ออกซิเจน
ที่มา : ดัดแปลงมาจาก มั่นสิน ตันจุลเวศม์. (2542). เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม(เล่ม 2).

9/12

หากมีกรดไพรูฟอิกเกิดขึ้นในระหว่างการย่อยไร้ออกซิเจน กรดไพรูฟอิกจะต้องถูกเปลี่ยนเป็นกรดอะซิติกก่อนจึงจะใช้สร้างมีเทนได้ ปฏิกริยาชีวเคมีจะเป็น ดังนี้



จะสังเกตได้ว่ามีไฮโดรเจนเกิดขึ้นด้วย แต่ถ้าหากว่าไม่สามารถกำจัดไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นได้ ปฏิกริยาจะหยุดและไม่สามารถเปลี่ยนกรดโพไฟโฟนิกให้เป็นกรดอะซิติก แต่ถ้าหากความดันพาร์เซียของไฮโดรเจนสูงกว่า 9×10^{-3} บรรยากาศ จะมีกรดโพไฟโฟนิกสะสมตัวอยู่ในระบบ เนื่องจากไม่สามารถเปลี่ยนเป็นกรดอะซิติก ในทำนองเดียวกันถ้าความดันพาร์เซียของไฮโดรเจนต่ำกว่า 2×10^{-3} บรรยากาศ กรดบิวไทริกสามารถเปลี่ยนเป็นกรดอะซิติกได้ ดังนี้



ปฏิกริยานี้จะไม่เกิดขึ้น หากความดันพาร์เซียของไฮโดรเจนเกิน 2×10^{-3} บรรยากาศ การสะสมตัวของกรดโพไฟโฟนิก หรือกรดอินทรีย์ระเหยต่าง ๆ จะทำให้ พีเอชของระบบมีค่าต่ำลงจนกระทั่งอยู่ในสภาวะที่ไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย นอกจากนี้ นักวิจัยยังพบว่า กรดโพไฟโฟนิกเป็นพิษต่อแบคทีเรียไร้ออกซิเจนอีกด้วย

2.3 ความรู้เบื้องต้นและความสำคัญของแป้ง (กล้านรงค์ ศรีรอด. 2543)

ในการวิจัยและศึกษาในครั้งนี้ได้ใช้แป้งมันสำปะหลัง และแป้งข้าวเจ้า เป็นแหล่งคาร์บอนให้กับจุลินทรีย์ในกระบวนการหมัก ซึ่งแป้งทั้ง 2 ชนิดนี้มีลักษณะและคุณสมบัติที่สำคัญดังรายละเอียดต่อไปนี้คือ

แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่สะสมอยู่ในพืชชั้นสูง พบในคลอโรพลาสต์ (ในใบ) และในส่วนที่พืชใช้เป็นแหล่งเก็บอาหาร เช่น เมล็ดและหัว มนุษย์ได้รับแป้งจากพืชแตกต่างกันตามภูมิประเทศในโลก ทางด้านทวีปอเมริกาเหนือ/กลาง จะมีข้าวโพด ข้าวสาลีเป็นแหล่งให้แป้งที่สำคัญ ทางยุโรปมีมันฝรั่ง และแถบเอเชีย แอฟริกา มีข้าวและมันสำปะหลัง เป็นต้น แต่แป้งที่สำคัญที่มีการใช้กันทั่วโลกคือ แป้งข้าวโพด แป้งมันฝรั่ง แป้งข้าวสาลีและแป้งมันสำปะหลัง แป้งเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญในโภชนาการของมนุษย์ อาหารโดยส่วนใหญ่จะมีแป้งเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น ข้าว ขนมปัง ก๋วยเตี๋ยว และพาสต้า เป็นต้น

ในการผลิตนั้น แป้ง หมายถึง คาร์โบไฮเดรตที่มีองค์ประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน เป็นส่วนใหญ่ มีสิ่งอื่นเจือปน เช่น โปรตีน ไขมัน เกลือแร่ น้อยมาก ส่วนแป้งที่ผลิตโดยทั่วไปที่ยังมีส่วนประกอบอื่น ๆ อยู่มาก จะเรียกว่า ฟลาวัวร์ (Flour) ตัวอย่าง เช่น แป้งข้าวโพด แป้งข้าวสาลี ถ้ายังมีส่วนประกอบของโปรตีนสูง ก็จะจัดอยู่ในประเภทฟลาวัวร์ เรียกว่า corn flour, wheat flour เช่นเดียวกันกับแป้งข้าวเจ้าที่ยังมีโปรตีน 7 ถึง 8% ก็เรียกว่า rice flour แต่เมื่อสิ่งเจือปนอันหมายถึงโปรตีน ไขมัน เกลือแร่อื่น ๆ ถูกสกัดออกไป จนเหลือแป้งบริสุทธิ์เป็นส่วนใหญ่จึงเรียกว่า แป้งสตาร์ช (Starch) เช่น corn starch wheat starch เป็นต้น สำหรับแป้งมันสำปะหลังที่ผลิตในประเทศไทย ในปัจจุบันผลิตโดยกรรมวิธีทันสมัย มีความบริสุทธิ์ของแป้งสูง จัดเป็นแป้งสตาร์ช

(Cassava starch) คำว่าแป้งที่จะกล่าวต่อไปนี้จึงหมายถึงแป้งสตาร์ช และเนื่องจากแป้งสตาร์ชมีความบริสุทธิ์สูง และแป้งสตาร์ชยังไม่ได้ถูกทำการตัดแปรรูปหรือแปรรูป นิยมเรียกว่าแป้งดิบ (raw starch หรือ native starch) ซึ่งจะตรงกันข้ามกับแป้งที่ถูกตัดแปรรูปหรือแปรรูปแล้ว ที่เรียกว่า โมดิไฟด์สตาร์ช (Modified starch) หรือแป้งตัดแปรรูป

ก. ส่วนประกอบอื่นๆภายในเม็ดแป้ง

ส่วนประกอบอื่น ๆ ภายในเม็ดแป้ง แบ่งออกเป็น

- ส่วนที่ไม่ใช่แป้งที่แยกได้จากแป้ง (Particulate material) ได้แก่ โปรตีนที่ไม่ละลาย และผนังเซลล์ซึ่งจะมีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตแป้ง
- ส่วนที่ติดกับพื้นผิวของเม็ดแป้ง (Surface material) ซึ่งสามารถสกัดออกได้โดยไม่ต้องทำลายเม็ดแป้ง เช่น เยื่อหุ้มอะมิโลพลาสต์
- ส่วนที่ติดอยู่ภายในเม็ดแป้ง (Internal components) สามารถแยกออกได้โดยการทำลายเม็ดแป้ง เช่น ไขมันในแป้งจากธัญพืช หมูฟอสเฟตในแป้งมันฝรั่งและสารประกอบไนโตรเจนในแป้ง
- ส่วนประกอบอื่นที่มีผลต่อลักษณะและคุณสมบัติของเม็ดแป้งที่สำคัญ ได้แก่ ไขมัน โปรตีน เถ้า และฟอสฟอรัส ซึ่งมีปริมาณแตกต่างกันในแป้งแต่ละชนิด โดยส่วนใหญ่แป้งจะมีองค์ประกอบของไขมันอยู่ต่ำกว่า 1% ชนิดของไขมันที่มีอยู่ในแป้งมีผลต่อคุณสมบัติของแป้ง เช่น มีผลต่อความหนืดของแป้ง ดังนั้นในการวิเคราะห์คุณสมบัติของแป้งจะต้องกำจัดไขมันออกจากแป้งโดยสกัดด้วยตัวทำละลายหรือย่อยสลายโดยใช้น้ำย่อย

2.6.2 แป้งข้าว

ข้าวเจ้า หรือ *Oryza sativa* L. มีต้นกำเนิดในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ มีหลายพันธุ์ ได้แก่ พันธุ์อินดิกา (*O. sativa indica*) ปลูกมากในแถบมรสุม ซึ่งมีฝนตกชุกและแสงแดดเพียงพอ และพันธุ์จาปอนิกา (*O. sativa japonica*) ปลูกในพื้นที่เขตอบอุ่น ข้าวที่ใช้ในกระบวนการผลิตจะเป็นข้าวหักหรือข้าวเกร็ดสองที่ไม่เหมาะต่อการบริโภคโดยตรง ข้าวหักมีองค์ประกอบต่าง ๆ แป้งข้าวเจ้ามีการใช้ในอุตสาหกรรมอาหารต่าง ๆ มากมาย ใช้เป็นส่วนประกอบของแป้งฝุ่นในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งแป้งฝุ่นสำหรับเด็กเนื่องจากแป้งข้าวไม่เป็นพิษและไม่มีสารระคายเคือง และใช้เป็นสารทำให้แข็ง (laundry stiffening agent) ในการซักผ้า

ในการผลิตแป้งข้าวเจ้าในประเทศไทยนั้น ถ้าเป็นการไม่เปียกจะมีโปรตีนและสิ่งแปลกปลอมส่วนใหญ่ยังติดอยู่กับแป้ง ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้เป็นประเภทฟลาวัวร์ (Rice flour) และนิยมใช้ข้าวประเภทที่มีอะมิโลสสูง ทั้งนี้เพราะเมื่อนำไปประกอบอาหาร เช่น ทอด จะให้ความกรอบแข็งหรือนำไปนึ่ง เมื่อเย็นลงจะเกิดแผ่นฟิล์ม (เช่น ก๋วยเตี๋ยว เส้นหมี่) ข้าวหอมมะลิที่บริโภคไม่เหมาะสมใช้ผลิตฟลาวัวร์ เพราะมีปริมาณอะมิโลสต่ำ ส่วนในการผลิตแป้ง สตาร์ช (Rice starch) คือการสกัดเอา

โปรตีนและสิ่งแปลกปลอมในแ่งฟลาวาร์ออกจนเกือบหมด ปัจจุบันในประเทศไทยเริ่มมีการผลิตแ่งสตาร์ชจากข้าวกันบ้างแล้ว

2.6.3 แ่งมันสำปะหลัง

แ่งมันสำปะหลังมีลักษณะเป็นผงละเอียด สีขาว ลักษณะเด่นของแ่งมันสำปะหลังคือ มีความบริสุทธิ์สูง มีสิ่งปนเปื้อนต่ำ โดยจะมีสตาร์ชอยู่มากร้อยละ 95 และมีปริมาณโปรตีนและไขมันอยู่ค่อนข้างต่ำ ($< 1\%$) มีฟอสฟอรัสน้อยกว่า 0.04% ลักษณะของเมล็ดแ่งเมื่อตรวจดูด้วยกล้องจุลทรรศน์จะมีรูปร่างเป็นเม็ดกลมหรือรูปไข่ และอาจมีรอยบุ๋มที่ปลายด้านหนึ่งของเม็ด เม็ดแ่งโดยส่วนใหญ่จะมีขนาดปานกลางคืออยู่ในช่วง 3 – 40 ไมครอนและมีขนาดโดยเฉลี่ยประมาณ 12 – 15 ไมครอน ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าเม็ดแ่งมันฝรั่ง (5 – 10 ไมครอน) แต่ใหญ่กว่าแ่งข้าวเจ้า

แ่งมันสำปะหลังจัดเป็นแ่งที่มีปริมาณอะมิโลสค่อนข้างต่ำคือ 18 – 23% และมีขนาดแตกต่างกัน โครงสร้างของอะมิโลสจะประกอบด้วยส่วนที่เป็นเส้นตรงและส่วนที่เป็นกิ่ง

จะเห็นว่าแ่งมันสำปะหลังและแ่งข้าวเจ้านั้นมีคุณสมบัติพื้นฐานที่แตกต่างกัน ดังนั้นผู้วิจัยจึงตั้งสมมติฐานไว้ว่าเมื่อใช้แหล่งคาร์บอนที่ต่างกัน ซึ่งได้แก่ แ่งมันสำปะหลัง และ แ่งข้าวเจ้า มาผลิตก๊าซไฮโดรเจนจะทำให้ได้ผลแตกต่างกันด้วย

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ตามทฤษฎีแล้วในการหมักกลูโคสเพื่อผลิตก๊าซไฮโดรเจนนั้น จะได้ค่าสูงสุดตามอัตรากลูโคส 1 โมล จะได้ไฮโดรเจน 4 โมล (Thauer, 1977 : unpage) และถ้าใช้ซูโครสเป็นสับสเตรตแล้วอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจะมีค่าสูงสุดเป็น ซูโครส 1 โมล ได้ไฮโดรเจน 8 โมล และถ้าสับสเตรตทั้งหมดสามารถเปลี่ยนไปเป็นกรดอะซิติก ค่าในทางทฤษฎีจะเป็น 0.467 L-H₂/g-COD และถ้าสับสเตรตทั้งหมดสามารถเปลี่ยนไปเป็นกรดบิวทริกได้ทั้งหมดแล้ว กลูโคส 1 โมล จะได้ไฮโดรเจน 2 โมล และซูโครส 1 โมล จะได้ไฮโดรเจน 4 โมล (Fang ;& Liu, 2001 : unpage)

นอกจากนี้แล้วยังมีผู้ทำการทดลองเพื่อศึกษาการผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยใช้ซูโครสเป็นสับสเตรตและใช้เชื้อที่แยกมาจากดินที่ปลูกมันฝรั่ง จากนั้นนำดินมาอบโดยใช้ความร้อน 2 ชั่วโมง และต้มอีก 15 นาที (heat – shock treatment) เพื่อคัดเลือกเฉพาะแบคทีเรียที่สร้างสปอร์และผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้เช่น *Clostridium* จากการทดลอง เมื่อใช้ซูโครสความเข้มข้น 15 – 45 g COD/L ค่า pH 4.5 – 6.5 อัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นและอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจะลดลง เมื่อลดความเข้มข้นของซูโครสจาก 45 – 15 g COD/L พบว่าความเข้มข้นของสับสเตรตมีผลต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจนของ *Clostridium* มากกว่า ค่า pH 5.5 นั้นเหมาะสมต่อการสร้างสปอร์ของ *Clostridium* มากที่สุด นอกจากนี้ยังได้มีการศึกษาการผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยใช้แบคทีเรียจากแหล่งต่าง ๆ โดยนำแบคทีเรียมาจากดินที่ปลูกมันฝรั่ง และดินที่ปลูกถั่วลิสง จากนั้นนำดินนี้มาผสมกับปุ๋ยหมักสองชนิดและ

ตั้งชื่อเป็นปุ๋ยหมักสูตร 1 และปุ๋ยหมักสูตร 2 ซึ่งจะได้แบคทีเรีย 4 กลุ่มด้วยกันคือ จากดินที่ปลูกมันฝรั่ง ดินที่ปลูกถั่วลิสง ปุ๋ยหมักสูตร 1 และปุ๋ยหมักสูตร 2 แล้วนำแบคทีเรียเหล่านี้ผสมลงในหลอดทดลองขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำโครสและสารอาหารลงไปให้อัตรา 9 8 12 และ 10 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ พบว่าความเข้มข้นของไฮโดรเจนสูงสุดเป็น 82 เปอร์เซ็นต์และมีค่าเฉลี่ย 52 เปอร์เซ็นต์ ค่าสูงสุดของอัตราการเปลี่ยนไปเป็นไฮโดรเจนเมื่อใช้แบคทีเรียจากดินที่ปลูกมันฝรั่ง ดินที่ปลูกถั่วลิสง ปุ๋ยหมักสูตร 1 และปุ๋ยหมักสูตร 2 เป็น 12, 15, 18 และ 19 mL/g (COD*L) ตามลำดับ และอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนสูงสุดเป็น 575 290 672 และ 592 mL/(L*day) ตามลำดับ จากการวิจัยครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าสามารถใช้แบคทีเรียจากหลาย ๆ แหล่งผสมกันเพื่อผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ (Ginke ; Sung ; & Lay. 2001 : Abstract)

เลย์ และลี (Lay ; & Lee. 1999 : 2579 – 2586) ได้ศึกษาการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากของเสียที่เป็นสารอินทรีย์ซึ่งเป็นของแข็ง (Organic municipal solid waste) โดยใช้แบคทีเรียจากสองแหล่งคือ จากตะกอนของระบบบำบัดน้ำเสียและนำมาต้มนาน 15 นาที ทั้งนี้เพื่อให้เหลือแต่แบคทีเรียที่สามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ เช่น จินัส *Clostridium* และจากแบคทีเรียที่ผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ซึ่งแยกมาจากดินที่ปลูกถั่วลิสง พบว่าในแต่ละกรัมของสามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้สูงสุดถึง 140 และ 180 มิลลิลิตร โดยแบคทีเรียจากสองแหล่งคือจากตะกอนของระบบบำบัดน้ำเสียและนำมาต้มนาน 15 นาที (Pretreated) จะให้อัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนสูงสุดที่ $45 \text{ mLgVSS}^{-1} \text{ h}^{-1}$ อัตราส่วน F/M มีค่าสูง ส่วนแบคทีเรียที่ผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ซึ่งแยกมาจากดินที่ปลูกถั่วลิสงนั้น จะสามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้สูงสุดเป็น $36 \text{ mLg VSS}^{-1} \text{ h}^{-1}$ อัตราส่วน F/M มีค่าต่ำ งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้แหล่งของแบคทีเรียแตกต่างกัน จะมีอัตราส่วนของค่า F/M ที่เหมาะสมต่อการควบคุมระบบเพื่อผลิตก๊าซไฮโดรเจนที่แตกต่างกัน

บุรานาเกิร์ลและคณะ (Burunakarl ; et al 1987. 13–19) ได้ศึกษาการผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยใช้แป้งดิบของข้าวโพด มันฝรั่ง และมันสำปะหลัง เป็นแหล่งคาร์บอนของแบคทีเรียสังเคราะห์แสง *Rhodospseudomonas gelatinosa* สายพันธุ์ T-14 และ T-20 โดยใช้เชื้อปริมาณ 5 มิลลิลิตร พบว่า สายพันธุ์ T-14 สามารถใช้แป้งข้าวโพดดิบเป็นแหล่งคาร์บอนได้ โดยสามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ทั้งหมดเท่ากับ 35 มิลลิลิตร ภายหลังจากการบ่มเชื้อในสภาวะ anaerobic – light ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 ชั่วโมง และเมื่อใช้แป้งมันฝรั่งดิบและแป้งมันสำปะหลังดิบเป็นแหล่งให้อิเล็กตรอนพบว่าการผลิตไฮโดรเจนได้เท่ากับ 23 และ 18.5 มิลลิลิตร ตามลำดับและที่สภาวะเดียวกัน แต่เปลี่ยนสายพันธุ์ของแบคทีเรียมาเป็น T-20 พบว่าสามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ทั้งหมดเท่ากับ 35 และ 16 มิลลิลิตร ตามลำดับ

ซุง และ ดวงมณี (Sung ; & Duangmanee, T. 2002 : unpage) ได้ศึกษาการผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยใช้โครสเป็นแหล่งคาร์บอน และใช้แบคทีเรียจากตะกอนของระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร

อากาศ โดยทำการต้มที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที เพื่อกำจัดแบคทีเรียที่ไม่สร้างสปอร์ ออกไปให้เหลือแต่แบคทีเรียที่สร้างไฮโดรเจน ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง pH 5.5 พบว่า สามารถผลิต ก๊าซไฮโดรเจนได้ในอัตราส่วน 0.0892 L-H₂/g-COD และ 1.5291 H₂ mol/COD mol และเมื่อนำตะกอน จากถังปฏิกิริยาที่ทดลองนั้นมาศึกษาทาง T-RFLP พบว่า เชื้อที่เด่นคือ *Clostridium* และ *Bacillus*

นอกจากนี้ได้มีการศึกษาการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ยีสต์ที่มีผ่านการ อบแล้ว และทำการทดลองในถังปฏิกิริยาขนาด 7 ลิตร ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส และมี อัตราการป้อนสารความเข้มข้นจาก 40 – 60 kg COD/m³ d พบว่าตะกอนจะมีการจับตัวเป็นชั้นหนา ลอยอยู่ด้านบนของถังปฏิกิริยา และมีไฮโดรเจนเกิดขึ้นความเข้มข้น 290 – 640 ppm และสามารถลด ค่า COD จาก 12, 170 mg/L ให้เหลือเพียง 2,940 mg/L หรือมีประสิทธิภาพลดค่า COD ได้ถึง 75 เปอร์เซ็นต์ (Guwy ; Hawkes ; & Rozzi. 1997 : 1291 – 1298)

คาตาโอกา และ คิริยามา (Kataoka ; & Kiriya. 1997 : 41 – 47) ได้ศึกษาการผลิตก๊าซ ไฮโดรเจนและกรดไขมันโดยใช้แบคทีเรีย *Clostridium* สายพันธุ์ SC-E1 โดยเลี้ยงในระบบต่อเนื่องที่มี อากาศและสัญญาณในหลอดทดลองปริมาตร 1,040 มิลลิลิตร มีปริมาตรใช้งานจริง 600 มิลลิลิตรเติม กลูโคสและโพสเฟตอน ที่มีความเข้มข้น 0.5 และ 1.0 เปอร์เซ็นต์ ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 30 องศา เซลเซียส ค่า pH 6.7 HRT 8 ชั่วโมง ซึ่งได้ผลออกมาดังนี้คือ ในระบบที่เป็นสัญญาณทำการบ่มเชื้อ หลังจากเวลาผ่านไป 16 วัน ที่ความเข้มข้นของสับสเตรต 0.5 เปอร์เซ็นต์มีไฮโดรเจนเกิดขึ้น 2.0 – 2.3 mol-H₂/mol-glucose และที่ความเข้มข้นของสับสเตรต 1.0 เปอร์เซ็นต์ มีไฮโดรเจนเกิดขึ้น 1.4 – 2.0 mol-H₂/mol-glucose ตามลำดับ ส่วนการผลิตกรดไขมันนั้นพบว่ามีอัตราเท่ากันทั้งสองระบบ กล่าวโดย สรุปได้ว่าการผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยใช้แบคทีเรียคลอสทิดียมสายพันธุ์ SC-E1 เป็น 1.3 – 2.2 mol-H₂/mol-glucose ซึ่งน้อยกว่าในทางทฤษฎีถึง 50 เปอร์เซ็นต์

นีโอกิ และ มิซุโน (Nioka ; & Mizuno. 2000 : 155 – 162) ได้ศึกษาการผลิตก๊าซไฮโดรเจน จากการหมักโดยใช้แบคทีเรียที่ไม่ใช้แสง ใช้ของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่แปรรูปถั่ว รำข้าว และรำ ข้าวสาลี ทดลองในระบบที่ไม่ต่อเนื่อง พบว่าของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่แปรรูปถั่วสามารถ ผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ 54 – 78 เปอร์เซ็นต์ รำข้าวสามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ 43 – 68 เปอร์เซ็นต์ และรำข้าวสาลีสามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ 42 – 72 เปอร์เซ็นต์ และยังพบว่าของเสียจากโรงงาน อุตสาหกรรมที่แปรรูปถั่วสามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ 14 – 21 mL/g-VS รำข้าวสามารถผลิตก๊าซ ไฮโดรเจนได้ 13 – 61 mL/g-VS และรำข้าวสาลีสามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ 10 – 43 mL/g-VS หรือ มีอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยการย่อยสลายสับสเตรตที่เป็นคาร์โบไฮเดรต และสามารถผลิตก๊าซ ไฮโดรเจนได้ดังนี้คือ ของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่แปรรูปถั่วสามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ 2.54 H₂/mol-hexose รำข้าวสามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ 1.29 H₂/mol-hexose และรำข้าวสาลี สามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ 1.73 H₂/mol-hexose แบคทีเรียจะสามารถย่อยสลายแบคทีเรียได้

หลังจากที่ไม่ได้เขย่าแล้ว นอกจากนี้ยังพบว่าโปรตีนนั้นแบคทีเรียจะย่อยสลายเพื่อเป็นสับสเตรตได้ยากมาก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าคาร์โบไฮเดรตเป็นสับสเตรตหลักที่จะใช้ในการผลิตก๊าซไฮโดรเจน

โอกาโมโต และคณะ (Okamoto ; e.t. 2000 : 25 – 32) ได้ศึกษาการผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยเปรียบเทียบสับสเตรต 7 ชนิด ได้แก่ ข้าว กะหล่ำปลี แครอท ไข่ เนื้อที่มีไขมันน้อย ไขมัน และหนังไก่ และทำการทดลองในระบบที่ไม่ต่อเนื่อง ซึ่งในการศึกษานี้มีจุดประสงค์เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนของคาร์โบไฮเดรต ไขมันและโปรตีน จากการทดลองพบว่า ข้าวสามารถผลิตไฮโดรเจนได้ 19.3 – 96.0 mL/g-VS กะหล่ำปลีสามารถผลิตไฮโดรเจนได้ 26.3 – 7 mL/g-VS และแครอทสามารถผลิตไฮโดรเจนได้ 44.9 – 70.7 mL/g-VS และเมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์ของไฮโดรเจนจากก๊าซชีวภาพ พบว่า กะหล่ำปลีได้เป็น 33.9 – 55.1 เปอร์เซ็นต์ แครอทได้เป็น 22.7 – 46.8 เปอร์เซ็นต์ และข้าวได้เป็น 44.0 – 45.6 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ซาง และ ชิว (Chang ; & Lin. 2003 : unpage) ได้ทำการศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของถังปฏิกริยาของระบบยูเอเอสบีต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจน โดยในการทดลองนั้นจะใช้ถังปฏิกริยา 2 ถัง ที่มีอัตราส่วนของความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของถังเป็น 3.8 และ 7.4 ตามลำดับ ทำการทดลองเป็นระยะเวลา 5 เดือน ใช้ซูโครสเป็นสับสเตรตมีความเข้มข้น 20 g-COD/L ในการทดลองในครั้งนี้จะใช้ตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียชุมชน ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 34 – 36 องศาเซลเซียส pH 6.7 HRT 24 – 6 ชั่วโมง จากการทดลองพบว่า ที่ HRT 24 ชั่วโมงสามารถผลิตไฮโดรเจนได้ 106 mmol-H₂/L-day และจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อลด HRT ลงไป และพบว่าที่ HRT 8 ชั่วโมงนั้นจะสามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ถึง 512 mmol-H₂/L-day จากการทดลองนี้พบว่าถังปฏิกริยาที่มีค่าอัตราส่วนของความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของถังที่มีค่าสูงจะมีความเหมาะสมต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจน มากกว่าถังปฏิกริยาที่มีค่าอัตราส่วนของความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของถังต่ำ

มิง และคณะ (Ming ; e.t. 2003 : unpage) ได้ทำการศึกษาผลของระยะเวลาในการทำปฏิกริยา (HRT) ที่มีต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยการหมักซึ่งแปรเปลี่ยนสับสเตรดหลายชนิดในการทดลองนั้นได้นำตะกอนจากถังปฏิกริยาของระบบบำบัดน้ำเสียแบบ UASB ของโรงงานอุตสาหกรรมอาหาร ในขั้นแรกบำบัดตะกอนโดยการต้มระยะเวลานานประมาณ 30 นาที องค์ประกอบของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมนี้จะมีโปรตีนเป็นองค์ประกอบหลัก คาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบรอง และมีไขมันบ้างเล็กน้อย ในการปรับสภาพตะกอนให้เข้ากับสิ่งแวดล้อมใหม่นั้นทำได้โดยการนำตะกอนมาใส่ในขวดแก้วที่บรรจุสารอาหารและกลูโคสซึ่งวัดจากค่า COD ความเข้มข้น 3,000 mg/L เปปตอนความเข้มข้น 2,000 mg/L แล้วเลี้ยงตะกอนเพื่อเพิ่มจำนวนเซลล์ จากนั้นเติมตะกอนที่ได้ลงไปในถังที่มีการไหลและกวนอย่างต่อเนื่อง ในขั้นการทดลองนั้นจะเริ่มทดลองที่ HRT 24 ชั่วโมงและลดจำนวนชั่วโมงลงไปเรื่อย ๆ จนถึง 6 ชั่วโมง จากการทดลองที่ได้พบว่าไฮโดรเจนที่ผลิตได้สูงสุดเป็น 5.6 mmol/g COD หรือ 3,470 mg-MLVSS/L ที่ HRT 6 ชั่วโมง

นอกจากนี้ยังได้มีการศึกษาองค์ประกอบของสับสเตรตที่มีผลต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจน ในการทดลองนั้นจะแปรเปลี่ยนอัตราส่วนของกลูโคสต่อเปปตอน (ใช้ความเข้มข้นของค่า COD/COD) ดังนี้คือ 0/5 1/4 2/3 3/2 4/1 และ 5/0 ตามลำดับ โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส และเขย่าขวดทดลองในอัตราเร็ว 100 รอบต่อนาที จากผลการทดลองพบว่าอัตราส่วนของกลูโคสต่อเปปตอนนั้นมีผลต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ซึ่งการผลิตไฮโดรเจนสูงสุดจะเกิดขึ้นที่อัตราส่วนเข้มข้นของกลูโคสต่อเปปตอนเป็น 6.4 mmol-H₂/g-COD หรือเปปตอน 40 เปอร์เซ็นต์ และกลูโคส 60 เปอร์เซ็นต์ พบว่าไฮโดรเจนทั้งหมดที่จะได้มาจากกลูโคสเท่านั้นไม่ได้มาจากเปปตอน (Ming ; Cheng : & Chao. 2003 : unpagged)

จากการรวบรวมเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องแล้ว ทำให้ผู้วิจัยมีความสนใจที่จะศึกษาการผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยใช้ระบบไร้อากาศแบบไม่ต่อเนื่อง ซึ่งใช้แป้งมันสำปะหลัง และแป้งข้าวเจ้า เป็นแหล่งคาร์บอนให้กับจุลินทรีย์ ทั้งนี้เพราะเมื่อพิจารณาจากกระบวนการผลิตแล้ว พบว่าแป้งทั้งสองชนิดนี้มีองค์ประกอบที่แตกต่างกัน กล่าวคือแป้งข้าวเจ้าจัดอยู่ในประเภทฟลาวร์ (flour) มีโปรตีนเป็นองค์ประกอบประมาณ 7 – 8 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเรียกกันว่า rice flour ส่วนแป้งมันสำปะหลังนั้นปัจจุบันผลิตโดยกรรมวิธีที่ทันสมัยมากมีการสกัดองค์ประกอบต่าง ๆ ออกไป มีความบริสุทธิ์ของแป้งสูง จึงจัดอยู่ในประเภทสตาร์ช (Cassava starch) (กล้านรงค์ ศรีวรรต. 2546 : 1) นอกจากนี้แล้วยังแปรเปลี่ยนแหล่งที่มาของจุลินทรีย์จาก 2 แหล่งด้วยกัน คือ จากถังบำบัดน้ำเสียของระบบยูเอเอสบี ของบริษัทท โรงเส้นไหม ชอเฮง จำกัด จ. นครปฐม และจากสลัดจ์จากถังหมักตะกอนของโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำชุมชนห้วยขวาง ทำให้ตะกอนจากสองแหล่งนี้มีแบคทีเรียที่ต่างชนิดกัน

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากแป้งมันสำปะหลัง และแป้งข้าวเจ้า โดยใช้ถังปฏิกริยาไร้อากาศแบบไม่ต่อเนื่อง (Anaerobic batch reactor) ที่ผู้วิจัยได้สร้างขึ้น และได้ทำการทดลองในระหว่าง เดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2547 – กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2548 ณ ห้อง 15 – 623 และ 15-624 ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป และ ห้องปฏิบัติการของภาควิชาชีวเคมี คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ โดยในการทดลองครั้งนี้ผู้วิจัยได้ดำเนินการวิจัยตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 3.1 ออกแบบและสร้างถังปฏิกริยาไร้อากาศแบบไม่ต่อเนื่อง อุปกรณ์สำหรับเก็บก๊าซ และอุปกรณ์สำหรับไล่อากาศในถังเก็บก๊าซ
- 3.2 การเตรียมตะกอนจุลินทรีย์และน้ำแป้งสังเคราะห์เพื่อใช้ในการทดลอง
- 3.3 การทดลองเพื่อผลิตก๊าซไฮโดรเจน
- 3.4 การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์
- 3.5 การศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซไฮโดรเจน โดยการเติมเชื้อจุลินทรีย์บริสุทธิ์ลงในถังปฏิกริยา

3.1 การออกแบบและสร้างถังปฏิกริยาไร้อากาศแบบไม่ต่อเนื่อง อุปกรณ์สำหรับเก็บก๊าซ และอุปกรณ์สำหรับไล่อากาศในถังเก็บก๊าซ

3.1.1 การออกแบบและสร้างถังปฏิกริยาไร้อากาศแบบไม่ต่อเนื่อง

ถังปฏิกริยาที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้แบ่งออกเป็น 2 ขนาดคือ ถังปฏิกริยาขนาด

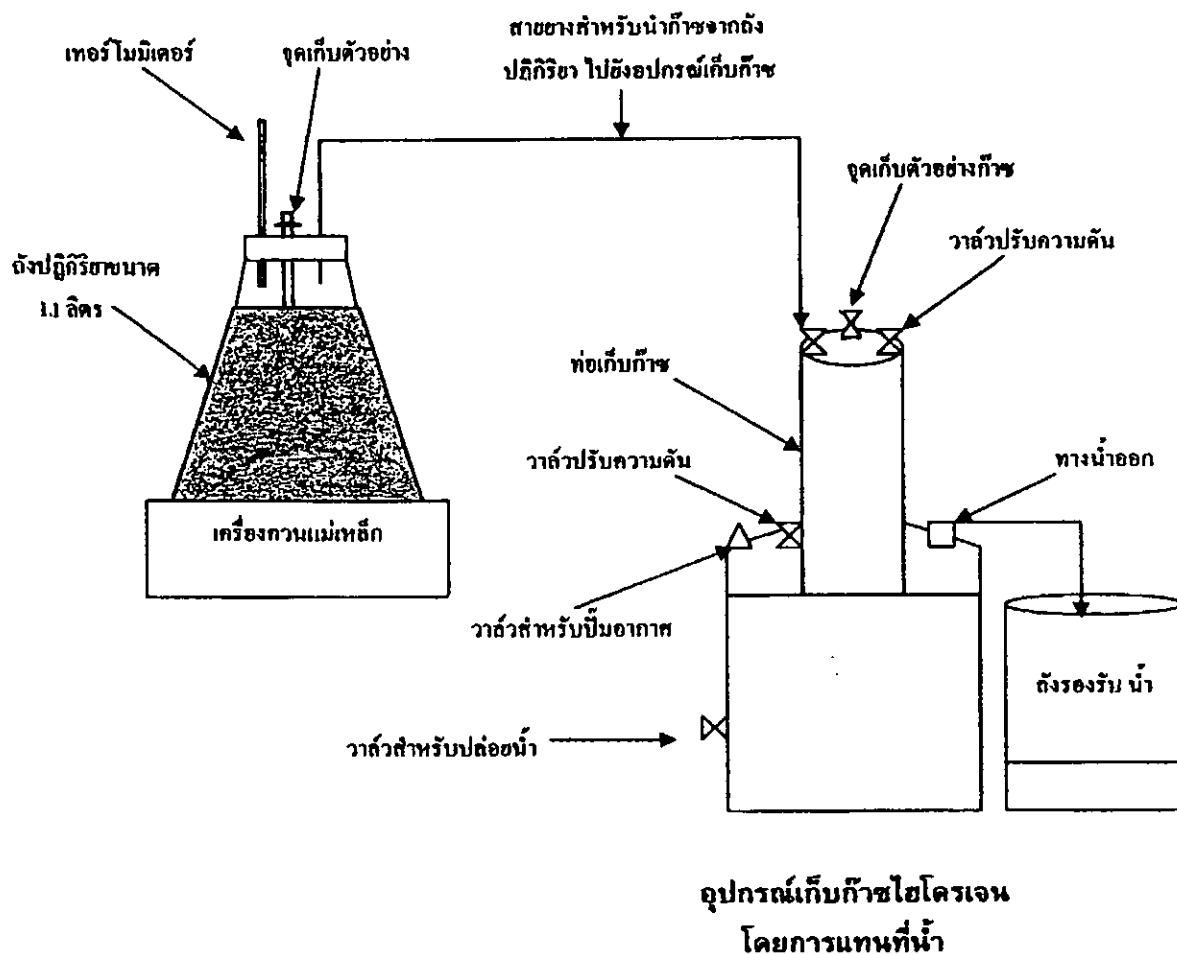
1.10 ลิตร และถังปฏิกริยาขนาด 5.51 ลิตร ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้คือ

3.1.1.1 ถังปฏิกริยาขนาด 1.10 ลิตร ปริมาตรใช้งานจริง (Working volume)

1 ลิตร จำนวน 4 ถัง ซึ่งทำมาจากขวดแก้วรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask) ที่ด้านบนของขวดมีจุกยางใช้ปิดปากขวด เจาะรูที่ยางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 4.5 มิลลิเมตร จำนวน 3 รู เพื่อใส่เทอร์โมมิเตอร์ หลอดแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร ความยาว 12 เซนติเมตร สำหรับเป็นท่อถ่ายน้ำเสียออก ที่ด้านบนของท่อต่อกับสายยางซิลิโคนชนิดทนกรด ความยาว 5 เซนติเมตร โดยมีเหล็กหนีบสายยาง (Clamp) หนีบไว้ และหลอดแก้วขนาดความยาว 5 เซนติเมตรสำหรับเป็นท่อนำก๊าซซึ่งด้านบนของท่อต่อกับสายนำก๊าซยาวประมาณ 50 เซนติเมตร สำหรับนำก๊าซไปยัง

อุปกรณ์สำหรับเก็บก๊าซ ดังปฏิกริยานี้ตั้งอยู่บนเครื่องกวนแม่เหล็ก (Magnetic stirrer) ขณะทดลองปรับความเร็วรอบประมาณ 400 รอบต่อนาที

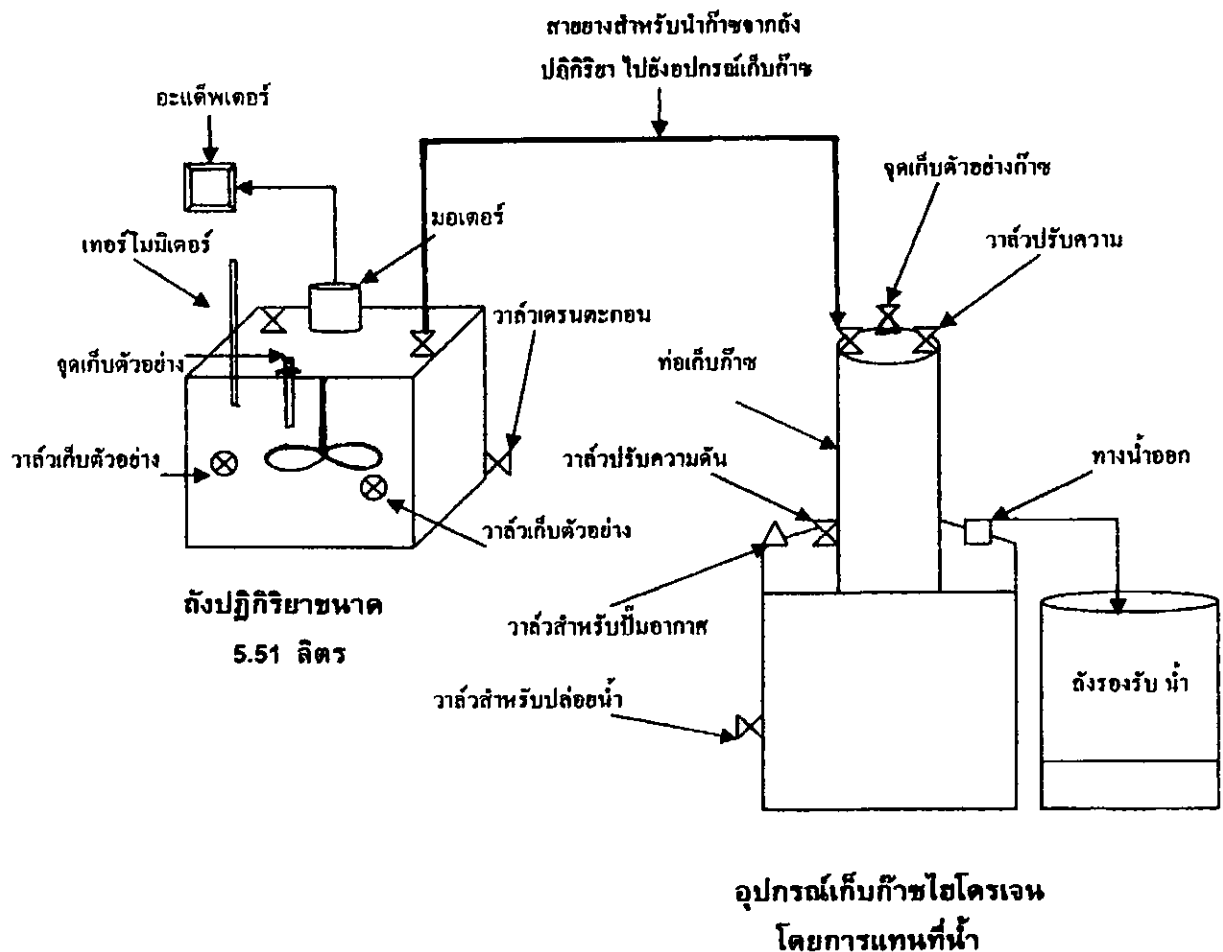
ลักษณะของถังปฏิกริยา และการจัดวางอุปกรณ์แสดงดังภาพประกอบ 3 และ ภาคผนวก ค



ภาพประกอบ 3 แสดงการจัดวางถังปฏิกริยาขนาด 1.10 ลิตร ที่ต่ออยู่กับอุปกรณ์สำหรับเก็บก๊าซ

3.1.1.2 ถังปฏิกริยาขนาด 5.51 ลิตร ทำมาจากพลาสติกอะคริลิกความหนา 3 มิลลิเมตร กว้าง 18 เซนติเมตร ยาว 18 เซนติเมตร สูง 17 เซนติเมตร ปริมาตรใช้งานจริง 4 ลิตร จำนวน 3 ถัง ด้านบนของถังปฏิกริยาติดตั้งมอเตอร์ขนาดเล็กสำหรับกวน มีความเร็วรอบประมาณ 120 รอบต่อนาที แกนของใบพัดยาว 12 เซนติเมตร ขนาดของใบพัดยาว 10 เซนติเมตร ติด

เทอร์โมมิเตอร์ วาล์วสำหรับนำก๊าซไปยังอุปกรณ์เก็บก๊าซ ท่อสำหรับเก็บตัวอย่างน้ำ ส่วนด้านข้างของถังมีวาล์วพลาสติกสำหรับเก็บตัวอย่างก๊าซ จำนวน 2 วาล์ว และมีวาล์วพลาสติกสำหรับถ่ายน้ำเสียและตะกอนออกที่ด้านล่างของถัง(วาล์วที่ใช้ควรใช้วาล์วพลาสติกเพราะน้ำเสียในระบบมีสภาวะเป็นกรด ถ้าใช้วาล์วที่เป็นโลหะมีเกิดสนิมกัดกร่อน) รอยต่อต่าง ๆ ของถังยาด้วยกาวซิลิโคนเพื่อป้องกันการรั่วซึมของก๊าซซึ่งทดสอบโดยใช้น้ำสบู่ ดังแสดงในภาพประกอบ ภาคผนวก ค



ภาพประกอบ 4 แสดงการจัดวางถังปฏิกิริยาขนาด 5.51 ลิตร ที่ต่ออยู่กับอุปกรณ์สำหรับเก็บก๊าซ

3.1.1.3 อุปกรณ์สำหรับเก็บก๊าซ ทำมาจากท่อพีวีซีอย่างหนา โดยใช้หลักการแทนที่น้ำ ซึ่งก๊าซชีวภาพที่ผลิตขึ้นจะถูกส่งผ่านสายยางมายังอุปกรณ์เก็บก๊าซที่บรรจุน้ำไว้จน

เต็ม แล้วก๊าซก็จะดันน้ำออกมายังภาชนะที่รองรับน้ำ จากนั้นนำน้ำไปวัดปริมาตรโดยใช้กระบอกตวง ซึ่งได้เป็นปริมาตรของก๊าซชีวภาพที่ระบบผลิตได้ รายละเอียดของถังและหลักการทำงาน ดังแสดงในภาพประกอบ 3 - 4 และ ภาคผนวก ค

3.1.1.4 ถังเก็บตัวอย่างก๊าซ ใช้ถังสำหรับเก็บแก๊สขนาด 1 ลิตร และ 0.5 ลิตร รุ่น QTY 1 ผลิตโดยบริษัท Phoenix medical LTD ประเทศอังกฤษ ซึ่งเป็นถังที่สามารถใช้ได้หลายครั้ง (Reusable device) ดังแสดงในภาคผนวก ค

3.1.1.5 อุปกรณ์สำหรับไล่อากาศ หรือทำให้ถังเก็บตัวอย่างก๊าซเป็นสุญญากาศ ทำมาจากกระบอกตวงขนาด 1 ลิตร ด้านบนมีฝาปิดสนิทมีวาล์วสำหรับต่อกับถังเก็บแก๊สและวาล์วสำหรับปรับความดัน ด้านล่างมีวาล์วต่อกับสายยางซึ่งต่อไปยังอุปกรณ์สำหรับปรับความดัน ดังแสดงในภาพประกอบ 4 และภาคผนวก ข

3.1.1.6 ถังสำหรับปล่อยน้ำแบ่งสังเคราะห์เข้าสู่ระบบและปล่อยน้ำเข้าสู่อุปกรณ์เก็บก๊าซ ซึ่งใช้ถังพลาสติกขนาดความจุประมาณ 5.5 ลิตร จำนวน 2 ถัง

3.1.1.7 ถังสำหรับรองรับน้ำที่ออกมาจากอุปกรณ์เก็บแก๊ส ใช้ถังพลาสติกบางใส(เพื่อให้สังเกตได้ง่าย) ขนาดความจุ 5 ลิตร จำนวน 4 ถัง

3.2 การเตรียมตะกอนจุลินทรีย์และน้ำแบ่งสังเคราะห์เพื่อใช้ในการทดลอง

3.2.1. ขั้นตอนการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์และสารอาหารเสริม

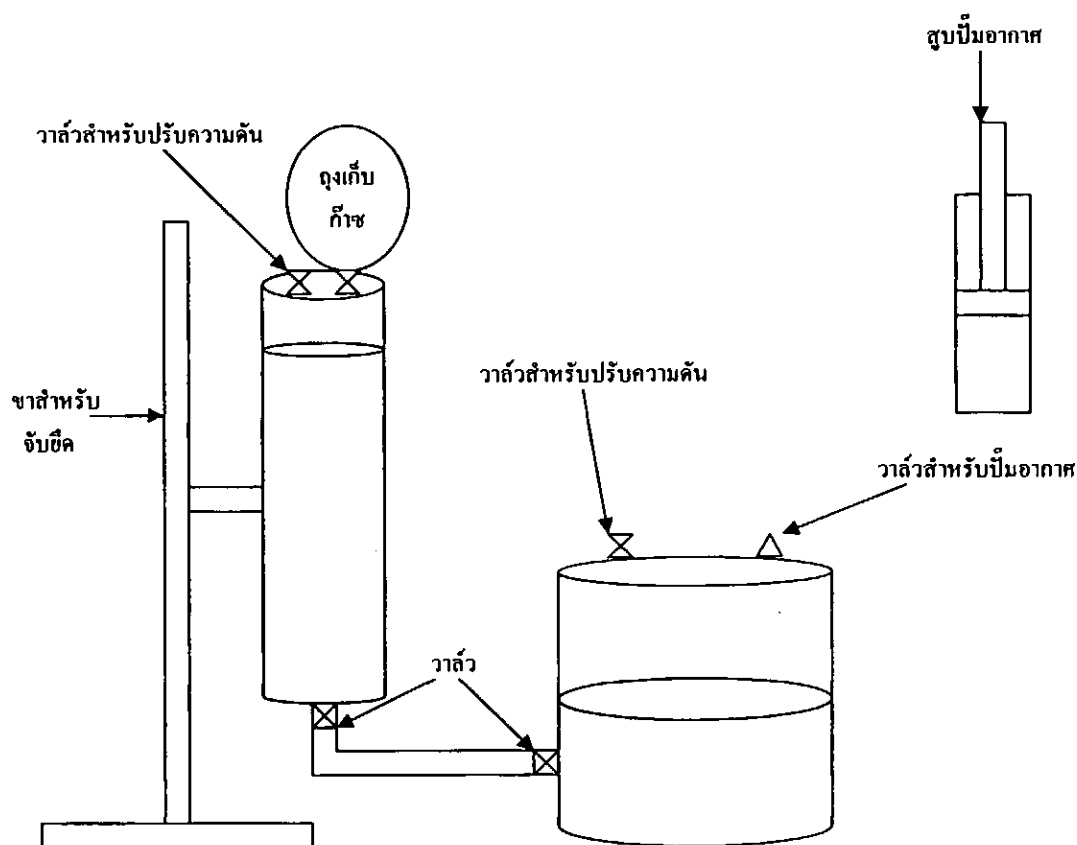
ในการเตรียมน้ำแบ่งสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลองนั้น ได้กำหนดลักษณะในรูปกรัมของแบ่ง โดยใช้แบ่งความเข้มข้น 22 กรัมต่อลิตร ซึ่งมีวิธีการเตรียมดังนี้

3.2.1.1 น้ำแบ่งสังเคราะห์สำหรับการทดลองที่ 1 – 3 (ถึงปฏิกิริยาขนาด 1.10 ลิตร) มีวิธีการเตรียมดังนี้คือ

ก. นำแบ่งมันสำปะหลัง หรือแบ่งข้าวเจ้า ตรานิวเกรต มาละลายลงในน้ำกลั่นให้มีความเข้มข้น 22 กรัมต่อลิตร ซึ่งเตรียมโดยนำแบ่งชนิดที่ต้องการเตรียมน้ำแบ่งสังเคราะห์นั้นจำนวน 22 กรัม มาละลายในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรให้เป็น 1 ลิตร

ข. เตรียมสารอาหารเสริม ซึ่งเตรียมสารอาหารให้เป็นตามสูตรดังนี้ คือซังสาร NH_4HCO_3 200 กรัม KH_2PO_4 100 กรัม $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 10 กรัม NaCl 1 กรัม $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 1 กรัม $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 1 กรัม $\text{MnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 1.5 กรัม และ FeCl_2 0.278 กรัม มาละลายในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรให้เป็น 1 ลิตร (Lay. 2001 : 280-287) สารอาหารนี้สามารถเก็บไว้เพื่อใช้ในการเริ่มระบบครั้งต่อไปได้ โดยเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

ค. กวนสารละลายให้เป็นเนื้อเดียวกันพร้อมที่จะใช้ทดลอง



ภาพประกอบ 5 แสดงลักษณะของอุปกรณ์สำหรับไล่อากาศออกจากถุงเก็บตัวอย่างก๊าซ

3.2.1.2 น้ำแข็งสักระยะสำหรับการทดลองที่ 4 (ถังปฏิกริยาขนาด 5.51 ลิตร) โดยใช้แป้งชนิดที่พิจารณาเลือกมาจากการทดลองที่ 2 และการทดลองที่ 3 โดยในการเลือกชนิดของแป้งนั้น พิจารณาจากเหตุผลหลายประการดังแสดงไว้ในบทที่ 4 การทดลองที่ 4 โดยเตรียมให้มีความเข้มข้นของแป้ง 22 กรัมต่อลิตร ซึ่งมีวิธีในการเตรียมดังนี้คือ ชั่งแป้งชนิดที่เลือกมาแล้วนั้น จำนวน 88 กรัม มาละลายในน้ำประปา (ซึ่งตั้งไว้ให้คลอรีนระเหยแล้ว) เดิมสารอาหารที่เตรียมได้จากข้อ 3.2.1.1 ข จำนวน 25 มิลลิลิตร ลงไป จากนั้นปรับปริมาตรของน้ำประปาให้เป็น 4 ลิตร กวนสารละลายที่ได้นี้ให้เป็นเนื้อเดียวกันพร้อมที่จะใช้ทดลอง

3.2.2 การเตรียมตะกอนจุลินทรีย์

ในการทดลองครั้งนี้ ใช้ตะกอนจุลินทรีย์จาก 2 แหล่งด้วยกันดังนี้คือ ใช้สลัดจ์จากถังหมักตะกอนของระบบบำบัดน้ำเสียแบบ AS (Activated sludge system) ของโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำห้วยขวาง และตะกอนชนิดเม็ดของระบบบำบัดน้ำเสียแบบ UASB (Upflow anaerobic sludge blanket) ของโรงงานเส้นไหม ช่อแฮ จ้ากัต ซึ่งจากงานวิจัยของวังและชาง (Wang, C.C. & Chang, C.W. 2002 : 2790-2793) พบว่าการแยกเศษตะกอนขนาดใหญ่ออกจากตะกอนที่ใช้ในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนก่อนจะทำให้สามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้สูงกว่าที่ไม่ได้แยกออก ดังนั้นจึงนำสลัดจ์จากถังหมักตะกอนของระบบบำบัดน้ำเสียแบบ AS มากรองด้วยตะแกรงขนาด กว้าง 2 มิลลิเมตร ยาว 2 มิลลิเมตร เพื่อแยกเศษหินหรือเศษขยะขนาดใหญ่ที่ปนมากับตะกอนออกก่อน แต่ตะกอนจากระบบยูเอเอสบีนั้นไม่ได้กรองเพราะไม่มีเศษหินหรือขยะปนมาด้วย จากนั้นนำตะกอนจากทั้งสองแหล่งนี้มาต้ม ที่ 100 องศาเซลเซียส นานประมาณ 15 นาที (Preheat treatment)(Sung, S. 2002) เพื่อยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียที่สร้างมีเทน และเร่งการสร้างสปอร์ของแบคทีเรียที่สร้างไฮโดรเจน จากนั้นนำไปเติมในถังปฏิกริยาเพื่อใช้ในการทดลอง

3.3 การทดลองเพื่อผลิตก๊าซไฮโดรเจน

3.3.1 การทดลองที่ 1 ศึกษาผลของแหล่งตะกอนจุลินทรีย์ที่มีต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจน

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบความสามารถของตะกอนจุลินทรีย์จาก 2 แหล่งคือ ตะกอนจากถังปฏิกริยาของระบบยูเอเอสบี จากหัวข้อ 3.2.2 ซึ่งเป็นตะกอนชนิดเม็ด (Granule Sludge) จากโรงงานผลิตและแปรรูปแป้ง ซึ่งเป็นตะกอนที่คุ้นเคยกับแหล่งคาร์บอนที่เป็นแป้งอยู่แล้ว กับสลัดจ์จากถังหมักตะกอนของระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนแบบ AS จากหัวข้อ 3.2.2 ซึ่งเป็นระบบที่มีอยู่ทั่วไปสามารถได้ง่าย โดยมีวิธีการทดลองดังนี้คือ

3.3.1.1 นำตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียที่เตรียมตามหัวข้อ 3.2.1.2 มาเติมลงไปในถังปฏิกริยาประมาณ 250 มิลลิลิตร

3.3.1.2 นำน้ำแป้งสังเคราะห์ที่เตรียมไว้ในหัวข้อ 3.2.1.2 เติมลงไปประมาณ 250 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารอาหารตามสูตรสารอาหารของเลย์ (Lay, 2001 280-287) ที่เตรียมได้จากหัวข้อ 3.2.1.1 ข. ตามลงไปประมาณประมาณ 5 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำกลั่นลงไป จากนั้นปรับปริมาตรให้เป็น 1 ลิตร (ถังปฏิกริยาที่ใช้เป็นขวดแก้วรูปชมพู่ปริมาตร 1 ลิตร)

3.3.1.3 ปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของการทดลองในถังปฏิกริยา ให้มีค่าประมาณ 5.5

3.3.1.4 ปิดฝาถังปฏิกริยาด้วยจุกยางที่เตรียมไว้ให้เรียบร้อย แล้วใช้ก๊าซไนโตรเจนอัดใส่ลงไปทั้งในสารละลายและที่ว่างเหนือสารละลาย (Head space) เพื่อไล่อากาศออกจากถังปฏิกริยาให้ระบบอยู่ในสภาวะไร้อากาศ (Ginkel V. S. et al. 2001:4726-4730)

3.3.1.5 นำถังปฏิกริยาไปต่อกับอุปกรณ์เก็บก๊าซ และกวนโดยใช้เครื่องกวนแม่เหล็กด้วยความเร็วรอบ 400 รอบต่อนาที

ในการทดลองขั้นนี้ใช้เวลาในการทดลอง(ระยะเวลาพักเก็บ) 5 วัน เพื่อเป็นการติดตามการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ซึ่งจะทำให้ทราบรอบการทำงานที่เหมาะสมสำหรับการผลิตก๊าซไฮโดรเจนของระบบที่ทดลอง

3.3.2 การทดลองที่ 2 ศึกษาผลของค่าพีเอชเริ่มต้น ที่มีต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจนเมื่อใช้รอบการทำงาน และ ตะกอนชนิดที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 1 เมื่อพิจารณาจากปัจจัยหลายๆ ด้าน โดยใช้แป้งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน จากนั้นทำการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองที่ 1 แต่แปรเปลี่ยน ค่าพีเอช เริ่มต้นดังนี้ คือ 4 5 6 และ 7 ตามลำดับ

3.3.3 การทดลองที่ 3 ศึกษาผลของค่าพีเอชเริ่มต้น ที่มีต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจนเมื่อใช้รอบการทำงาน และ ตะกอนชนิดที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 1 เมื่อพิจารณาจากปัจจัยหลายๆ ด้าน โดยใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอน จากนั้นทำการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองที่ 1 แต่แปรเปลี่ยนค่าพีเอช เริ่มต้นดังนี้ คือ 4 5 6 และ 7 ตามลำดับ

จากการทดลองที่ 2 และ 3 จะทำให้ทราบชนิดแหล่งคาร์บอน ค่าพีเอชเริ่มต้น ที่เหมาะสมเมื่อใช้แหล่งตะกอนที่เหมาะสม ที่ทราบจากการทดลองที่ 1

3.3.4. การทดลองที่ 4 ศึกษาและเปรียบเทียบผลของการขยายขนาดของถังปฏิกริยาที่มีผลต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจน โดยจากการทดลองที่ 1-3 เลือกแหล่งคาร์บอน (ชนิดของแป้ง) และค่า พีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจน มาขยายขนาดขึ้นมาผลิตในถังปฏิกริยาขนาดความจุ 5.51 ลิตร กว้าง 18 เซนติเมตร สูง 17 เซนติเมตร มีปริมาตรใช้งานจริง 4 ลิตร มาขยายขนาด ทำการทดลองครั้งละ 3 ถัง (3 ซ้ำ) โดยมีรอบการทำงาน (วัน) เท่ากันกับการทดลองที่ 2 และ การทดลองที่ 3

3.4 การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์

ในการทดลองครั้งนี้ทำการวัดพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

- 3.4.1 ค่าซีโอดี (COD :Chemical oxygen demand) โดยวิธี Closed Reflux Method ด้วย Dicromate
- 3.4.2 เอ็มแอลเอสเอส และ เอ็มแอลวีเอสเอส (MLSS : Mixed Liquor Suspended Solid และ MLVSS: Mixed liquor volatile suspended solid) โดยการหาน้ำหนักแห้ง
- 3.4.3 พีเอชโดยใช้ pH Meter ยี่ห้อ ORION รุ่น 960
- 3.4.4 อุณหภูมิ (Temperature) โดยใช้เทอร์โมมิเตอร์
- 3.4.5 สารตัวกลาง (Intermediate) ทั้งชนิดและปริมาณโดยใช้ GC (Gas chromatography) ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น GC-7AG

3.4.6 อัตราการผลิตก๊าซ (Gas production rate) โดยการแทนที่น้ำ

3.4.7 องค์ประกอบของก๊าซ (Gas Composition) โดยใช้เครื่อง GC (Gas Chromatography)

ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น XL ARNEL ดังแสดงรายละเอียดในภาคผนวก ก

ซึ่งในการวิเคราะห์ค่าดัชนีทั้งหมด ใช้วิธีมาตรฐานตามเอกสารอ้างอิง (Standard Methods APHA, A and WEF, 1985) โดยในแต่ละพารามิเตอร์จะมีการวัดความถี่ในการตรวจวิเคราะห์ ดังแสดงไว้ตามตาราง 3 และมีรายละเอียดของวิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังแสดงในภาคผนวก ก

3.5 การศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซไฮโดรเจน โดยการเติมเชื้อจุลินทรีย์บริสุทธิ์ลงในถังปฏิกิริยา

การทดลองที่ 5 ศึกษาผลของการเติมเชื้อจุลินทรีย์บริสุทธิ์ ที่มีต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจน ซึ่งจากการทดลองที่ 1-3 ทำให้สามารถเลือกชนิดของแบคทีเรีย และ ค่าพีเอชเริ่มต้นที่สามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้สูงที่สุดมาเติมเชื้อจุลินทรีย์บริสุทธิ์สายพันธุ์ SWU1 และ SWU2 ตามลำดับ โดยได้รับความอนุเคราะห์จาก รศ. ดร. ยุวดี วัฒนโกศาสิน ภาควิชาชีวเคมี คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ โดยในการเติมนั้นปริมาตรเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้จะคิดจาก 2 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรใช้งานจริงของถังหมัก (Working volume) ทั้งนี้เพื่อศึกษาหาแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซไฮโดรเจน ซึ่งใช้แหล่งคาร์บอน ค่าพีเอชเริ่มต้น ระยะเวลาเก็บ ที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจนซึ่งได้ จากการทดลองที่ 1 – 3 มาศึกษา โดยมีขั้นตอนการเตรียมดังนี้

เตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ (Medium) โดยในการทดลองนี้ได้เตรียมตามสูตรอาหาร LB – Broth (1000 มิลลิลิตร) ซึ่งมีสูตรอาหาร คือ

Bacteriological peptone	10 กรัม
Yeast extract power	5 กรัม
Sodium chloride (NaCl)	5 กรัม

นำสารเคมีทั้ง 3 ชนิดข้างต้นมาละลายในน้ำกลั่น และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนมีปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร นำสารละลาย LB ที่เตรียมได้ ไปเข้าเครื่อง Autoclave เพื่อฆ่าเชื้อ โดยใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดนำไปแช่เย็นที่ 4 องศาเซลเซียส เพื่อรักษาสภาพก่อนนำไปเชื้อเชื้อต่อไป ซึ่งในการเชื้อเชื้อจุลินทรีย์บริสุทธิ์ SWU1 และ SWU2 นั้น กระทำได้โดยเผาปลายขดลวด (Transfer loop) ให้ร้อนแดง รอให้เย็นสักครู่ แล้วทำการเชื้อเชื้อจุลินทรีย์บริสุทธิ์แต่ละชนิดที่อยู่บนอาหารเลี้ยงเชื้อแข็ง (Agar plate) โดยการลาก loop เบาๆ บน Agar plate นำ loop มาจุ่มลงในสารละลาย LB 200 มิลลิลิตรในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ชนิดละ 1 ขวด พร้อมทั้งลนปากขวดด้วยเปลวไฟแล้วปิดฝาให้แน่นก่อนนำไปบ่มในเครื่อง Incubator เขย่าที่ 200 รอบ ณ อุณหภูมิ

37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำสารละลายที่ได้มาวัดความขุ่น (Turbidity) ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ทุกชั่วโมง วิธีนี้อาศัยการกระจายแสง โดยการผ่านแสงลงไปกระทบกับจุลินทรีย์บริสุทธิ์ในสารละลาย เมื่อมีการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จะทำให้สามารถวัดค่าความหนาแน่นของแสง (Optical density หรือ OD) เพิ่มขึ้นตามไปด้วย (วรรณ ภาณุวัฒน์สุข. 2545 : 84) ทำให้ทราบว่าจุลินทรีย์บริสุทธิ์แต่ละชนิดมีการเจริญเติบโตดีที่สุดที่ชั่วโมงที่เท่าไร เมื่อทราบจำนวนชั่วโมงแล้ว จึงทำการเพิ่มจำนวนจุลินทรีย์ ทั้ง 3 ชนิดให้ได้ปริมาณตามต้องการ

ตาราง 3 แสดงค่าพารามิเตอร์ และความถี่ในการเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อตรวจวิเคราะห์

พารามิเตอร์	ความถี่ในการวิเคราะห์			
	น้ำก่อนเริ่มระบบ	น้ำในถังปฏิกิริยา	น้ำออก	ถังเก็บก๊าซ
1. พีเอช	ทุกครั้งก่อนเริ่ม	ทุกวัน	เมื่อครบรอบ	-
2. เอ็มแอลเอสเอส, เอ็มแอลวีเอสเอส (มิลลิกรัม/ลิตร)	ทุกครั้งก่อนเริ่ม	ทุกวัน	-	-
3. ซีโอดี	ทุกครั้งก่อนเริ่ม	ทุกวัน	เมื่อครบรอบ	-
4. อุณหภูมิ	-	ทุกวัน	-	-
5. ปริมาณก๊าซชีวภาพ (มิลลิตร)	-	-	-	ทุกวัน
6. องค์ประกอบของก๊าซ (เปอร์เซ็นต์)	-	-	-	ทุกวัน

หมายเหตุ - หมายถึง ไม่ทำการตรวจวัด

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในการทดลองครั้งนี้ เป็นการศึกษาหาแนวทางในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ โดยได้ใช้แป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอนและทำการทดลองในถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch reactor) ได้แบ่งออกเป็น 5 การทดลอง โดยขั้นแรกทำการทดลองที่ 1 เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบผลของแหล่งตะกอนจุลินทรีย์ที่มีต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยใช้แหล่งคาร์บอนต่างกัน ซึ่งในการทดลองครั้งนี้ได้ใช้ตะกอนจาก 2 แหล่งด้วยกัน ดังนี้คือ ใช้สลัดจ์ (Sewage sludge) จากถังหมักตะกอน (Digested sludge Tank) ของระบบบำบัดน้ำเสียแบบ AS (Activated sludge system) ของโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำห้วยขวาง จังหวัดกรุงเทพมหานคร และตะกอนชนิดเม็ด (Granule Sludge) ของระบบบำบัดน้ำเสียแบบ UASB (Upflow anaerobic sludge blanket) ของบริษัทโรงเส้นไหม ช่อแฮ จ้ากัก จังหวัดนครปฐม ซึ่งลักษณะทั่วไปของตะกอนแสดงดังตาราง 5 ในการทดลองขั้นนี้ใช้ค่า พีเอช เริ่มต้น 5.5 โดยทำการทดลองและติดตามผลของการเปลี่ยนแปลงรอบละ 5 วัน ในการทดลองขั้นนี้นั้นมุ่งหวังเพื่อศึกษาเปรียบเทียบความสามารถของตะกอนจากแหล่งที่ต่างกัน ที่มีผลต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจนของแหล่งคาร์บอนแต่ละชนิดตลอดจนศึกษาหาระยะเวลาหรือรอบการทำงานที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจน เมื่อใช้แป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน

จากนั้นทำการทดลองที่ 2 และ 3 เพื่อศึกษาผลของค่าพีเอชเริ่มต้น ที่มีต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจนเมื่อใช้ตะกอนจากระบบ AS ใช้แป้งข้าวเจ้าและแป้งมันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอน ซึ่งแปรเปลี่ยนค่าพีเอช ดังนี้คือ พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4 5 6 และ 7 ตามลำดับ รอบการทำงานตามระยะเวลาที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในขั้นแรก เมื่อทำการทดลองถึงขั้นนี้แล้วเลือกชนิดของแป้งมา 1 ชนิดเพื่อใช้เป็นแหล่งคาร์บอนโดยพิจารณาจากปัจจัยต่างๆ และผลการทดลองที่ได้ เพื่อนำมาศึกษาและเปรียบเทียบผลของการขยายขนาดของถังปฏิกรณ์ ที่มีผลต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจน โดยเลือกชนิดของแป้งและค่าพีเอชเริ่มต้นจากการทดลองที่ 2 และการทดลองที่ 3 ที่สามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้สูงที่สุดต่อแป้งชนิดนั้น มาขยายขนาดขึ้นมาผลิตในถังปฏิกรณ์ขนาดความจุ 5.51 ลิตร กว้าง 18 เซนติเมตร ยาว 18 เซนติเมตร สูง 17 เซนติเมตร มีปริมาตรใช้งานจริง 4 ลิตร ทำการทดลองครั้งละ 3 ถึง รอบการทำงานตามระยะเวลาที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในขั้นที่ 1

ในการทดลองขั้นสุดท้ายทำการทดลองที่ 5 เพื่อศึกษาผลของการเติมเชื้อจุลินทรีย์บริสุทธิ์ที่มีต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจน โดยเลือกชนิดของแป้ง และค่าพีเอชเริ่มต้นจากการทดลองที่ 2 และการ

ทดลองที่ 3 โดยพิจารณาจากปัจจัยหลายๆ ด้าน มาเติมเชื้อจุลินทรีย์บริสุทธิ์สายพันธุ์ SWU1 และ SWU2 รอบการทำงานตามระยะเวลาที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในขั้นที่ 1

ส่วนแบ่งที่ใช้นั้นใช้แบ่งมันสำปะหลังและแบ่งข้าวเจ้าตราฉัตรเกร็ด ทั้งนี้ในการทดลองครั้งนี้แสดงผลการทดลองได้ดังนี้

ตาราง 4 แสดงลักษณะทั่วไปของตะกอน

ลักษณะทั่วไป	แหล่งตะกอน	
	ระบบเอเอส(AS)	ระบบยูเอเอสบี (UASB)
จุดเก็บตะกอน	ถังหมักตะกอน	ถังปฏิกริยายูเอเอสบี
เอ็มแอลวีเอสเอส	19,200 (ม.ก. / ล.)	30,809 (ม.ก./ล.)
พีเอช	7.13	7.19
ลักษณะของตะกอน	ละเอียด	เป็นเม็ด (Granule Sludge)

4.1 การทดลองที่ 1 ศึกษาและเปรียบเทียบผลของแหล่งตะกอนจุลินทรีย์ที่มีผลต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจนของแหล่งคาร์บอนแต่ละชนิด

การทดลองในขั้นนี้ทำการทดลอง 5 วัน เพื่อติดตามและศึกษาการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ต่างๆ ในการผลิตก๊าซไฮโดรเจน และเพื่อให้สะดวกต่อการอธิบายขอใช้สัญลักษณ์ดังนี้คือ

1AS หมายถึง ถังปฏิกริยาที่ใช้ตะกอนจากระบบเอเอสมีแบ่งมันสำปะหลัง เป็นแหล่งคาร์บอน

2AS หมายถึง ถังปฏิกริยาที่ใช้ตะกอนจากระบบเอเอสมีแบ่งข้าวเจ้า เป็นแหล่งคาร์บอน

1UASB หมายถึง ถังปฏิกริยาที่ใช้ตะกอนจากระบบยูเอเอสบีมีแบ่งมันสำปะหลัง เป็นแหล่งคาร์บอน

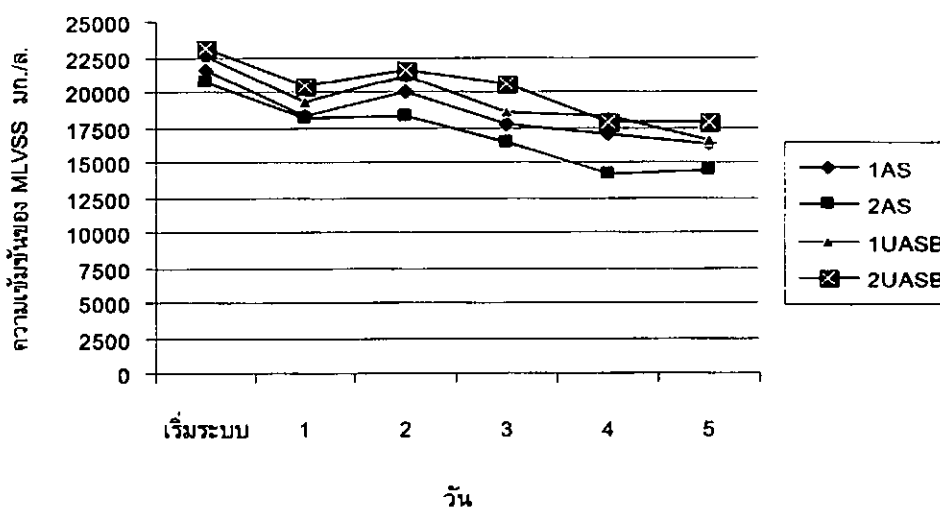
2UASB หมายถึง ถังปฏิกริยาที่ใช้ตะกอนจากระบบยูเอเอสบีมีแบ่งข้าวเจ้า เป็นแหล่งคาร์บอน

ซึ่งในการทดลองขั้นนี้พิจารณาผลจากค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้คือ

4.1.1 ค่าเอ็มแอลวีเอสเอส

การเปลี่ยนแปลงค่าเอ็มแอลวีเอสเอสในแต่ละถังปฏิกริยาตั้งแต่เริ่มต้นระบบจนถึงวันที่ 5 ของการทดลองมีรายละเอียดดังนี้คือ ถัง 1AS มีค่า 21,563 19,958 18,345 17,765 17,041 และ 16,280 มก./ล. ตามลำดับ ถัง 2AS มีค่า 20,705 18,107 18,239 16,494 14,100 และ 14,435

มก./ล. ตามลำดับ ถึง 1UASB มีค่า 22,519 19,232 21,099 18,627 18,326 และ 16,507 มก./ล. ตามลำดับ ส่วนถึง 2UASB มีค่า 23,156 20,421 21,524 20,510 17,547 และ 17,802 มก./ล. ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าค่าเอ็มแอลวีเอสเอสของแต่ละถังจะมีค่าลดลงในวันที่ 1 จากนั้นก็จะเพิ่มขึ้นในวันที่ 2 อีกเล็กน้อย และลดลงอีกแต่ไม่เปลี่ยนแปลงมากนักในวันที่ 3 4 และ 5 ซึ่งจะสังเกตได้ชัดเจนดังภาพประกอบ 6 ผลการทดลองที่ได้นี้สามารถอธิบายเหตุผลประกอบได้ว่า ในวันที่ 1 นั้นค่าเอ็มแอลวีเอสเอสในทุกถังปฏิบัติการจะลดลงเนื่องจากจุลินทรีย์จะต้องมีการปรับตัวให้เข้ากับสภาวะแวดล้อมใหม่ ทั้งนี้จากตาราง 4 จะเห็นว่าในสภาวะเดิมนั้นจุลินทรีย์เหล่านี้ดำรงชีวิตอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่มีค่าพีเอชประมาณ 7 (เป็นด่างเล็กน้อย) แต่ในการทดลองนี้มีสภาวะเป็นกรด ซึ่งสภาวะแวดล้อมที่เป็นกรดนี้ไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์บางสายพันธุ์ จึงทำให้ไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้จึงตายไป แต่ในวันที่ 2 ของการทดลองนั้นค่าเอ็มแอลวีเอสเอสมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิม เนื่องมาจากจุลินทรีย์ที่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ในสภาวะแวดล้อมนี้นั้น ได้มีการเจริญเติบโตและเพิ่มจำนวนมากขึ้นสำหรับในวันที่ 3 4 และ 5 ค่าเอ็มแอลวีเอสเอสมีค่าลดลงไปเรื่อยๆ แต่ไม่มากนักทั้งนี้เนื่องมาจากสภาวะแวดล้อมเริ่มไม่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของจุลินทรีย์แล้วเนื่องจากมีการสะสมตัวของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายมากขึ้นเรื่อยๆ (Grupe; & Gottschalk. 1992 : 3896-3902) จึงมีผลทำให้ค่าพีเอชของแต่ละถังปฏิบัติการลดตามลงไปด้วย ดังแสดงรายละเอียดในหัวข้อ 4.1.2 ซึ่งส่งผลกระทบต่อ การเจริญเติบโตของแบคทีเรีย (Lay. 2000 : 275)

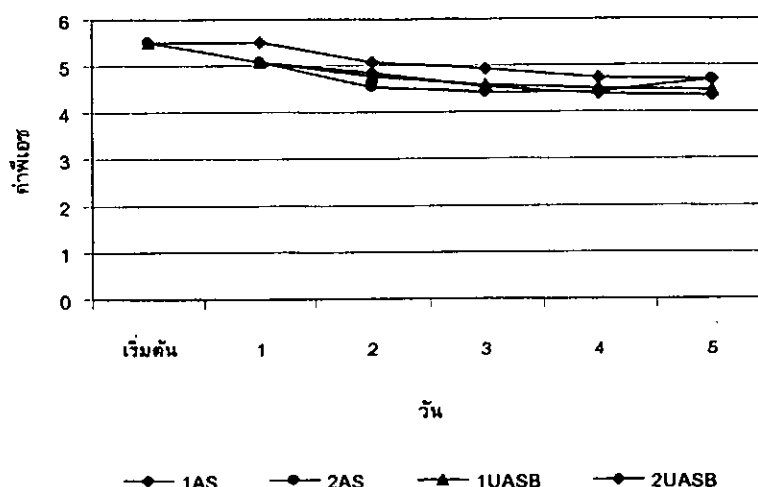


ภาพประกอบ 6 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ MLVSS ในถังปฏิบัติการ 1AS 2AS 1UASB และ 2UASB

4.1.2 ค่าพีเอช

ในการทดลองขั้นนี้นั้น ผู้วิจัยได้ใช้ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากันทุกถังคือมีค่าประมาณ 5.5 ± 0.02 จากการทดลองพบว่าถัง 2AS 1UASB และ 2 UASB นั้นมีค่าพีเอชลดลงไปหลังจากผ่านการหมักไป 1 2 3 4 และ 5 วัน ดังนี้คือ 2AS ค่าพีเอชลดลงมีค่าเป็น 5.06 4.55 4.42 4.73 และ 4.71 ตามลำดับ 1UASB มีค่าพีเอชลดลงเป็น 5.06 4.77 4.57 4.51 และ 4.46 ตามลำดับ และ 2 UASB มีค่าพีเอชลดลงเป็น 5.09 4.84 4.57 4.38 และ 4.34 ตามลำดับ ส่วน 1AS นั้นมีค่าพีเอชลดลงค่อนข้างช้าดังนี้คือ 5.50 5.06 4.93 4.73 และ 4.70 ดังภาพประกอบ 7 จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้ตะกอนจากระบบ AS และเป้งมันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอนจะมีการดอินทรีย์เกิดขึ้นในปริมาณที่น้อย โดยสังเกตจากค่าพีเอชที่ลดลงเพียงเล็กน้อย และเมื่อพิจารณาที่ปริมาณของไฮโดรเจนที่ผลิตได้จากภาพประกอบ 13 แล้วพบว่าถังปฏิกรณ์ 1AS นั้นสามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้น้อยที่สุด แสดงให้เห็นว่าจุลินทรีย์จากถังหมักตะกอนของโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำห้วยขวางนั้น มีความสามารถในการย่อยสลายเป้งมันสำปะหลังที่ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 5.5 นี้ต่ำ แต่ถ้ามพิจารณาที่ถัง 2AS ซึ่งใช้ตะกอนเริ่มต้นจากแหล่งเดียวกันกับถัง 1AS แล้วพบว่าค่าพีเอชจะลดลงไปเรื่อย ๆ และเมื่อพิจารณาจากภาพ 13 แล้วพบว่าสามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้มากกว่าถัง 1AS จะเห็นว่าที่ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากัน ถึงแม้จะใช้ตะกอนจากแหล่งเดียวกันแต่แหล่งคาร์บอนต่างชนิดกัน ก็มีความสามารถในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ต่างกัน แสดงว่าแหล่งของคาร์บอนมีผลต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจน ซึ่งเป็นไปตามสมมติฐานข้อ 1.6.1.1 ที่ว่าอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนของถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบไม่ต่อเนื่องจะแตกต่างกันเมื่อใช้แหล่งคาร์บอนต่างกัน

และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบถัง 1AS และ ถัง 1UASB ซึ่งใช้เป้งมันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอนเหมือนกัน แต่แหล่งของตะกอนจุลินทรีย์ต่างกัน กล่าวคือถัง 1AS นั้นใช้ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน แต่ถัง 1UASB นั้นใช้ตะกอนจากโรงงานผลิตเส้นไหมซึ่งมีเป้งเป็นวัตถุดิบ จากการทดลองปรากฏว่าถัง 1UASB นั้นสามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้มากกว่าถัง 1AS มาก จะเห็นว่าแหล่งของตะกอนมีผลต่ออัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจน ซึ่งเป็นไปตามสมมติฐานข้อ 1.6.1.2 ที่ว่าอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนของถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบไม่ต่อเนื่อง จะแตกต่างกันเมื่อใช้จุลินทรีย์จากแหล่งที่ต่างกัน

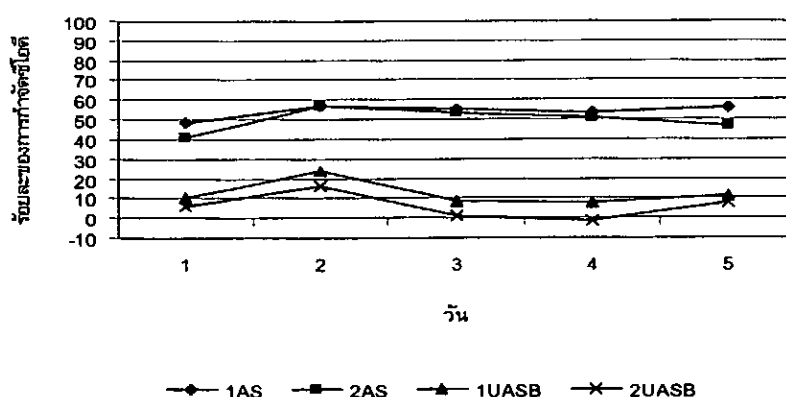


ภาพประกอบ 7 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าซีไอ ในถังปฏิกริยา 1AS 2AS 1UASB และ 2UASB

4.1.3 ค่าซีไอ

ในการทดลองครั้งนี้ใช้น้ำแป้งสังเคราะห์ โดยใช้แป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเจ้า มาละลายในน้ำกลั่นด้วยความเข้มข้น 22 กรัมต่อลิตร แป้งมันสำปะหลัง 1 กรัม มีค่าซีไอประมาณ 1.096 กรัมซีไอ ส่วนแป้งข้าวเจ้า 1 กรัม มีค่าซีไอประมาณ 1.010 กรัมซีไอ ดังนั้นจึงทำให้ค่าซีไอเริ่มต้นของแป้งมันสำปะหลังมีค่าประมาณ 24,112 มิลลิกรัมต่อลิตร และแป้งข้าวเจ้าเป็น 22,228 มิลลิกรัมต่อลิตร จะเห็นว่าค่าซีไอของถังปฏิกริยาที่ใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอนจะมีค่าซีไอสูงกว่าถังปฏิกริยาที่ใช้แป้งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอนเล็กน้อย จากการทดลองพบว่าถัง 1AS มีค่าซีไอตั้งแต่วันที่เริ่มต้นจนถึงวันที่ 5 ของการทดลองดังนี้คือ 24,112 12,390 10,334 10,723 11,253 และ 10,683 มก./ล. ตามลำดับ ซึ่งมีค่าซีไอลดลงคิดเป็นร้อยละ 48.61 57.14 55.53 53.33 และ 55.69 มก./ล. ตามลำดับ คิดเป็นค่าเฉลี่ยร้อยละ 54.06 ส่วนถัง 2AS มีค่าซีไอตั้งแต่วันที่เริ่มต้นจนถึงวันที่ 5 ของการทดลองดังนี้คือ 22,228 13,117 9,567 10,257 10,837 และ 11,773 มก./ล. ตามลำดับ มีค่าซีไอลดลงคิดเป็นร้อยละ 40.99 56.96 53.86 51.25 และ 47.04 ตามลำดับ คิดเป็นค่าเฉลี่ยร้อยละ 50.02 ถัง 1UASB มีค่าซีไอตั้งแต่วันที่เริ่มต้นจนถึงวันที่ 5 ของการทดลองดังนี้คือ 24,112 21,727 18,427 22,013 22,157 และ 21,453 มก./ล. ตามลำดับ มีค่าซีไอลดลงคิดเป็นร้อยละ 9.89 23.57 8.71 8.11 และ 11.03 ตามลำดับ คิดเป็นค่าเฉลี่ยร้อยละ 12.26 และถัง 2UASB มีค่าซีไอตั้งแต่วันที่เริ่มต้นจนถึงวันที่ 5 ของการทดลองดังนี้คือ 22,228 20,893 18,530 21,960 22,625 และ 22,260 มก./ล. ตามลำดับ ซีไอลดลงร้อยละ 6.01 16.64 1.21 สูงกว่าซีไอเริ่มต้นร้อยละ 1.79 และ ซีไอลดลงร้อยละ 7.68 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพประกอบ 8

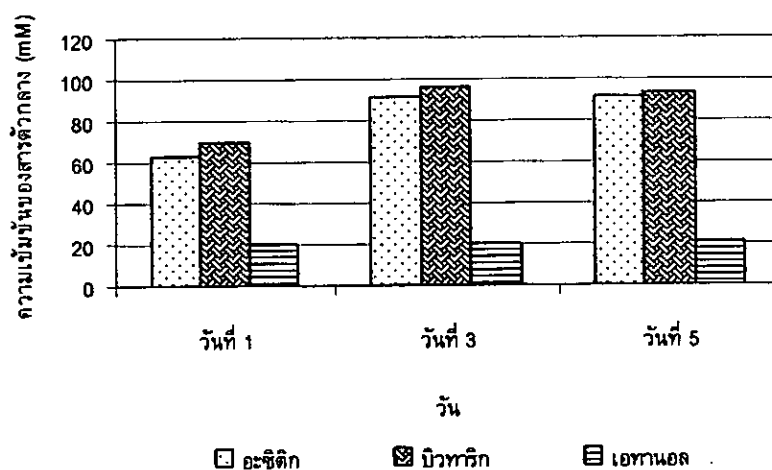
จากการทดลองจะเห็นว่าค่าซีโอดีของน้ำที่ผ่านการหมักแบบไร้อากาศ เพื่อผลิตก๊าซไฮโดรเจนนั้นมีค่าซีโอดีลดลงเพียงเล็กน้อย ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับที่สมชาย (สมชาย เจริญธีรสกุล. 2530:109) ได้ทำการศึกษาการผลิตก๊าซมีเทนจากขยะโดยกระบวนการชีวภาพไร้อากาศแบบสองขั้นตอน ซึ่งกล่าวไว้ว่าในถังปฏิกริยาหมักกรดเป็นการย่อยสลายสารอาหารให้เป็นโมเลกุลเล็ก และเกิดกรดโวลลาไทล์ ซีโอดีจึงยังไม่ถูกจำกัด หรือถ้ามีส่วนที่กำจัดก็มีเพียงส่วนน้อยเมื่อเทียบกับทั้งหมด และเกรียงศักดิ์ (เกรียงศักดิ์ เลิศประภามงคล. 2546:19-23) ก็ได้กล่าวไว้ว่าในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนนี้สามารถลดค่าซีโอดีได้ประมาณร้อยละ 10 ทั้งนี้เนื่องจากในขั้นตอนของการผลิตก๊าซไฮโดรเจนนี้ จะมีการดอินทรีย์ซึ่งเป็นสารผลิตตัวกลางที่เกิดขึ้นและเมื่อระยะเวลาในการหมักผ่านไปหลายวันมากขึ้นก็ยังมีกรดอินทรีย์สะสมอยู่มากขึ้น จึงทำให้ค่าซีโอดีสูงจนบางครั้งสูงกว่าค่าซีโอดีเริ่มต้น แต่ในการทดลองพบว่าความสามารถในการกำจัดซีโอดีเมื่อใช้ตะกอนจุลินทรีย์จากถังหมักตะกอนของระบบ AS นั้น จะสูงกว่าเมื่อใช้ตะกอนจากระบบ UASB ทั้งนี้เพราะเมื่อพิจารณาจากการผลิตกรดอินทรีย์ในหัวข้อ 4.1.4 แล้วพบว่าถังปฏิกริยา 1UASB และ 2UASB นั้นจะมีการสะสมตัวของกรดอินทรีย์สูงมากกว่า ถังปฏิกริยา 1AS และ 2AS และเมื่อพิจารณาจากน้ำที่ผ่านการหมักแล้ว พบว่าน้ำที่ผ่านการหมักจากถัง 1AS และ 2AS นั้นจะมีตะกอนแขวนลอยอยู่น้อยกว่าน้ำที่ผ่านการหมักจากถัง 1UASB และ 2UASB จึงทำให้มีค่าซีโอดีสูงกว่า จากผลการทดลองตามที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น ได้ทำให้ทราบการเปลี่ยนแปลงของค่าซีโอดีในกระบวนการหมักเพื่อผลิตก๊าซไฮโดรเจนเมื่อใช้แ่งเป็นแหล่งคาร์บอน ว่ามีความสามารถในการบำบัดค่าซีโอดีไม่มากนักเมื่อเปรียบเทียบกับค่าซีโอดีเริ่มต้น ดังนั้นถ้ามุ่งหวังที่จะผลิตก๊าซไฮโดรเจนและบำบัดค่าซีโอดีด้วยนั้น จะต้องนำน้ำที่ผ่านการหมักนี้ไปทำการบำบัดเพื่อลดค่าซีโอดีต่อ เช่น นำไปผลิตก๊าซมีเทนต่อโดยใช้กระบวนการชีวภาพแบบไร้อากาศสองขั้นตอน เป็นต้น (Han; & Chin. 2004. 242-249)



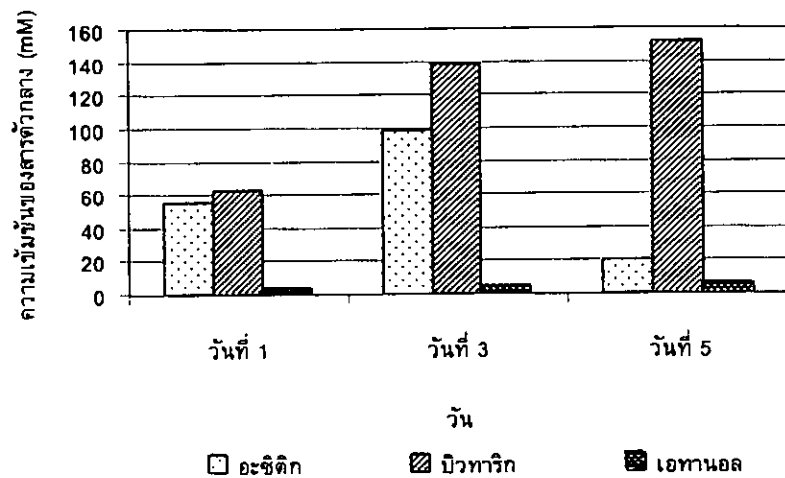
ภาพประกอบ 8 แสดงร้อยละของการกำจัดซีโอดีในถังปฏิกริยา 1AS 2AS 1UASB และ 2UASB

4.1.4 กรดอินทรีย์ระเหยง่าย

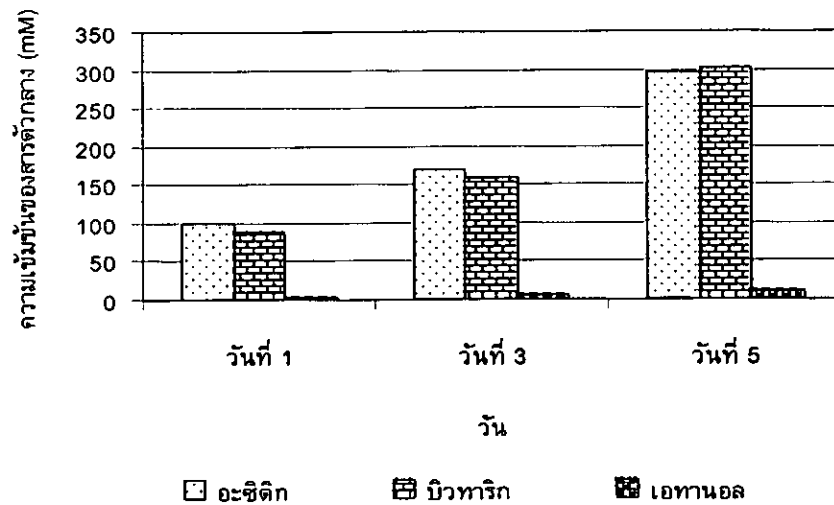
ค่าร้อยละของกรดอินทรีย์ระเหยจากการหมักในถังปฏิกริยา 1AS 2AS 1UASB และ 2UASB มีความเข้มข้นของกรดอินทรีย์แยกตามชนิดได้ดังนี้คือ ถึง 1AS กรดอะซิติก บิวทริก โพรพิโอนิก และเอทานอล วันที่ 1 เป็นร้อยละ 18.65 64.88 ไม่สามารถวัดได้ และ 13.25 ตามลำดับ วันที่ 3 มีค่าเป็นร้อยละ 20.17 67.11 ไม่สามารถวัดได้ และ 9.62 ตามลำดับ วันที่ 5 มีค่าเป็นร้อยละ 21.21 68.13 ไม่สามารถวัดได้ และ 10.66 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพประกอบ 9 ส่วนถึง 2AS นั้นมีค่าความเข้มข้นของ กรดอะซิติก บิวทริก โพรพิโอนิก และเอทานอล วันที่ 1 เป็นร้อยละ 20.28 72.75 ไม่สามารถวัดได้ และ 4.15 ตามลำดับ วันที่ 3 มีค่าเป็นร้อยละ 17.04 76.37 ไม่สามารถวัดได้ และ 2.16 ตามลำดับ วันที่ 5 มีค่าเป็นร้อยละ 3.39 81.08 ไม่สามารถวัดได้ และ 2.34 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพประกอบ 10 และถึง 1UASB ค่าความเข้มข้นของ กรดอะซิติก บิวทริก โพรพิโอนิก และเอทานอล วันที่ 1 เป็นร้อยละ 24.40 69.22 ไม่สามารถวัดได้ และ 2.43 ตามลำดับ วันที่ 3 มีค่าเป็นร้อยละ 24.22 71.21 1.88 และ 1.72 ตามลำดับ วันที่ 5 มีค่าเป็นร้อยละ 22.06 71.38 2.70 และ 1.88 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพประกอบ 11 ส่วนถึง 2UASB ค่าความเข้มข้นของ กรดอะซิติก บิวทริก โพรพิโอนิก และเอทานอล วันที่ 1 เป็นร้อยละ 31.41 58.64 ไม่สามารถวัดได้ และ 2.69 ตามลำดับ วันที่ 3 มีค่าเป็นร้อยละ 25.13 69.53 1.94 และ 1.79 ตามลำดับ วันที่ 5 มีค่าเป็นร้อยละ 22.09 73.39 1.31 และ 1.56 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพประกอบ 12



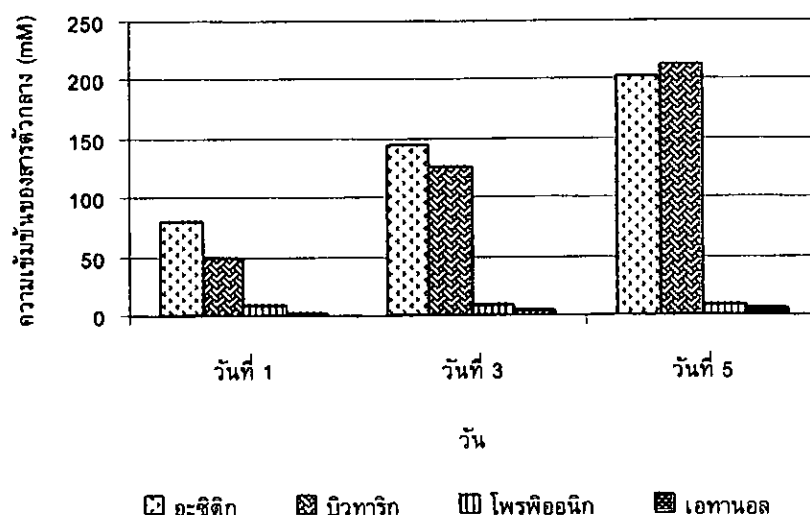
ภาพประกอบ 9 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารตัวกลางที่เกิดขึ้นในถังปฏิกริยา 1AS
หมายเหตุ กรดโพรพิโอนิกมีความเข้มข้นน้อยมากจึงไม่สามารถตรวจวัดได้



ภาพประกอบ 10 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารตัวกลางที่เกิดขึ้นในถังปฏิกริยา 2AS
หมายเหตุ กรดไพรูวอีนิกมีความเข้มข้นน้อยมากจึงไม่สามารถตรวจวัดได้



ภาพประกอบ 11 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารตัวกลางที่เกิดขึ้นในถังปฏิกริยา 1UASB
หมายเหตุ กรดไพรูวอีนิกมีความเข้มข้นน้อยมากจึงไม่สามารถตรวจวัดได้



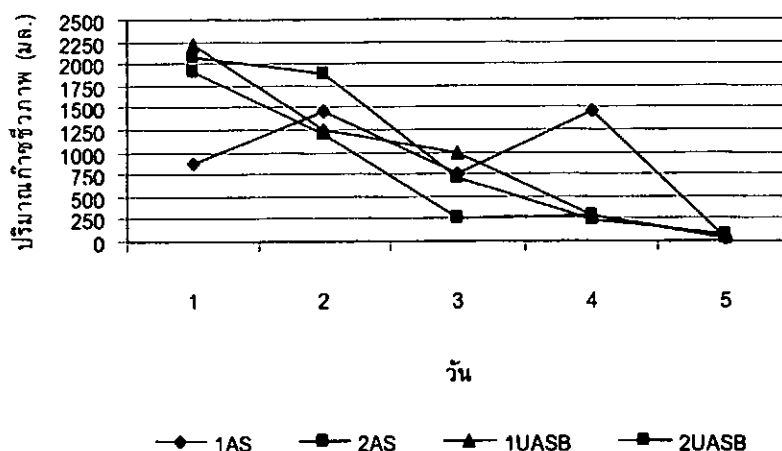
ภาพประกอบ 12 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารตัวกลางที่เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์ 2UASB

จากผลการทดลองจะเห็นว่า เมื่อระยะเวลาในการหมักเพิ่มขึ้นความเข้มข้นของกรดบิวทริกจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นทุกถังปฏิกรณ์ แสดงว่าการหมักที่ความเข้มข้นของแป้ง 2.2 – 2.4 กรัมซีโอดีต่อลิตรนี้ ชนิดของกรดอินทรีย์ที่พบมากที่สุดในการหมักในสารตัวกลางนั้นคือ กรดบิวทริกและกรดอะซิติก ซึ่งจัดเป็นการหมักแบบ Butyric acid type (Cohen, A. 1984 : 228-237) และจากผลการศึกษาของ Kleerebezen พบว่าการสะสมของกรดบิวทริกนั้น จะมีผลต่อความดันพาร์เซียลของก๊าซไฮโดรเจน และค่าพีเอชของระบบ (Kleerebezen. 2000 : 529 - 543) นอกจากนี้แมคคาที่ยังพบว่า แบคทีเรียที่สร้างกรดบิวทริกนั้น เป็นแบคทีเรียที่สามารถทนต่อสภาวะแวดล้อมที่เป็นกรด และเป็นแบคทีเรียที่สามารถสร้างก๊าซไฮโดรเจนด้วย (Hydrogen producing bacteria) (McCarty ;& Mosey. 1991 : 17-33) จากเหตุผลที่กล่าวสนับสนุนมาแล้วข้างต้นทำให้สามารถสรุปได้ว่า การหมักที่มีการสะสมของกรดบิวทริกนั้นจะสามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ (Kim ; e.t. 2004 : 1133 -1140) ซึ่งข้อสรุปที่ได้นี้สอดคล้องกับผลการวิจัยในครั้งนี้ เพราะกรดอินทรีย์ที่สะสมอยู่มากที่สุดในแต่ละถังปฏิกรณ์นั้น คือ กรดบิวทริก และสามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้จริง

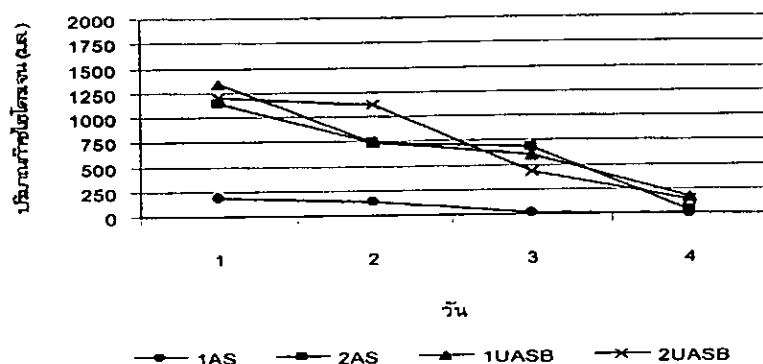
4.1.5 ปริมาณก๊าซ

ผลการทดลองที่ได้พบว่าปริมาณก๊าซชีวภาพที่วัดได้ในแต่ละถังปฏิกรณ์จากวันที่ 1 2 3 4 และ 5 เป็นดังนี้คือ ถังปฏิกรณ์ 1AS มีก๊าซชีวภาพเกิดขึ้น 864 1,457 752 และ 1,460 และ 24 มล. ตามลำดับ ถังปฏิกรณ์ 2AS มีก๊าซชีวภาพเกิดขึ้น 1,917 1,206 295 293 และ 29 มล.

ตามลำดับ ส่วนถังปฏิบัติการ 1UASB มีก๊าซชีวภาพเกิดขึ้น 2,221 1,242 985 293 49 มล. ตามลำดับ และถังปฏิบัติการ 2 UASB มีก๊าซชีวภาพเกิดขึ้น 2,069 1,896 719 240 และ 62 มล. ส่วนปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นในแต่ละถังปฏิบัติการจากวันที่ 1 2 3 4 และ 5 เป็นดังนี้คือ ในถังปฏิบัติการ 1AS มีก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้น 182 146 12 0 มล. และไม่สามารถวัดได้ในวันที่ 5 (เนื่องจากมีก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นน้อยมาก ปริมาณของก๊าซชีวภาพแสดงดังภาพประกอบ 13) ถังปฏิบัติการ 2AS มีก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้น 1,142 735 649 33 มล. และ ไม่สามารถวัดได้ ถังปฏิบัติการ 1UASB มีก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้น 1,339 732 602 173 และไม่สามารถวัดได้ ในถังปฏิบัติการ 2UASB มีก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้น 1,199 117 432 141 และไม่สามารถวัดได้ การผลิตก๊าซชีวภาพแสดงดังภาพประกอบ 13 และปริมาณการผลิตไฮโดรเจนแสดงดังภาพประกอบ 14 ส่วนค่าร้อยละของก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นในแต่ละถังปฏิบัติการจากวันที่ 1 2 3 4 และ 5 เป็นดังนี้คือ ในถังปฏิบัติการ 1AS มีก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซชีวภาพร้อยละ 22.00 34.66 6.00 0 และไม่สามารถวัดได้ในวันที่ 5 เนื่องจากมีก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นน้อยมาก ส่วนในถังปฏิบัติการ 2AS มีก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซชีวภาพร้อยละ 59.33 61.33 41.00 4.50 และ ไม่สามารถวัดได้ และในถังปฏิบัติการ 1UASB มีก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซชีวภาพร้อยละ 59.77 60.00 61.00 57.67 และไม่สามารถวัดได้ ในถังปฏิบัติการ 2UASB มีก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซชีวภาพร้อยละ 57.67 59.00 61.00 58.67 และไม่สามารถวัดได้ ทั้งนี้ค่าร้อยละของไฮโดรเจนในก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละถังปฏิบัติการตลอดระยะเวลา 5 วัน แสดงดังภาพประกอบ 15

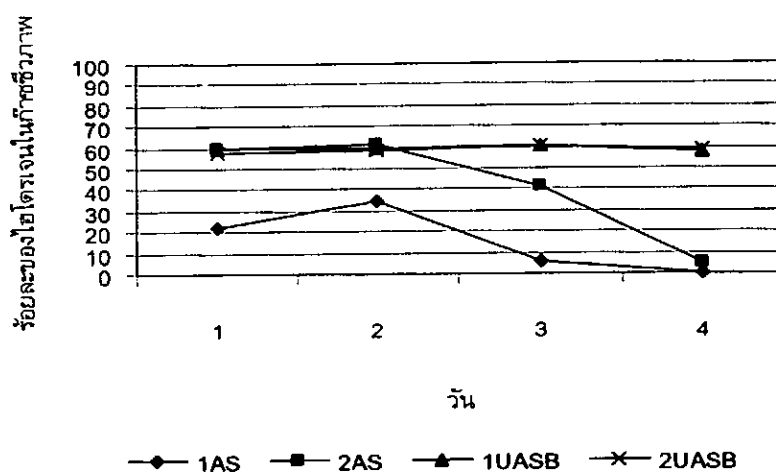


ภาพประกอบ 13 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ในแต่ละถังปฏิบัติการ



ภาพประกอบ 14 แสดงปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้ในแต่ละถึงปฏิบัติการ

หมายเหตุ ในวันที่ 5 ไม่สามารถเก็บตัวอย่างก๊าซชีวภาพมาตรวจวัดได้เนื่องจากมีน้อยมาก



ภาพประกอบ 15 แสดงร้อยละของก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซชีวภาพ ทั้ง 5 วัน ในแต่ละถึงปฏิบัติการ

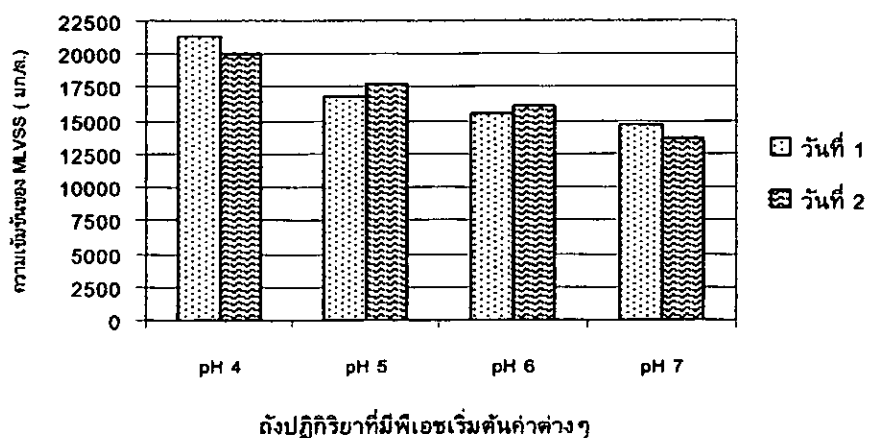
จะเห็นว่าในขั้นตอนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนนั้นเมื่อเวลาในการหมักนานขึ้นหลังจากวันที่ 2 จะทำให้สามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้น้อยลง ดังนั้นถ้าจะทำการหมักเพื่อผลิตก๊าซไฮโดรเจนไม่ควรใช้เวลาในการหมักเกิน 2 วัน และถึงปฏิบัติการที่ใช้ตะกอนจากระบบยูเอเอสบีจะสามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้มากกว่าถึงปฏิบัติการที่ใช้ตะกอนจากระบบเอเอส

4.2 การทดลองที่ 2 ศึกษาค่าพีเอชเริ่มต้นที่มีต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจนเมื่อใช้ตะกอนจากถังหมักตะกอนของระบบ AS และแบ่งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน

จากการทดลองที่ 1 ทำให้ทราบว่าค่าพีเอชลดต่ำลงในขณะผลิตก๊าซไฮโดรเจน เป็นข้อสังเกตว่าการผลิตก๊าซไฮโดรเจนอาจแตกต่างกันถ้าใช้ค่าพีเอชเริ่มต้นในการหมักแตกต่างกัน จึงทำการทดลองกำหนด ค่าพีเอชเริ่มต้น โดยแปรเปลี่ยนค่าพีเอช ดังนี้คือ พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4 5 6 และ 7 ตามลำดับ และจากการทดลองที่ 1 ก็ทำให้ทราบว่าในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนนั้นไม่ควรมียะเวลากักเก็บนานเกิน 2 วัน เพราะในวันที่ 3 เป็นต้นไปจะมีไฮโดรเจนเกิดขึ้นน้อยมาก ดังนั้นในการทดลองนี้ จึงกำหนดระยะเวลาเก็บเป็น 2 วัน ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้คือ

4.2.1 ค่าเอ็มแอลวีเอสเอส

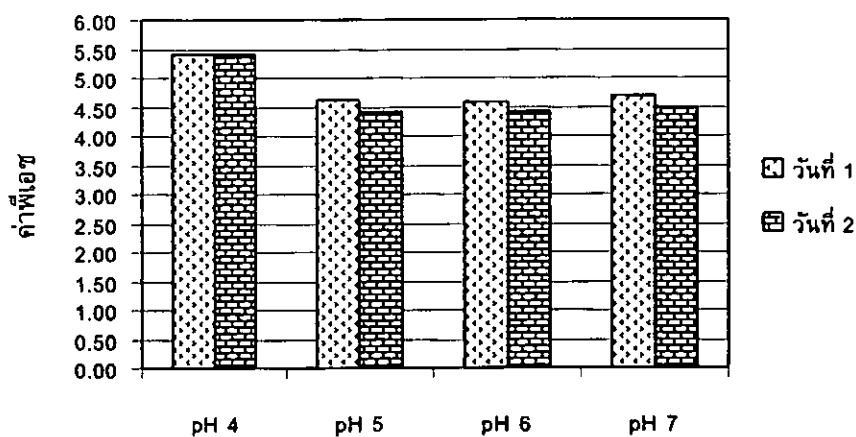
ในถังปฏิกริยาที่มีพีเอชเริ่มต้น 4 มีค่าเอ็มแอลวีเอสเอสจากวันเริ่มต้นจนถึงวันที่ 2 เป็น 22,827 21,373 และ 20,037 ตามลำดับ ในถังปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 5 มีค่าเอ็มแอลวีเอสเอสจากวันเริ่มต้นจนถึงวันที่ 2 เป็น 22,180 16,787 และ 17,767 ตามลำดับ และในถังปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 6 มีค่าเอ็มแอลวีเอสเอสจากวันเริ่มต้นจนถึงวันที่ 2 เป็น 22,997 15,487 และ 16,073 ตามลำดับ ส่วนถังปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 7 มีค่าเอ็มแอลวีเอสเอสจากวันเริ่มต้นจนถึงวันที่ 2 เป็น 21,816 14,593 และ 13,640 ตามลำดับ จากผลการทดลองนี้พบว่าถังปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 5 และ 6 นั้นค่าเอ็มแอลวีเอสเอสจะมีค่าลดลงในวันที่ 1 และเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยในวันที่ 2 ส่วนถังปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 4 และ 7 นั้นค่าเอ็มแอลวีเอสเอสจะมีค่าลดลง จากวันเริ่มต้นจนถึงวันที่ 2 ดังแสดงในภาพประกอบ 16



ภาพประกอบ 16 แสดงค่าความเข้มข้นของ MLVSS ในถังปฏิกริยาที่มีพีเอชเริ่มต้นค่าต่าง ๆ เมื่อใช้แป้งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน

4.2.2 ค่าพีเอช

จากการทดลองพบว่า พีเอชจากวันเริ่มต้นจนถึงวันที่ 2 ของแต่ละถังปฏิกริยา มีค่าเป็นดังนี้คือ ถังปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 4 มีค่า 4.00 5.40 และ 5.43 ตามลำดับ ถังปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 5 มีค่า 5.00 4.62 และ 4.41 ตามลำดับ ถังปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 6 มีค่า 6.00 4.60 และ 4.40 ตามลำดับ และถังปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 7 มีค่า 7.00 4.68 และ 4.50 ตามลำดับ จะเห็นว่าถังปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 5 6 และ 7 จะมีค่าพีเอชลดลงจากวันเริ่มต้นจนถึงวันที่ 2 แต่ถังปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 4 กลับมีค่าพีเอชเพิ่มสูงขึ้นจากค่าเริ่มต้น ดังภาพประกอบ 17 ซึ่งยังไม่ทราบแน่ชัดว่าเพราะสาเหตุใด ทั้งนี้เนื่องจากว่าในการศึกษาครั้งนี้นั้น ผู้วิจัยทำการตรวจและวิเคราะห์แอลกอฮอล์เพียงชนิดเดียว คือ เอทานอล (แต่จากผลการทดลองในหัวข้อ 4.2.4 พบว่าเอทานอลตรวจพบเพียงร้อยละ 1.46 เท่านั้น) ไม่ได้ตรวจวัด บิวทานอล (Butanol) และ โพรพานอล (Propanol) ด้วย จึงไม่ทราบว่าในถังปฏิกริยาที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4 นี้ มีการผลิตบิวทานอล และ โพรพานอล หรือไม่ ซึ่งถ้ามีการผลิตบิวทานอลและโพรพานอลขึ้น ก็จะเป็นสาเหตุที่ทำให้ค่าพีเอชในถังปฏิกริยาเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้เลยพบว่าถ้าค่าพีเอชในถังปฏิกริยาสูงกว่า 6.1 และต่ำกว่า 4.1 นั้น จะยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ไฮโดรจีเนสและสภาวะนี้จะเหมาะสมต่อการสร้างแอลกอฮอล์ (Lay. 2000 : 275) ซึ่งสอดคล้องกับข้อสังเกตนี้

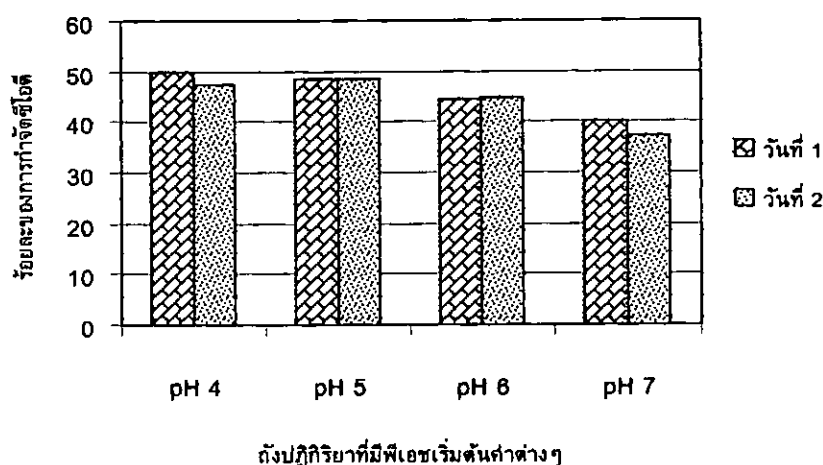


ถังปฏิกริยาที่มีพีเอชเริ่มต้นค่าต่าง ๆ

ภาพประกอบ 17 แสดงการเปลี่ยนแปลงของพีเอช ในถังปฏิกริยาที่มีพีเอชเริ่มต้นค่าต่าง ๆ เมื่อใช้แป้งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน

4.2.3 ค่าซีไอตี

ในการทดลองที่ 2 นี้ใช้แป้งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอนโดยมีความเข้มข้น 22 กรัมต่อลิตร (วิธีเตรียมดังหัวข้อ 3.2.1.1 ก.) ซึ่งมีค่าซีไอตีประมาณ 22,228 มิลลิกรัมต่อลิตร ทุกถึงปฏิกิริยา จากการทดลองพบว่าค่าซีไอตีของแต่ละถึงปฏิกิริยามีค่าลดลงไปจากค่าเริ่มต้นในวันที่ 1 และ 2 ดังนี้คือ ถึงปฏิกิริยาพีเอชเริ่มต้น 4 ลดลงเป็น 11,570 และ 11,743 มก./ล. ตามลำดับ ถึงปฏิกิริยาพีเอชเริ่มต้น 5 มีค่า 11,463 11,423 มก./ล. ตามลำดับ ถึงปฏิกิริยาพีเอชเริ่มต้น 6 มีค่า 12,313 และ 12,263 มก./ล. ตามลำดับ ถึงปฏิกิริยาพีเอชเริ่มต้น 7 มีค่า 13,330 และ 13,927 มก./ล. ตามลำดับ ในระยะเวลาเก็บกัก 2 วันนี้ ค่าร้อยละของซีไอตีที่ถูกกำจัดของถึงปฏิกิริยาที่มีพีเอชเริ่มต้น 4 5 6 และ 7 มีค่าคิดเป็นร้อยละ 47.17 48.61 44.83 และ 37.34 ตามลำดับ จะพบว่าค่าร้อยละซีไอตีที่ลดลงจะมีค่าลดน้อยลงเมื่อค่าพีเอชเริ่มต้นในการหมักสูงขึ้นสูงขึ้น ดังแสดงในภาพประกอบ 18

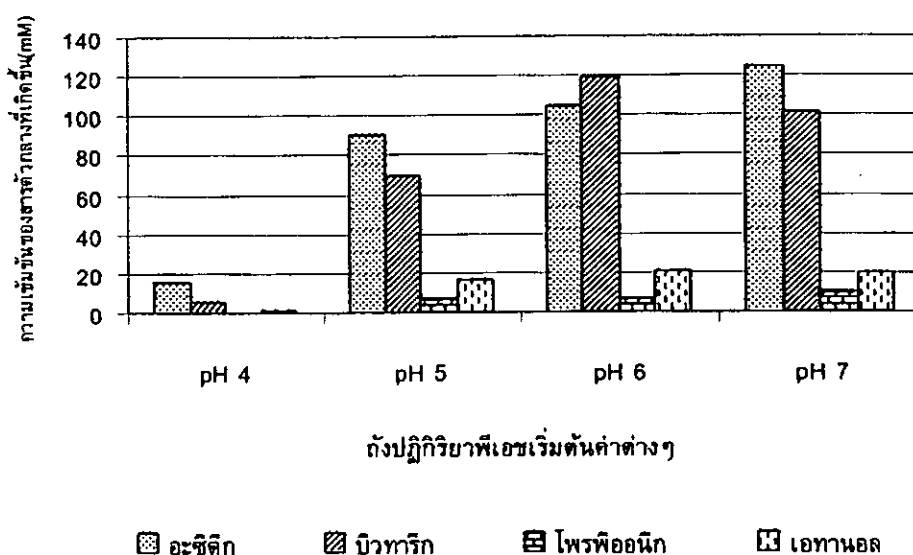


ภาพประกอบ 18 แสดงร้อยละของการกำจัดซีไอตีในถึงปฏิกิริยาที่มีพีเอชเริ่มต้นค่าต่างๆ เมื่อใช้แป้งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน

4.2.4 กรดอินทรีย์ระเหยง่าย

จากการทดลองเมื่อผ่านการหมักไป 2 วัน พบว่าค่าร้อยละของความเข้มข้น อะซิติก บิวทาริก โพรพิโอนิก และเอทานอล ในถึงปฏิกิริยาพีเอชเริ่มต้น 4 มีค่าเป็นร้อยละ 29.36 21.11 ไม่สามารถตรวจวัดได้ และ 1.46 ตามลำดับ หรือ 15.81 5.60 0 และ 0.84 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ และถึงปฏิกิริยาพีเอชเริ่มต้น 5 มีค่าร้อยละของความเข้มข้น อะซิติก บิวทาริก โพรพิโอนิก และเอทานอล มีค่าเป็น 24.37 58.25 1.52 และ 9.83 ตามลำดับ หรือ 90.78 69.59 6.77 และ 16.36 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ ส่วนถึงปฏิกิริยา พีเอชเริ่มต้น 6 มีค่าร้อยละของความเข้มข้น

อะซิติก บิวทริก โพรพิโอนิก และเอทานอล มีค่าเป็น 18.27 65.57 0.69 และ 7.89 ตามลำดับหรือ 104.75 119.15 6.09 และ 20.53 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ และถึงปฏิกิริยา พีเอช เริ่มต้น 7 มีค่าร้อยละของความเข้มข้น อะซิติก บิวทริก โพรพิโอนิก และเอทานอล มีค่าเป็น 23.28 59.57 2.41 และ 8.21 ตามลำดับ หรือ 124.30 101.31 9.63 และ 19.90 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ จะเห็นว่ากรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่พบมากที่สุดคือ กรดบิวทริก และ กรดอะซิติก และที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7 จะมีกรดอินทรีย์มากที่สุด ดังแสดงรายละเอียดในภาพประกอบ 19

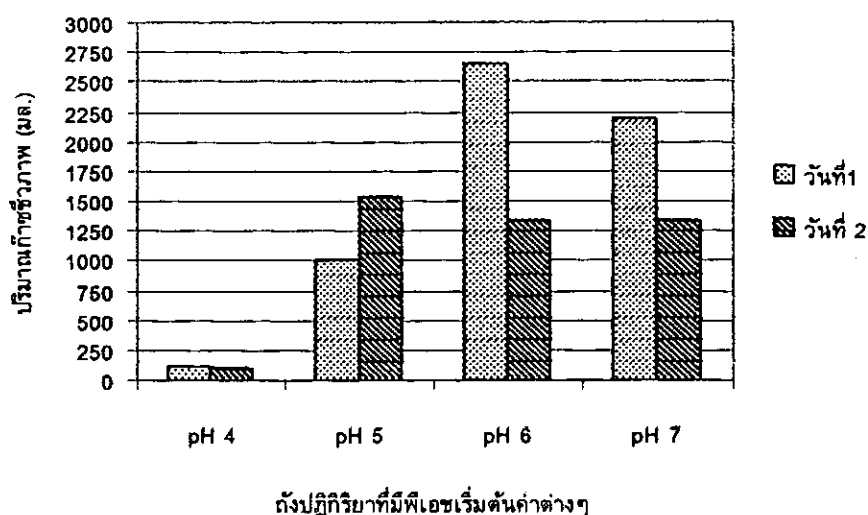


ภาพประกอบ 19 แสดงความเข้มข้นของสารตัวกลางที่เกิดขึ้นในถังปฏิกิริยา ที่มีพีเอชเริ่มต้นค่าต่างๆเมื่อใช้แป้งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน

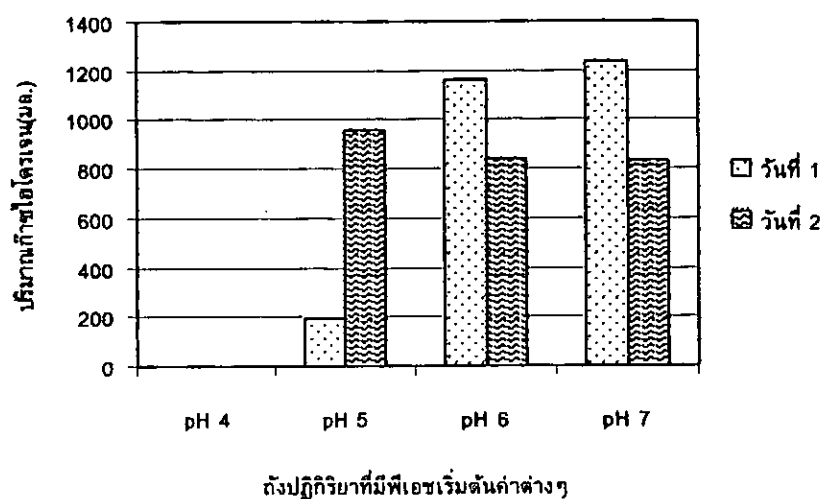
4.2.5 ปริมาณก๊าซ

ผลการทดลองพบว่าปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละถังปฏิกิริยา ในวันที่ 1 และ 2 มีค่าเป็นดังนี้คือ ในถังปฏิกิริยาพีเอชเริ่มต้น 4 มีก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นในวันที่ 1 และ 2 มีค่าเป็น 111 และ 104 มล. ตามลำดับ รวมทั้ง 2 วัน มีค่าเป็น 215 มล. และในถังปฏิกิริยาพีเอชเริ่มต้น 5 มีก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นในวันที่ 1 และ 2 มีค่าเป็น 1,013 และ 1,538 มล. ตามลำดับ รวมทั้ง 2 วัน มีค่าเป็น 2,551 มล. ส่วนในถังปฏิกิริยาพีเอชเริ่มต้น 6 มีก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นในวันที่ 1 และ 2 มีค่าเป็น 2,649 และ 1,336 มล. ตามลำดับ รวมทั้ง 2 วัน มีค่าเป็น 3,985 มล. และในถังปฏิกิริยา pH 7 มีก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นในวันที่ 1 และ 2 มีค่าเป็น 2,195 และ 1,331 มล. ตามลำดับ รวมทั้ง 2 วัน มีค่าเป็น 3,526 มล. ทั้งนี้การผลิตก๊าซชีวภาพของแต่ละถังปฏิกิริยาแสดงได้ดังภาพประกอบ 20

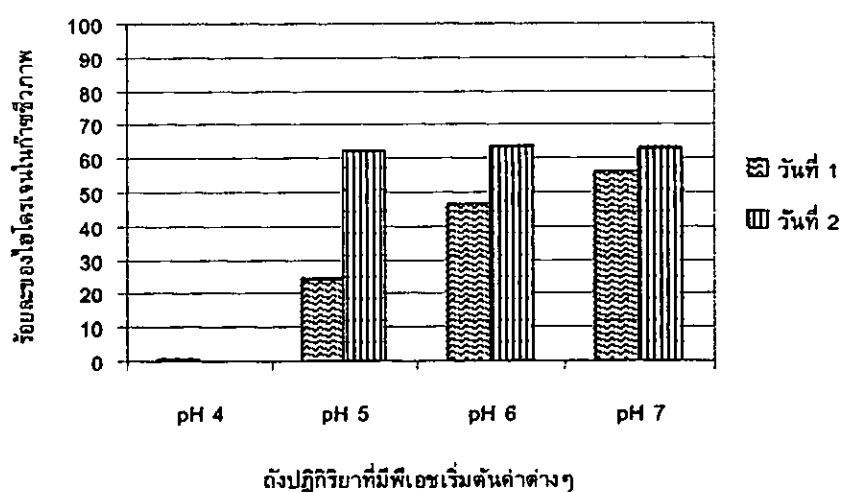
ส่วนปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้ในแต่ละถังปฏิกริยาในวันที่ 1 และ 2 มีค่าเป็นดังนี้คือ ในถังปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 4 ไฮโดรเจนเกิดขึ้นในวันที่ 1 และ 2 มีค่าเป็น 0 และ 0 มล. ตามลำดับ และในถังปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 5 มีก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้นในวันที่ 1 และ 2 มีค่าเป็น 196 และ 957 มล. ตามลำดับ รวมทั้ง 2 วัน มีค่าเป็น 1,153 มล. ส่วนในถังปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 6 มีก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้นในวันที่ 1 และ 2 มีค่าเป็น 1,162 และ 842 มล. ตามลำดับ รวมทั้งสองวันมีค่าเป็น 1,986 มล. และในถังปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 7 มีก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้น ในวันที่ 1 และ 2 มีค่าเป็น 1,236 และ 830 มล. รวมทั้ง 2 วัน มีค่าเป็น 2,066 มล. ตามลำดับ ทั้งนี้ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้ในแต่ละถังปฏิกริยานั้นแสดงดังภาพประกอบ 21 ส่วนค่าร้อยละของก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นในแต่ละถังปฏิกริยาในวันที่ 1 และ 2 เป็นดังนี้คือ ในถังปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 4 มีก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซชีวภาพร้อยละ 0.51 และ 0 ตามลำดับ ส่วนในถังปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 5 มีก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซชีวภาพร้อยละ 23.92 และ 62.32 ตามลำดับ และในถังปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 6 มีก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซชีวภาพร้อยละ 46.57 และ 63.24 ตามลำดับ ส่วนในถังปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 7 มีก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซชีวภาพร้อยละ 56.32 และ 62.86 ตามลำดับ ทั้งนี้ร้อยละของก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซชีวภาพของแต่ละถังปฏิกริยาแสดงดังภาพประกอบ 22



ภาพประกอบ 20 แสดงปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในถังปฏิกริยาที่มีพีเอชเริ่มต้นค่าต่างๆเมื่อใช้แป้งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน



ภาพประกอบ 21 แสดงปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นในถังปฏิกิริยาที่มีพีเอชเริ่มต้นค่าต่างๆเมื่อใช้แป้งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน

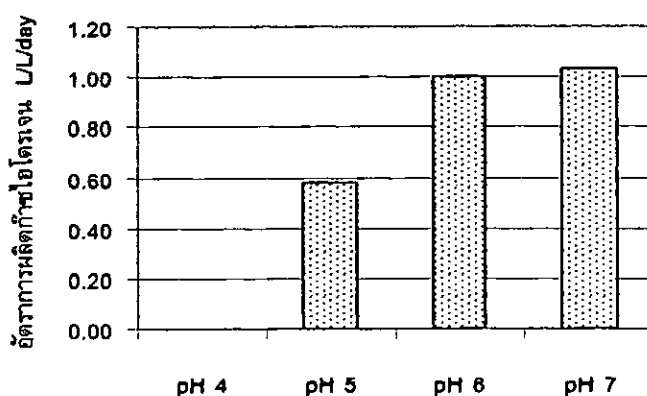


ภาพประกอบ 22 แสดงร้อยละของก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นในถังปฏิกิริยาที่มีพีเอชเริ่มต้นค่าต่างๆเมื่อใช้แป้งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน

4.2.6 อัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogen production rate) และ ประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงแ่งไปเป็นก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogen yield)

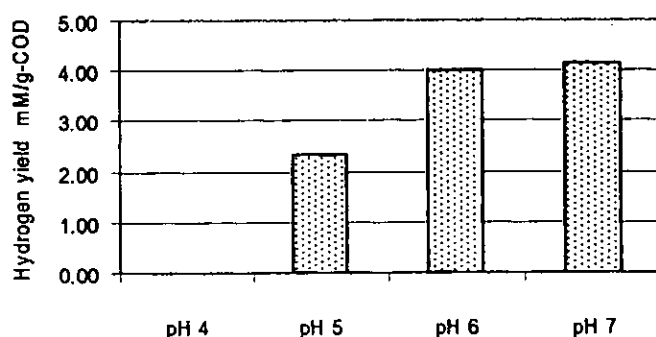
ผลการทดลองพบว่าแต่ละถังปฏิกริยามีอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนดังนี้คือ ถังปฏิกริยาที่มีพีเอชเริ่มต้น 4 ไม่สามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้เลย ถังปฏิกริยาที่มีพีเอชเริ่มต้น 5 มีอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนเป็น 0.58 L/L/day ถังปฏิกริยาที่มีพีเอชเริ่มต้น 6 มีอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนเป็น 1.00 L/L/day และถังปฏิกริยาที่มีพีเอชเริ่มต้น 7 มีอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนเป็น 1.03 L/L/day ตามลำดับ ดังแสดงรายละเอียดในภาพประกอบ 23

และเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงแ่งไปเป็นก๊าซไฮโดรเจนแล้ว พบว่า ถังปฏิกริยาที่มีพีเอชเริ่มต้น 4 ไม่มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแ่งก๊าซไฮโดรเจนได้เลย ถังปฏิกริยาที่มีพีเอชเริ่มต้น 5 มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงแ่งไปเป็นก๊าซไฮโดรเจนเป็น 2.32 mM/g-COD ถังปฏิกริยาที่มีพีเอชเริ่มต้น 6 มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงแ่งไปเป็นก๊าซไฮโดรเจนเป็น 4.02 mM/g-COD และถังปฏิกริยาที่มีพีเอชเริ่มต้น 7 มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงแ่งไปเป็นก๊าซไฮโดรเจนเป็น 4.15 mM/g-COD ตามลำดับ ดังแสดงรายละเอียดในภาพประกอบ 24



ถังปฏิกริยาที่มีพีเอชเริ่มต้นค่าต่างๆ

ภาพประกอบ 23 แสดงอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนในถังปฏิกริยาที่มีพีเอชเริ่มต้นค่าต่างๆเมื่อใช้แ่งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน



ถังปฏิกริยาที่มีพีเอชเริ่มต้นค่าต่างๆ

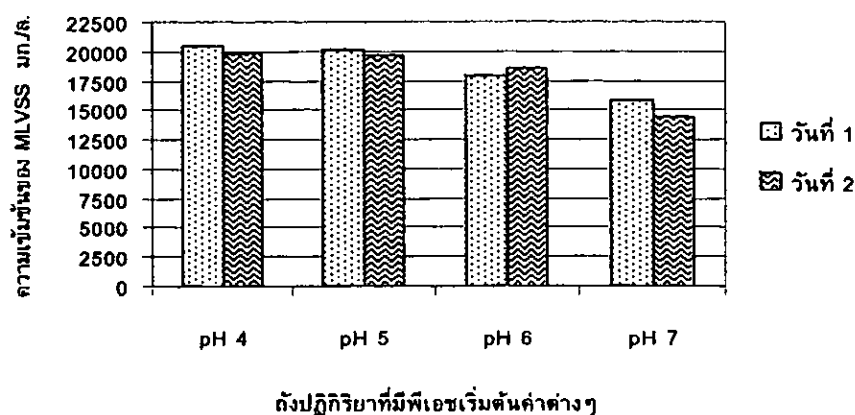
ภาพประกอบ 24 แสดงประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแ่งไปเป็นก๊าซไฮโดรเจนในถังปฏิกริยาที่มีพีเอชเริ่มต้นค่าต่างๆ เมื่อใช้แ่งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน

4.3 การทดลองที่ 3 ศึกษาพีเอชเริ่มต้นที่มีต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจนเมื่อใช้ตะกอนจากถังหมักตะกอนของระบบ AS และแ่งมันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอน

ในการทดลองที่ 3 นี้ เป็นการศึกษาผลของค่าพีเอชเริ่มต้นที่มีต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจนเมื่อใช้แ่งมันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอน โดยแปรเปลี่ยนค่าพีเอช ดังนี้คือ ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4 5 6 และ 7 ตามลำดับ ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้คือ

4.3.1 ค่าเอ็มแอลวีเอสเอส

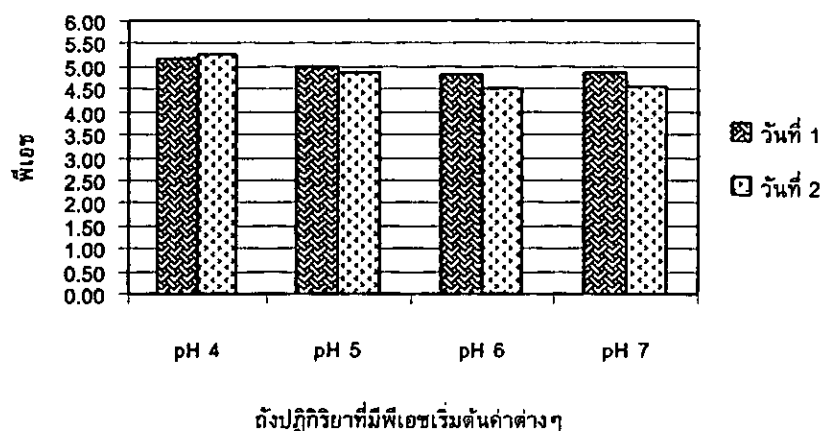
ถังปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 4 มีค่าเอ็มแอลวีเอสเอสจากวันเริ่มต้นจนถึงวันที่ 2 เป็น 22,897 20,494 และ 19,778 ตามลำดับ ถังปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 5 มีค่าเอ็มแอลวีเอสเอสจากวันเริ่มต้นจนถึงวันที่ 2 เป็น 23,104 20,160 และ 19,703 ตามลำดับ ถังปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 6 มีค่าเอ็มแอลวีเอสเอสจากวันเริ่มต้นจนถึงวันที่ 2 เป็น 22,823 17,857 และ 18,463 ตามลำดับ ถังปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 7 มีค่าเอ็มแอลวีเอสเอสจากวันเริ่มต้นจนถึงวันที่ 2 เป็น 22,490 15,807 และ 14,385 ตามลำดับ ซึ่งได้แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าเอ็มแอลวีเอสเอสจากการทดลองที่ 3 นี้ ในภาพประกอบ 25 จากผลการทดลองพบว่าในถังปฏิกริยาที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นค่าสูง เมื่อผ่านการหมักเพื่อผลิตก๊าซไฮโดรเจนแล้วจะมีค่าเอ็มแอลวีเอสเอสลดลงมากกว่าถังปฏิกริยาที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นในการหมักค่าต่ำ ซึ่งผลการทดลองนี้ให้แนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงค่าเอ็มแอลวีเอสเอสเช่นเดียวกับการทดลองที่ 2 ซึ่งใช้แ่งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน



ภาพประกอบ 25 แสดงค่าความเข้มข้นของ MLVSS ในถึงปฏิกิริยาที่มีพีเอชเริ่มต้นค่าต่าง ๆ เมื่อใช้แ่งมันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอน

4.3.2 ค่าพีเอช

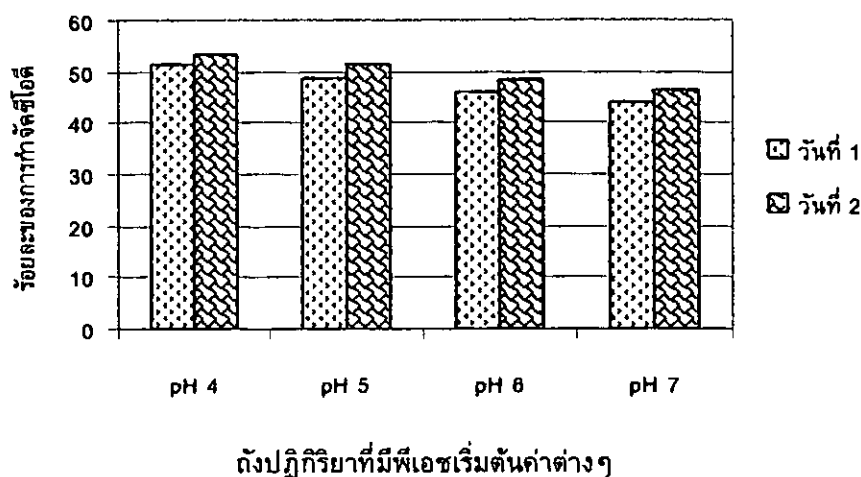
จากการทดลองพบว่าค่าพีเอชจากวันเริ่มต้นจนถึงวันที่ 2 ของแต่ละถึงปฏิกิริยามีค่าเป็นดังนี้คือ ถึงปฏิกิริยาพีเอชเริ่มต้น 4 มีค่า 4.00 5.17 และ 5.24 ตามลำดับ ถึงปฏิกิริยาพีเอชเริ่มต้น 5 มีค่า 5.00 5.01 และ 4.87 ตามลำดับ ถึงปฏิกิริยาพีเอชเริ่มต้น 6 มีค่า 6.00 4.82 และ 4.50 ตามลำดับ และถึงปฏิกิริยาพีเอชเริ่มต้น 7 มีค่า 7.00 4.84 และ 4.56 ตามลำดับ จะเห็นว่าถึงปฏิกิริยาพีเอชเริ่มต้น 5 6 และ 7 มีค่าพีเอชลดลงเรื่อยๆ จากวันเริ่มต้นจนถึงวันที่ 2 แต่ถึงปฏิกิริยาพีเอชเริ่มต้น 4 นั้นจะมีค่าพีเอชสูงขึ้นจากค่าพีเอชเริ่มต้น ดังแสดงในภาพประกอบ 26



ภาพประกอบ 26 แสดงการเปลี่ยนแปลงของพีเอช ในถึงปฏิกิริยาที่มีพีเอชเริ่มต้นค่าต่าง ๆ เมื่อใช้แ่งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน

4.3.3 ค่าซีโอดี

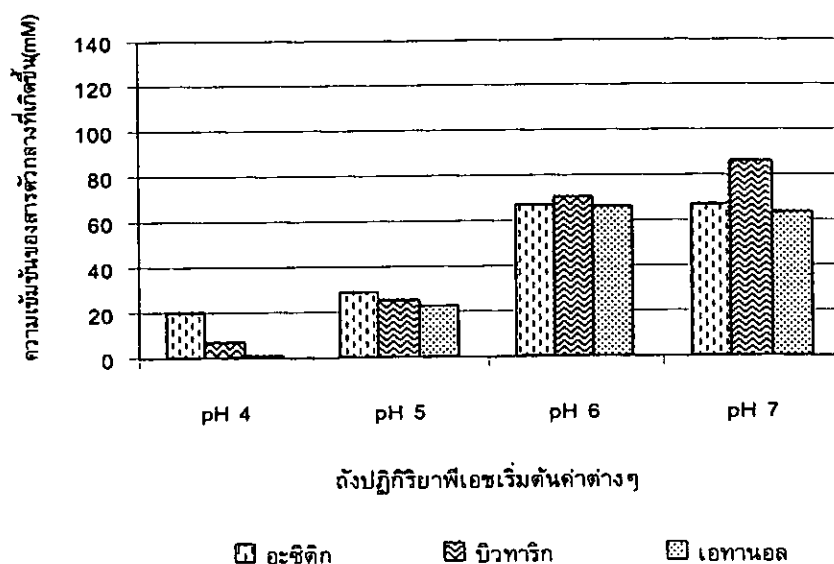
ในการทดลองที่ 3 นี้ใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอนโดยเตรียมที่ความเข้มข้น 22 กรัมต่อลิตร (วิธีการเตรียมตามหัวข้อ 3.2.1.1 ก.) มีค่าซีโอดีประมาณ 24,112 มิลลิกรัมต่อลิตร ทุกถังปฏิกริยา จากการทดลองพบว่าค่าซีโอดีของแต่ละถังปฏิกริยามีค่าลดลงไปจากค่าเริ่มต้นในวันที่ 1 และ 2 ดังนี้คือ ถังปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 4 ลดลงเป็น 11,727 และ 11,283 ตามลำดับ ถังปฏิกริยา พีเอชเริ่มต้น 5 มีค่า 12,400 และ 11,697 ตามลำดับ ถังปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 6 มีค่า 13,024 13,467 ตามลำดับ ถังปฏิกริยา พีเอชเริ่มต้น 7 มีค่า 13,467 และ 12,977 ตามลำดับ ในระยะเวลาเก็บ 2 วันนี้ ค่าซีโอดีที่ถูกกำจัดของแต่ละถังปฏิกริยาที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4 5 6 และ 7 มีค่าเป็นร้อยละ 53.21 51.49 และ 48.45 และ 46.18 ตามลำดับ จะพบว่าค่าร้อยละของซีโอดีที่ลดลงจะมีค่าลดน้อยลงเมื่อค่าพีเอชเริ่มต้นสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากถังปฏิกริยาที่เริ่มต้นด้วยค่าพีเอชสูงนั้นจะมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ และก๊าซไฮโดรเจนสูงกว่าถังปฏิกริยาที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นต่ำ ดังผลการทดลองในข้อ 4.3.5 ซึ่งเมื่อมีก๊าซเกิดขึ้นมากปัญหาที่ตามมาคือการลอยตัวของตะกอนแบบที่เรีย (Bulking) ซึ่งเกิดจากฟองก๊าซเล็กๆ ที่เกิดขึ้นนั้นเกาะบนผิวเซลล์แบคทีเรียมากจนกระทั่งทำให้ความถ่วงจำเพาะของตะกอนจุลินทรีย์ที่อยู่ด้านล่างของถังปฏิกริยานั้น ต่ำกว่าความถ่วงจำเพาะของน้ำ จึงทำให้ตะกอนจุลินทรีย์นี้ลอยตัวขึ้นมา (สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. 2530:62) และในการวัดค่าซีโอดีของการทดลองครั้งนี้ ผู้วิจัยได้วิเคราะห์ซีโอดีที่เกิดจากการตกตะกอน (Settle COD) ไม่ได้ใช้ผ่านการหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วสูง (Centrifuge COD) ดังนั้นเมื่อค่าพีเอชเริ่มต้นของถังปฏิกริยาสูงจะเกิดก๊าซชีวภาพในปริมาณที่มาก จึงมีปัญหาคะกอนลอยเกิดขึ้นโดยมีตะกอนจุลินทรีย์แขวนลอยอยู่ในน้ำหมัก ดังนั้นเมื่อนำตัวอย่างน้ำมาทำการวิเคราะห์จึงมีค่าซีโอดีสูง ดังแสดงในภาพประกอบ 27 นอกจากนี้แล้วเมื่อค่าพีเอชเริ่มต้นสูงขึ้นคือจากพีเอชเริ่มต้น 4 5 6 และ 7 ตามลำดับ เมื่อหมักไปจะมีปริมาณกรดอินทรีย์สะสมสูงขึ้นตามด้วยดังผลการทดลองในข้อ 4.3.4 ซึ่งเมื่อนำไปวิเคราะห์ค่าซีโอดีจึงทำให้มีค่าสูงขึ้นตามไปด้วยซึ่งคิม (Kim, 2004 : 1133-1140) พบว่าร้อยละ 84-90 ของค่า SCOD นั้นเกิดจากการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยง่าย ดังเหตุผลตามที่กล่าวมาแล้วข้างต้นนี้ จึงทำให้ค่าซีโอดีที่ถูกกำจัดของน้ำที่ผ่านการหมักในถังปฏิกริยาที่มีค่าพีเอชเริ่มต้น 7 มีค่าน้อยกว่าถังปฏิกริยาที่มีค่าพีเอชเริ่มต้น 6 5 และ 4 ตามลำดับ



ภาพประกอบ 27 แสดงร้อยละของการกำจัดซีโอดีในถึงปฏิกิริยาที่มีพีเอชเริ่มต้นค่าต่างๆ
เมื่อใช้แอมโมเนียสำหรับเป็นแหล่งคาร์บอน

4.3.4 กรดอินทรีย์ระเหยง่าย

จากการทดลองเมื่อผ่านการหมักไป 2 วัน พบว่าค่าร้อยละของความเข้มข้นอะซิติก บิวทริก โพรพอนิก และเอทานอล ของถึงปฏิกิริยาพีเอชเริ่มต้น 4 มีค่าเป็น 29.33 34.61 ไม่สามารถตรวจวัดได้ และ 0.31 ตามลำดับ หรือ 19.48 6.93 ไม่สามารถตรวจวัดได้ และ 1.09 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ และถึงปฏิกิริยาพีเอชเริ่มต้น 5 มีค่าเป็น 15.77 41.73 ไม่สามารถตรวจวัดได้ และ 28.56 ตามลำดับ หรือ 28.32 24.86 ไม่สามารถตรวจวัดได้ และ 22.68 มิลลิโมลาร์ตามลำดับ และถึงปฏิกิริยาพีเอชเริ่มต้น 6 มีค่าเป็น 15.10 49.45 ไม่สามารถตรวจวัดได้ และ 31.69 ตามลำดับ หรือ 67.03 70.09 ไม่สามารถตรวจวัดได้ และ 65.96 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ ส่วนถึงปฏิกิริยาพีเอชเริ่มต้น 7 มีค่าเป็น 13.34 55.34 ไม่สามารถตรวจวัดได้ และ 27.59 ตามลำดับ หรือ 67.38 86.45 ไม่สามารถตรวจวัดได้ และ 63.66 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ จะเห็นว่ากรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่พบมากที่สุดคือ กรดบิวทริก และ กรดอะซิติก ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับใช้แอมโมเนียเป็นแหล่งคาร์บอน



ภาพประกอบ 28 แสดงความเข้มข้นของสารตัวกลางที่เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์ที่มีพีเอชเริ่มต้นค่าต่างๆเมื่อใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอน

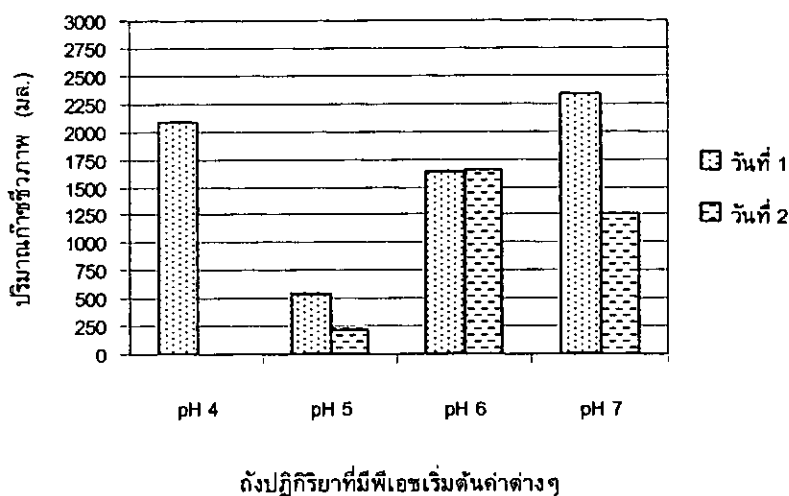
หมายเหตุ ไม่สามารถตรวจพบกรดไพรูวอิกในสารตัวกลางที่เกิดขึ้นเนื่องจากมีปริมาณน้อยมาก

4.3.5 ปริมาณก๊าซ

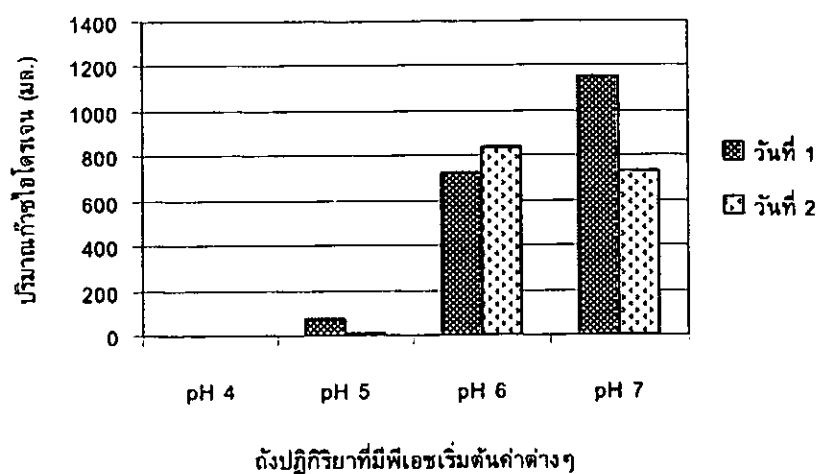
ผลการทดลองพบว่าปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละถังปฏิกรณ์ ในวันที่ 1 และ วันที่ 2 มีค่าเป็นดังนี้คือ ในถังปฏิกรณ์ pH 4 มีก๊าซชีวภาพเกิดขึ้น ในวันที่ 1 และ 2 มีค่าเป็น 2,077 และ 0 มล. ตามลำดับ รวมทั้ง 2 วัน มีค่าเป็น 2,077 มล. และในถังปฏิกรณ์ pH 5 มีก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นในวันที่ 1 และ 2 มีค่าเป็น 540 และ 209 มล. ตามลำดับ รวมทั้ง 2 วัน มีค่าเป็น 749 มล. ส่วนในถังปฏิกรณ์ pH 6 มีก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นในวันที่ 1 และ 2 มีค่าเป็น 1,641 และ 1,656 มล. ตามลำดับ รวมทั้ง 2 วันมีค่าเป็น 3,297 มล. และในถังปฏิกรณ์ pH 7 มีก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นในวันที่ 1 และ 2 มีค่าเป็น 2,344 และ 1,252 มล. ตามลำดับ รวมทั้ง 2 วัน มีค่าเป็น 3,596 มล. ทั้งนี้การผลิตก๊าซชีวภาพของแต่ละถังปฏิกรณ์แสดงได้ดังภาพประกอบ 29 และในภาคผนวก จ

ส่วนปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้ในแต่ละถังปฏิกรณ์ในวันที่ 1 และ 2 มีค่าเป็นดังนี้คือ ในถังปฏิกรณ์ pH 4 ไฮโดรเจนเกิดขึ้น 0 และ 0 มล. ตามลำดับ และในถังปฏิกรณ์ pH 5 มีก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้นในวันที่ 1 และ 2 มีค่าเป็น 70 และ 13 มล. ตามลำดับ รวมทั้ง 2 วัน มีค่าเป็น

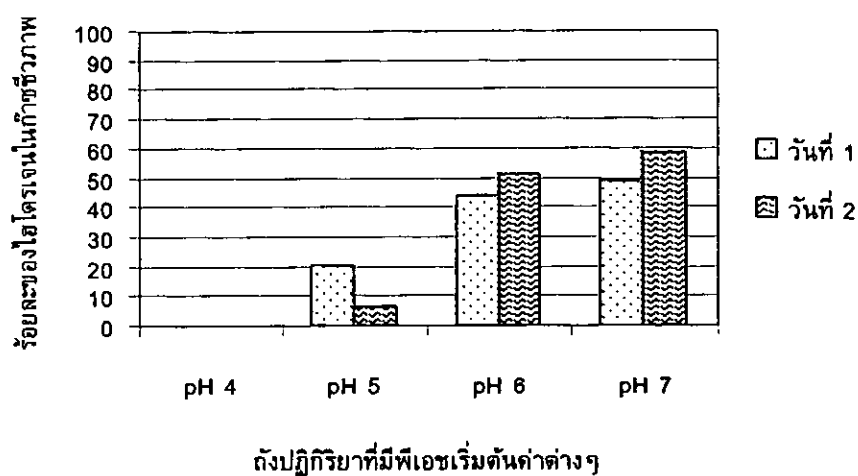
83 มล. ส่วนในถังปฏิกริยา pH 6 มีก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้นในวันที่ 1 และ 2 มีค่าเป็น 722 และ 837 มล. ตามลำดับ รวมทั้ง 2 วันมีค่าเป็น 1,559 มล. และในถังปฏิกริยา pH 7 มีก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้นในวันที่ 1 และ 2 มีค่าเป็น 1,154 และ 733 มล. ตามลำดับ รวมทั้ง 2 วัน มีค่าเป็น 1,887 ทั้งนี้ ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้ในแต่ละถังปฏิกริยานั้นแสดงดังภาพประกอบ 30 ส่วนค่าร้อยละของก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นในแต่ละถังปฏิกริยา ในวันที่ 1 และ 2 เป็นดังนี้คือ ในถังปฏิกริยา pH 4 นั้นไม่สามารถตรวจวัดได้ ส่วนในถังปฏิกริยา pH 5 มีก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซชีวภาพร้อยละ 20.59 และ 6.91 ตามลำดับ และในถังปฏิกริยา pH 6 มีก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซชีวภาพร้อยละ 44.09 และ 50.97 ตามลำดับ ส่วนในถังปฏิกริยา pH 7 มีก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซชีวภาพร้อยละ 49.26 และ 58.64 ตามลำดับ ทั้งนี้ร้อยละของก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซชีวภาพของแต่ละถังปฏิกริยาแสดงดังภาพประกอบ 31



ภาพประกอบ 29 แสดงปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในถังปฏิกริยาที่มีพีเอชเริ่มต้นค่าต่างๆเมื่อใช้แ่งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน



ภาพประกอบ 30 แสดงปริมาณก๊าซไฮโดรเจนของถังปฏิกิริยา ค่าพีเอชเริ่มต้นต่าง ๆ เมื่อใช้แอมโมเนียสำหรับเป็นแหล่งคาร์บอน

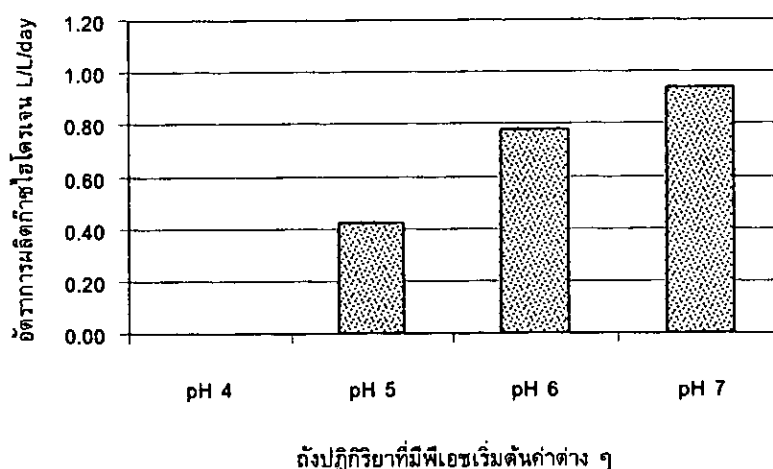


ภาพประกอบ 31 แสดงร้อยละของก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นในถังปฏิกิริยาที่มีพีเอชเริ่มต้นค่าต่างๆเมื่อใช้แอมโมเนียสำหรับเป็นแหล่งคาร์บอน

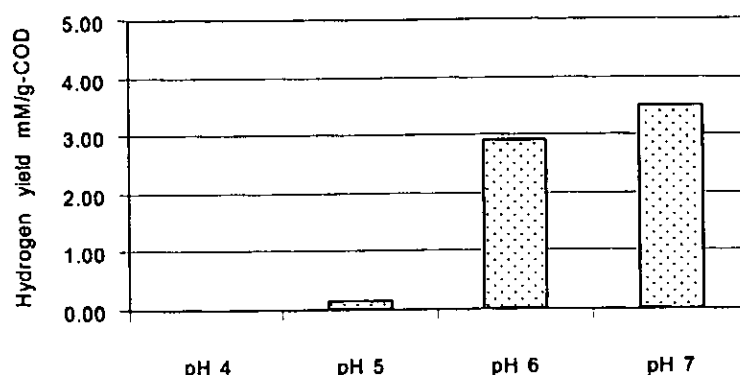
4.3.6 อัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogen production rate) และ ประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงแ่งไปเป็นก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogen yield)

ผลการทดลองพบว่าแต่ละถังปฏิกริยามีอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนดังนี้คือ ถังปฏิกริยาที่มีพีเอชเริ่มต้น 4 ไม่สามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้เลย ถังปฏิกริยาที่มีพีเอชเริ่มต้น 5 มีอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนเป็น 0.42 L/L/day ถังปฏิกริยาที่มีพีเอชเริ่มต้น 6 มีอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนเป็น 0.78 L/L/day และถังปฏิกริยาที่มีพีเอชเริ่มต้น 7 มีอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนเป็น 0.94 L/L/day ตามลำดับ ดังแสดงรายละเอียดในภาพประกอบ 32

และเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงแ่งไปเป็นก๊าซไฮโดรเจนแล้ว พบว่า ถังปฏิกริยาที่มีพีเอชเริ่มต้น 4 ไม่มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงแ่งไปเป็นก๊าซไฮโดรเจนได้เลย ถังปฏิกริยาที่มีพีเอชเริ่มต้น 5 มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงแ่งไปเป็นก๊าซไฮโดรเจนเป็น 0.15 mM/g-COD ถังปฏิกริยาที่มีพีเอชเริ่มต้น 6 มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงแ่งไปเป็นก๊าซไฮโดรเจนเป็น 2.89 mM/g-COD และถังปฏิกริยาที่มีพีเอชเริ่มต้น 7 มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงแ่งไปเป็นก๊าซไฮโดรเจนเป็น 3.49 mM/g-COD ตามลำดับ ดังแสดงรายละเอียดในภาพประกอบ 33



ภาพประกอบ 32 แสดงอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนในถังปฏิกริยาที่มีพีเอชเริ่มต้นค่าต่าง ๆ เมื่อใช้แ่งมันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอน



ดังปฏิกิริยาที่มีพีเอชเริ่มต้นค่าต่าง ๆ

ภาพประกอบ 33 แสดงประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแ่งไปเป็นก๊าซไฮโดรเจนในถังปฏิกิริยาที่มีพีเอชเริ่มต้นค่าต่าง ๆ เมื่อใช้แ่งมันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอน

จากการทดลองที่ 2 และ การทดลองที่ 3 พบว่าเมื่อใช้แ่งชนิดเดียวกันเป็นแหล่งคาร์บอน แต่มีค่าพีเอชเริ่มต้นในการหมักแตกต่างกันนั้น ทำให้ระบบหมักมีอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนแตกต่างกันด้วย ดังแสดงผลการทดลองในข้อ 4.25 และ 4.3.5 ตามลำดับ ทั้งนี้จากผลการศึกษาของลินและซางซึ่งได้ทำการหมักแ่งมันฝรั่งและแ่งข้าวโพดที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส พบว่าที่สภาวะการทดลองเดียวกันนี้แ่งทั้ง 2 ชนิด มีอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนที่แตกต่างกัน (Lin.; Chang. 1999 :498) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในครั้งนี้ และจะเห็นว่าในการใช้ค่าพีเอชเริ่มต้นในการหมักค่าสูงนั้น (พีเอช 7) จะมีความสามารถในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้มากกว่าการหมักโดยใช้พีเอชเริ่มต้นค่าต่ำ (พีเอชต่ำกว่า 7) ซึ่งผลการทดลองที่ได้นี้สอดคล้องกับผลการทดลองของลี (Lee. 2002 : 694) ที่ได้ทดลองหมัก เพื่อผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยใช้ค่าพีเอชเริ่มต้นจาก 6 - 9 และมีค่าพีเอชหลังการหมักแล้วประมาณ 4 พบว่าค่าพีเอชเริ่มต้น 9 สามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้สูงสุด ทั้งนี้เนื่องมาจากถังปฏิกิริยาที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นต่ำ (ต่ำกว่า 9) นั้น มีค่าพีเอชลดลงไปถึงพีเอชประมาณ 4 เร็วกว่าค่าพีเอชเริ่มต้น 9 (เพราะในการทดลองนี้ไม่ได้มีการเติมบัฟเฟอร์เพื่อป้องกันการลดลงไปอย่างรวดเร็วของค่าพีเอช) จึงทำให้มีอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนต่ำกว่าถังปฏิกิริยาที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นสูง (พีเอชเริ่มต้น 9) อีกทั้งค่าพีเอช 4 นี้ ไม่เหมาะสมต่อการทำงานของเอนไซม์ไฮโดรจีเนสแล้ว (Lay. 2000 : 275) จึงทำให้อัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนต่ำหรืออาจจะไม่สามารถผลิตได้เลย ดังนั้นจากผลการทดลองที่ได้จึงสามารถเป็นตัวบ่งชี้ได้ว่าค่าพีเอชเริ่มต้นในการหมักนั้น จะมีผลต่อความสามารถในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนของระบบหมักซึ่งผลการทดลองที่ได้นี้สอดคล้องกับสมมติฐานข้อ 1.6.1.3 ซึ่งกล่าว

ไว้ว่า อัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนในถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบไม่ต่อเนื่อง จะแตกต่างกันเมื่อใช้ค่าพีเอชเริ่มต้นในการหมักแตกต่างกัน และจากผลการทดลองจะพบว่า ที่ระดับพีเอชเริ่มต้นในการหมักที่มีค่าเท่ากันแต่ใช้แหล่งคาร์บอนต่างชนิดกัน ได้ส่งผลให้ระบบหมักมีความสามารถในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนแตกต่างกันด้วย ซึ่งเป็นไปตามสมมติฐานข้อ 1.6.1.1 ที่ว่าอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนในถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบไม่ต่อเนื่องจะแตกต่างกันเมื่อใช้แหล่งคาร์บอนที่ต่างกัน

4.4 การทดลองที่ 4 ศึกษาและเปรียบเทียบ ผลของการขยายขนาดของถังปฏิกรณ์ที่มีผลต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจน

จากการทดลองที่ 2 พบว่าเมื่อใช้แป้งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอนโดยมีพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7 นั้น สามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ในอัตรา 1.03 L/L/day และมี Hydrogen yield เท่ากับ 4.15 Mm/g-COD ส่วนในการทดลองที่ 3 นั้น ใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอนและมีพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7 พบว่าสามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ในอัตรา 0.94 L/L/day และมี Hydrogen yield เท่ากับ 3.49 Mm/g-COD ซึ่งเห็นได้ว่าแป้งข้าวเจ้าสามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้มากกว่าแป้งมันสำปะหลังเล็กน้อยจนเกือบจะเท่ากัน แต่ในการทดลองที่ 4 นี้ ได้เลือกแป้งมันสำปะหลังมาเป็นแหล่งคาร์บอน ทั้งนี้เพราะอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนและ Hydrogen yield เมื่อใช้แป้งข้าวเจ้าและแป้งมันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอนนั้นแตกต่างกันไม่มากนัก และน้ำทิ้งจากโรงงานแป้งมันสำปะหลังนั้นเมื่อผ่านเครื่อง Decanter และ Separator จะมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูง กล่าวคือมีค่าซีโอดีประมาณ 20,000 มก./ล (สุเมธ ชวเดช และคณะ. 2529) ซึ่งเห็นได้ว่าน้ำทิ้งจากโรงงานแป้งมันสำปะหลังนั้น มีค่าซีโอดีใกล้เคียงกับค่าซีโอดีของน้ำแป้งสังเคราะห์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ดังนั้นจึงทำให้ผู้วิจัยต้องการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบว่าผลของการขยายถังปฏิกรณ์ขึ้นนั้น จะทำให้ความสามารถในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนยังมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับการใช้ถังปฏิกรณ์ขนาดเล็กในการหมักหรือไม่ ทั้งนี้เพื่อหาข้อมูลพื้นฐาน เกี่ยวกับการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ จึงได้ขยายขนาดขึ้นมาผลิตในถังปฏิกรณ์ขนาดความจุ 5.51 ลิตร กว้าง 18 เซนติเมตร ยาว 18 เซนติเมตร และ สูง 17 เซนติเมตร มีปริมาตรใช้งานจริง 4 ลิตร ทำการทดลองครั้งละ 3 ถัง ระยะเวลาพักเก็บ 2 วัน ความเข้มข้นของซีโอดีเริ่มต้นเป็น 24,112 มิลลิกรัมต่อลิตร (หรือความเข้มข้นของแป้งมันสำปะหลัง 22 กรัมต่อลิตร) จากการทดลองมีผลการทดลองดังแสดงในตาราง 5

4.4.1 ค่าเอ็มแอลวีเอสเอส

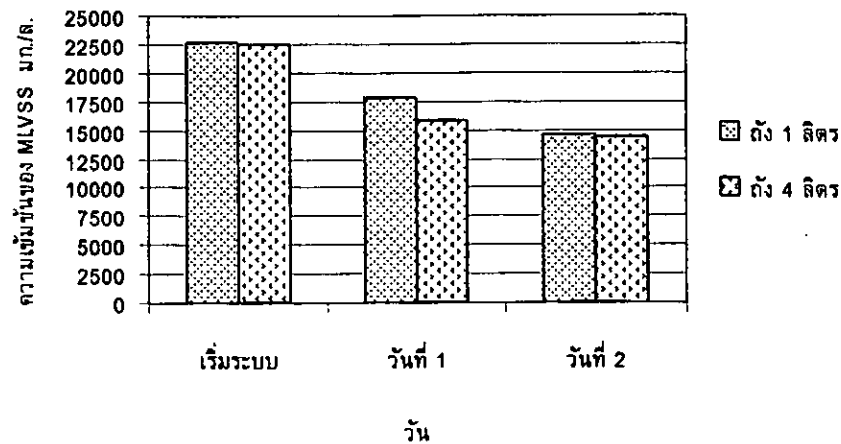
จากการทดลองพบว่า ค่าความเข้มข้นของเอ็มแอลวีเอสเอสของถังปฏิกรณ์ที่มีปริมาตรใช้งานจริงขนาด 4 ลิตร จากวันเริ่มต้น วันที่ 1 และ วันที่ 2 มีค่าลดลงเป็น 22,668 17,734 และ 14,648 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับถังปฏิกรณ์ที่มีปริมาตรใช้งานจริงขนาด 1 ลิตร แล้ว ผลสรุปพบว่ามีค่าเอ็มแอลวีเอสเอสลดลงไปในทิศทางเดียวกันคือ

จากวันเริ่มต้น วันที่ 1 และวันที่ 2 เป็น 22,490 15,807 และ 14,385 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ
 ดังแสดงในภาพประกอบ 34

ตาราง 5 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ตรวจวัดได้เมื่อทำการทดลองในถังปฏิกริยาขนาด 4 ลิตร

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์		
	เข้า	วันที่ 1	วันที่ 2
พีเอช	7.00	4.65	4.50
ซีโอดี (มก./ล.)	24,112	13,188	12,394
ประสิทธิภาพการบำบัด (ร้อยละ)	-	45.60	47.17
เอ็มแอลวีเอสเอส (มก./ล.)	22,668	17,734	14,648
ความเข้มข้นของสารตัวกลาง (มิลลิโมลาร์ (Mm))			
อะซิติก	-	71.81	94.01
บิวทริก	-	104.84	127.50
โพรพิโอนิก	-	-	-
เอทานอล	-	55.51	58.04
ปริมาตรก๊าซชีวภาพ (ลิตร)	-	11.10	6.12
อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ (L/L/day)	-	-	2.15
ปริมาตรไฮโดรเจน (ลิตร)	-	6.17	2.77
อัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจน (L/L/day)	-	-	1.12
Hydrogen yield (Mm/g-COD)	-	-	4.14

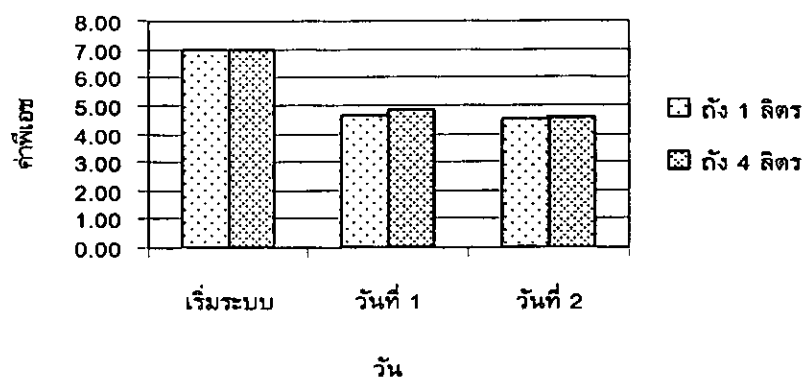
หมายเหตุ - หมายถึงไม่ทำการวิเคราะห์



ภาพประกอบ 34 แสดงการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของค่า MLVSS ในถังปฏิกรณ์ที่มีปริมาตรใช้งานจริงขนาด 4 ลิตร และถังปฏิกรณ์ที่มีปริมาตรใช้งานจริงขนาด 1 ลิตร

4.4.2 ค่าพีเอช

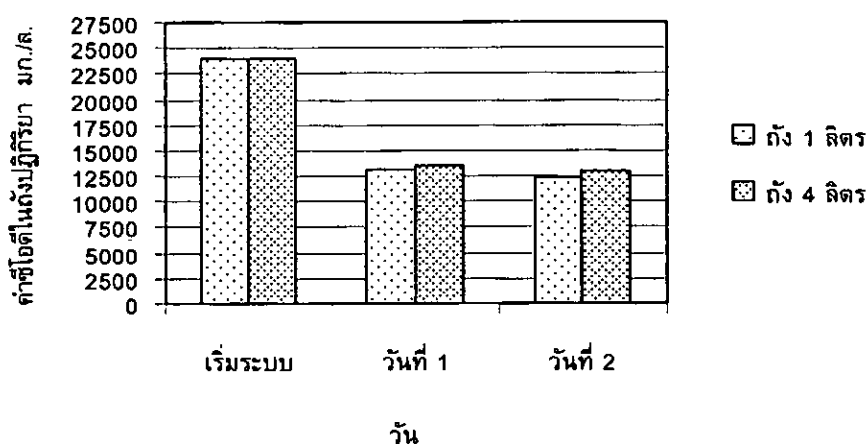
ค่าพีเอชในถังปฏิกรณ์ที่มีปริมาตรใช้งานจริงขนาด 4 ลิตร จากวันเริ่มต้น วันที่ 1 และ วันที่ 2 ของถังปฏิกรณ์มีค่าเป็น 7.00 4.65 และ 4.50 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับถังปฏิกรณ์ที่มีปริมาตรใช้งานจริงขนาด 1 ลิตรซึ่งมีค่าเป็น 7.00 4.84 และ 4.56 ตามลำดับ พบว่าเมื่อผ่านการหมักในแต่ละวัน ค่าพีเอชจะมีค่าลดลงไป แต่ไม่ได้มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก โดยในถังปฏิกรณ์ขนาดใหญ่จะมีค่าพีเอชลดลงมากกว่าถังปฏิกรณ์ขนาดเล็กเล็กน้อย ดังแสดงในภาพประกอบ 35



ภาพประกอบ 35 แสดงการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอช ในถังปฏิกรณ์ที่มีปริมาตรใช้งานจริงขนาด 4 ลิตร และถังปฏิกรณ์ที่มีปริมาตรใช้งานจริงขนาด 1 ลิตร

4.4.3 ค่าซีโอดี

ค่าซีโอดีของถังปฏิบัติการจากวันเริ่มต้น วันที่ 1 และ วันที่ 2 มีค่าเป็น 24,112 13,188 12,394 ซึ่งมีประสิทธิภาพการกำจัดเมื่อผ่านการหมัก 1 วัน 2 วัน เป็นร้อยละ 45.60 และ 47.17 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับถังปฏิบัติการที่มีปริมาตรใช้งานจริงขนาด 1 ลิตร ค่าซีโอดีของถังปฏิบัติการจากวันเริ่มต้น วันที่ 1 และวันที่ 2 มีค่าเป็น 24,112 13,467 และ 12,977 มีประสิทธิภาพการกำจัดเมื่อผ่านการหมัก 1 วัน 2 วัน เป็นร้อยละ 49.26 และ 58.64 ตามลำดับ ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าทั้งถังปฏิบัติการขนาดใหญ่และถังปฏิบัติการขนาดเล็กนั้น มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าซีโอดีไปในทิศทางเดียวกัน ดังแสดงในภาพประกอบ 36

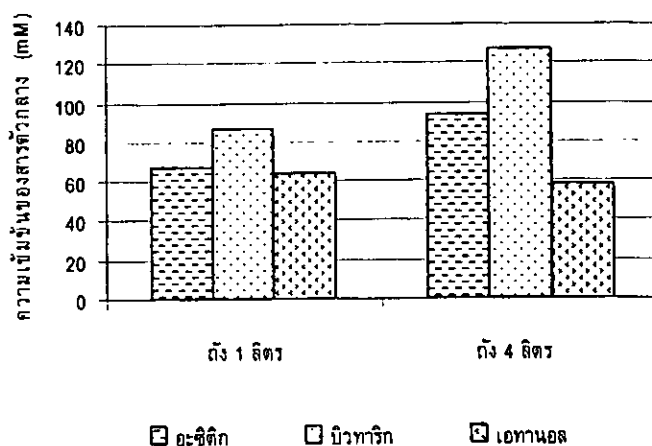


ภาพประกอบ 36 แสดงการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของค่าซีโอดี ในถังปฏิบัติการที่มีปริมาตรใช้งานจริงขนาด 4 ลิตร และถังปฏิบัติการที่มีปริมาตรใช้งานจริงขนาด 1 ลิตร

4.4.4 สารตัวกลางที่เกิดขึ้น

ในถังปฏิบัติการขนาด 4 ลิตร มีความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายของถัง ซึ่งได้แก่ อะซิติก บิวทริก โพรพีนอกนิก และ เอทานอล เมื่อผ่านการหมักไป 1 วัน มีค่าเป็นร้อยละ 13.29 61.11 โพรพีนอกนิกมีปริมาณน้อยมากไม่สามารถตรวจวัดได้ และ 21.97 ตามลำดับ หรือ 70.81 104.84 ไม่สามารถตรวจวัดได้ และ 55.51 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ ส่วนในวันที่ 2 มีค่าเป็นร้อยละ 14.77 63.38 โพรพีนอกนิกมีปริมาณน้อยมากไม่สามารถตรวจวัดได้ และ 19.79 ตามลำดับ หรือ 94.01 127.50 ไม่สามารถตรวจวัดได้ และ 58.04 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับถังปฏิบัติการขนาด 1 ลิตร ในวันที่ 2 ของการหมักมีค่าร้อยละของความเข้มข้นของ

อะซิติก บิวทริก โพรพิโอนิก และ เอทานอล เป็นร้อยละ 13.34 55.34 ไม่สามารถตรวจวัดได้ และ 27.59 ตามลำดับ หรือ 67.38 86.45 ไม่สามารถตรวจวัดได้ และ 63.66 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ ดังแสดงในภาพประกอบ 37

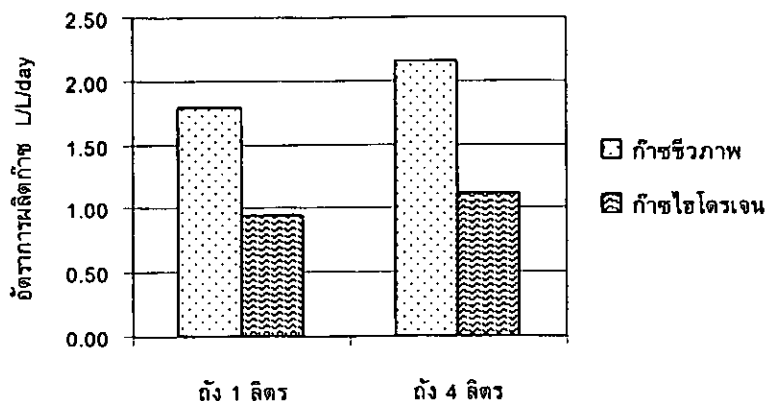


ภาพประกอบ 37 แสดงความเข้มข้นของสารตัวกลางที่เกิดขึ้น ในถังปฏิกรณ์ที่มีปริมาตรใช้งานจริงขนาด 4 ลิตร และถังปฏิกรณ์ที่มีปริมาตรใช้งานจริงขนาด 1 ลิตร

หมายเหตุ ไม่สามารถตรวจพบกรดโพรพิโอนิกในสารตัวกลางที่เกิดขึ้นเนื่องจากมีปริมาณน้อยมาก

4.4.5 ปริมาณก๊าซ อัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจน และ Hydrogen yield

จากการทดลองพบว่าถังปฏิกรณ์ที่มีปริมาตรใช้งานจริงขนาด 4 ลิตร เมื่อผ่านการหมัก 2 วัน มีก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นทั้งสิ้น 17.12 ลิตร และมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 2.15 L/L/day สามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ทั้งหมด 8.94 ลิตร และมีอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้เท่ากับ 1.12 L/L/day ซึ่งมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแ่งไปเป็นก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogen yield) 4.14 mM/g-COD ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับถังปฏิกรณ์ที่มีปริมาตรใช้งานจริง ขนาด 1 ลิตร โดยเมื่อผ่านการหมัก 2 วัน มีก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นทั้งสิ้น 3.60 ลิตร และมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 1.80 L/L/day สามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ทั้งหมด 1.89 ลิตร และมีอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้เท่ากับ 0.95 L/L/day ซึ่งมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแ่งไปเป็นก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogen yield) 3.50 mM/g-COD เห็นได้ว่าถังปฏิกรณ์ที่มีปริมาตรใช้งานจริงขนาด 4 ลิตร สามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ดีมากกว่าถังปฏิกรณ์ ที่มีปริมาตรใช้งานจริงขนาด 1 ลิตร ดังแสดงในภาพประกอบ 38



ภาพประกอบ 38 แสดงการเปรียบเทียบอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพและอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจน ในถังปฏิกรณ์ที่มีปริมาตร ใช้งานจริงขนาด 4 ลิตร และถังปฏิกรณ์ที่มีปริมาตร ใช้งานจริงขนาด 1 ลิตร

จากการทดลอง เมื่อวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ แล้วพบว่าทั้งถังปฏิกรณ์ ที่มีปริมาตรใช้งานจริงขนาด 4 ลิตรและถังปฏิกรณ์ขนาด 1 ลิตร ผลการทดลองที่ได้นั้นมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน แต่ถังปฏิกรณ์ที่มีปริมาตรใช้งานจริงขนาด 4 ลิตร นั้นจะมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงกว่าถังปฏิกรณ์ที่มีปริมาตรใช้งานจริง 1 ลิตร เท่ากับ 0.35 L/L/day และมีอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนสูงกว่า 0.17 L/L/day ซึ่งเป็นไปตามสมมติฐานในข้อ 1.6.2 ที่กล่าวไว้ว่าอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนของถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบไม่ต่อเนื่อง มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน เมื่อมีการขยายขนาดของถังปฏิกรณ์ขึ้นเป็น 4 เท่า แต่ที่อัตราการผลิตก๊าซแตกต่างกันนั้น อาจจะเนื่องมาจากในถังปฏิกรณ์ขนาดใหญ่ขึ้นจะใช้มอเตอร์ในการกวน จึงกวนของผสมระหว่างน้ำแอมโมเนียกับจุลินทรีย์ได้ทั่วถึงมากกว่าการใช้แท่งแม่เหล็กกวน(ใบพัดที่ต่ออยู่กับมอเตอร์นั้นมีความยาว 12 เซนติเมตร แต่แท่งแม่เหล็กที่ใช้ในการกวนนั้นมีความยาว 5 เซนติเมตร) ทั้งนี้เนื่องจากการกวนนั้นมีผลโดยตรงต่ออัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจน (Lay. 2000 : 276) ดังนั้นการกวนอย่างทั่วถึงจึงทำให้จุลินทรีย์มีโอกาสสัมผัสกับอาหารได้มากกว่าในถังปฏิกรณ์ขนาดเล็ก ด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้จึงทำให้ถังปฏิกรณ์ที่มีปริมาตรใช้งานจริงขนาด 4 ลิตร มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพและไฮโดรเจนมากกว่าถังปฏิกรณ์ที่มีปริมาตรใช้งานจริงขนาด 1 ลิตร

และเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแอมโมเนียเป็นก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogen yield) พบว่าถังปฏิกรณ์ที่มีปริมาตรใช้งานจริง 4 ลิตรนั้นมี Hydrogen yield เท่ากับ 4.14 Mm/g-COD หรือ

0.057 L-H₂/g-COD หรือ 0.063 L-H₂/g-starch ซึ่งเลย์ (Lay. 2000:269-278) ได้ทดลองผลิตก๊าซไฮโดรเจนในระบบต่อเนื่องโดยใช้ถังปฏิกริยา Chemostat reactor ซึ่งมีสารละลายแบ่งเป็นแหล่งคาร์บอนโดยมี organic loading rate 6 kg starch/m³/d ควบคุมพีเอชในถังปฏิกริยาไว้ที่ pH 5.2 และมี HRT (Hydraulic retention time) 17 ชั่วโมง ได้ค่า Hydrogen yield สูงสุดเท่ากับ 1.29 LH₂/g starch-COD นอกจากนี้ และซุงได้ทดลองผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยใช้ระบบ Continuous Flow Experiments และ Semi-batch feeding 3 ครั้งต่อวัน ซึ่งใช้ซูโครสเป็นแหล่งคาร์บอน ควบคุมพีเอชไว้ที่ 5.5 และมี HRT เท่ากับ 24 ชั่วโมง ทั้งนี้มี organic loading rate 6 kg starch/m³/d พบว่าได้ค่า Hydrogen yield สูงสุดเท่ากับ 0.0892 L-H₂/g-COD (Sung. 2002 :unpaged) จะเห็นว่าค่า Hydrogen yield ของการทดลองในครั้งนี้มีค่าน้อยกว่าการทดลองของเลย์และซุง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากระบบที่ผู้วิจัยได้ทดลองนี้เป็นระบบแบบต (Batch) มีการเติมอาหาร (แหล่งคาร์บอน) เพียง 1 ครั้งต่อการเริ่มระบบในแต่ละครั้ง ดังนั้นเมื่อระยะเวลาในการกักเก็บนานขึ้นจึงทำให้อาหารที่มีอยู่ไม่เพียงพอต่อความต้องการของแบคทีเรียที่อยู่ในระบบ จึงทำให้ผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้น้อยกว่าระบบต่อเนื่องที่มีอาหารในระบบคงที่อยู่ตลอดเวลา และเหตุผลสนับสนุนอีกประการก็คือในการทดลองครั้งนี้ไม่ได้มีการใช้สารเคมีเพื่อควบคุมพีเอชให้คงที่ไว้ในช่วงค่าที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจน ดังนั้นเมื่อผ่านกระบวนการหมักและระบบผลิตกรดอินทรีย์ขึ้นจึงทำให้พีเอชของระบบลดลงอย่างรวดเร็วจนต่ำกว่าช่วงค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจึงทำให้ผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้น้อยกว่าระบบที่มีการควบคุมพีเอชไว้ให้อยู่ในช่วงค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจน (Lin. 2004 : 67)

4.5 การทดลองที่ 5 การศึกษาผลของการเติมเชื้อจุลินทรีย์บริสุทธิ์ ที่มีต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจน

การทดลองนี้ใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอน ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7 ค่าซีโอดีเริ่มต้นเท่ากับ 24,112 มิลลิกรัมต่อลิตร (หรือความเข้มข้นของแป้งมันสำปะหลัง 22 กรัมต่อลิตร) เติมเชื้อจุลินทรีย์บริสุทธิ์สายพันธุ์ SWU1 และ SWU2 ซึ่งก่อนที่จะเติมเชื้อจุลินทรีย์บริสุทธิ์ได้หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าโอดี (ค่าความหนาแน่นของแสง) กับ เวลา (ชั่วโมง) ซึ่งค่าโอดีเทียบได้กับความเข้มข้นของจุลินทรีย์ในหลอดทดลอง เมื่อได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโอดีกับเวลาแล้ว ซึ่งทำให้ทราบชั่วโมงที่จุลินทรีย์บริสุทธิ์แต่ละชนิดเจริญเติบโตเต็มที่ จากการทดลองพบว่า ค่าโอดีของจุลินทรีย์บริสุทธิ์ทั้ง 2 ชนิด เริ่มคงที่ ณ ชั่วโมงที่ 14 ซึ่งแสดงว่า จุลินทรีย์เจริญเติบโตเต็มที่แล้ว จากนั้นจึงทำการเพิ่มจำนวนจุลินทรีย์ทั้ง 3 ชนิดให้ได้ปริมาณตามต้องการ โดยในการเติมเชื้อจุลินทรีย์บริสุทธิ์นั้นเติมลงไปปริมาณเท่ากับ 2 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรใช้งานจริงของถัง ซึ่งในการทดลองครั้งนี้ในแต่ละถังปฏิกริยานั้นมีปริมาตรใช้งานจริง 1 ลิตร ดังนั้นจึงเติมเชื้อจุลินทรีย์บริสุทธิ์ปริมาณ 20 มิลลิลิตร ลงไปในแต่ละถังปฏิกริยา โดยได้ทำการทดลองพร้อมกัน 3 ถัง คือ ถังปฏิกริยาที่เติมเชื้อจุลินทรีย์

บริษัทสายพันธุ์ SWU1 ดังปฏิบัติที่เดิมเชื้อจุลินทรีย์บริษัทสายพันธุ์ SWU2 และดังปฏิบัติควบคุมตามลำดับ รอบการทำงาน 2 วัน จากการทดลองได้ผลการทดลองดังแสดงในตาราง 6

4.5.1 เอ็มแอลวีเอสเอส

จากการทดลองพบว่าค่าเอ็มแอลวีเอสเอสในดังปฏิบัติควบคุม ดังปฏิบัติที่เดิมเชื้อจุลินทรีย์บริษัทสายพันธุ์ SWU1 และ SWU2 มีค่าเริ่มต้นเป็น 22,256 22,188 และ 22,611 ตามลำดับ และเมื่อผ่านการหมัก 2 วันมีค่าเป็น 14,385 14,085 และ 12,733 ตามลำดับ ผลสรุปว่าค่าเอ็มแอลวีเอสเอสของแต่ละดังปฏิบัติมีค่าลดลง โดยดังปฏิบัติที่เดิมเชื้อจุลินทรีย์บริษัทสายพันธุ์ SWU2 มีค่าลดลงต่ำกว่าดังปฏิบัติอื่น

4.5.2 พีเอช

จากการทดลองพบว่าค่าพีเอชของดังปฏิบัติควบคุม ดังปฏิบัติที่เดิมเชื้อจุลินทรีย์บริษัทสายพันธุ์ SWU1 และ SWU2 มีค่าเป็น 4.56 4.60 และ 4.66 ตามลำดับ ผลสรุปว่าดังปฏิบัติที่เดิมเชื้อจุลินทรีย์บริษัทมีค่าพีเอชสูงกว่าในดังปฏิบัติควบคุม เล็กน้อย

4.5.3 ซีไอดี

ค่าซีไอดีของดังปฏิบัติควบคุม ดังปฏิบัติที่เดิมเชื้อจุลินทรีย์บริษัทสายพันธุ์ SWU1 และ SWU2 มีค่าเป็น 12,977 13,680 และ 11,850 ตามลำดับ มีประสิทธิภาพการบำบัดเป็นร้อยละ 46.18 43.26 และ 50.85 ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าดังปฏิบัติที่เดิมเชื้อจุลินทรีย์บริษัทสายพันธุ์ SWU 2 นั้นสามารถลดซีไอดีได้สูง ซึ่งเมื่อสังเกตจากน้ำที่ผ่านการหมักหลังจากตกตะกอนแล้วประมาณ 1.50 ชั่วโมง พบว่ามีตะกอนลอยน้อยที่สุด

4.5.4 กรดอินทรีย์ระเหยง่าย

จากตาราง 6 พบว่ากรดอินทรีย์ระเหยง่ายของดังปฏิบัติควบคุม ดังปฏิบัติที่เดิมเชื้อจุลินทรีย์บริษัทสายพันธุ์ SWU1 และ SWU2 มีค่าความเข้มข้นของกรด อะซิติกเป็นร้อยละ 13.24 17.48 และ 19.24 ตามลำดับ หรือ 67.38 84.27 และ 88.29 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ มีค่าความเข้มข้นของกรดบิวทริก เป็นร้อยละ 55.34 58.97 และ 66.01 ตามลำดับ หรือ 86.45 90.41 และ 96.23 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ ส่วนกรดโพรพิโอนิกนั้น ดังปฏิบัติควบคุม และ ดังปฏิบัติที่เดิมเชื้อจุลินทรีย์บริษัทสายพันธุ์ SWU2 ไม่สามารถตรวจพบได้ แต่ดังปฏิบัติที่เดิมเชื้อจุลินทรีย์บริษัทสายพันธุ์ SWU1 พบเล็กน้อยคือร้อยละ 0.13 หรือ 4.28 มิลลิโมลาร์ และ ดังปฏิบัติควบคุม ดังปฏิบัติที่เดิมเชื้อจุลินทรีย์บริษัทสายพันธุ์ SWU1 และ SWU2 มีค่าความเข้มข้นของ เอทานอล เป็นร้อยละ 27.59 20.30 และ 11.82 ตามลำดับ หรือ 63.66 45.69 และ 24.80 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ ซึ่งพบว่ากรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่พบในแต่ละดังปฏิบัตินั้นบิวทริกเป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่พบมากที่สุด โดยดังปฏิบัติที่เดิมเชื้อจุลินทรีย์บริษัทสายพันธุ์ SWU2 มีค่าสูงกว่าดังอื่น

ตาราง 6 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ตรวจวัดได้เมื่อมีการเติมเชื้อจุลินทรีย์บริสุทธิ์

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์		
	ถึงควบคุม	ถึง SWU1	SWU 2
พีเอช	4.56	4.60	4.66
ซีไอดี (มก./ล.)	12,977	13,680	11,850
ประสิทธิภาพการบำบัด (ร้อยละ)	46.18	43.26	50.85
เอนแอลวีเอสเอส (มก./ล.)	14,385	14,085	12,733
สารตัวกลางที่เกิดขึ้น (มิลลิโมลาร์)			
อะซิติก	67.38	84.27	88.29
บิวทริก	86.45	90.41	96.23
โพรพิโอนิก	*	4.28	*
เอทานอล	63.66	45.69	24.80
ปริมาณก๊าซชีวภาพ (ลิตร)	4.20	6.78	5.16
อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ	2.1	3.39	2.58
ลิตร/ปริมาตรใช้งานถึง(ลิตร)/วัน			
ปริมาณไฮโดรเจน (ลิตร)	1.89	1.84	1.67
อัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจน	0.94	0.92	0.85
ลิตร/ปริมาตรใช้งานถึง(ลิตร)/วัน			
ปริมาณไฮโดรเจน(ร้อยละ)	58	38	36
ชั่วโมงที่เริ่มเกิดก๊าซชีวภาพ	13-14	8-9	7-8

4.5.5 ปริมาณก๊าซ

ถึงปฏิบัติการควบคุม ถึงปฏิบัติการที่เติมเชื้อจุลินทรีย์บริสุทธิ์สายพันธุ์ SWU1 และ SWU2 สามารถผลิตก๊าซชีวภาพมีค่าเป็น 4.20 6.78 5.16 ลิตร มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ 2.1 3.99 2.58 mLH₂/L-d สามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ 1.89 1.84 และ 1.67 ลิตรตามลำดับ คิด

เป็นอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจน 0.94 0.92 0.85 mLH₂/L-d ตามลำดับ มีปริมาณไฮโดรเจนร้อยละ 58 38 36 ตามลำดับ

ถึงปฏิกิริยาควบคุม ถึงปฏิกิริยาที่เติมเชื้อจุลินทรีย์บริสุทธิ์สายพันธุ์ SWU1 และ SWU2 เริ่มเกิดก๊าซชีวภาพชั่วโมงที่ 13-14 8-9 และ 7-8 ตามลำดับ จะเห็นว่าเมื่อเติมเชื้อจุลินทรีย์บริสุทธิ์สายพันธุ์ SWU1 และ SWU2 ลงไปแล้วจะเกิดก๊าซชีวภาพเร็วกว่าที่ไม่เติมเชื้อจุลินทรีย์บริสุทธิ์ลงไป แต่ร้อยละของก๊าซไฮโดรเจนจะต่ำกว่าของถึงปฏิกิริยาควบคุม อาจจะเป็นเพราะว่าเชื้อจุลินทรีย์บริสุทธิ์สายพันธุ์ SWU1 และ SWU2 ช่วยในการย่อยสลายแบริ่งรวดเร็วขึ้นแต่ผลผลิตสุดท้ายที่ได้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เชื้อจุลินทรีย์บริสุทธิ์สายพันธุ์ SWU1 เป็นแบคทีเรียแกรมบวก รูปร่างกลม เจริญเติบโตที่อุณหภูมิ 37 และ 50 องศาเซลเซียส มีความสามารถในการย่อยสลาย ฟีนอล (Phenol) แอนทราซีน (Anthracene) แนฟทาลีน (Naphthalene) และ ฟีนแอนทรีน (Phenanthrene) ส่วน SWU 2 ก็เป็นแบคทีเรียแกรมบวกเช่นกันแต่มีรูปร่างเป็นท่อน เจริญเติบโตได้ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส มีความสามารถในการย่อยสลาย ฟีนอล แอนทราซีน และแนฟทาลีน จะเห็นว่ามีความเป็นไปได้ที่จะผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานบางประเภทที่มีสารพิษเจือปน โดยการเติมเชื้อจุลินทรีย์บริสุทธิ์สายพันธุ์ SWU1 และ SWU2 เพื่อช่วยในการย่อยสลายสารพิษที่ปนเปื้อนที่มากับน้ำเสียจากโรงงานไปพร้อมๆ กระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากน้ำเสียดังกล่าวด้วย แต่ทั้งนี้ควรจะศึกษาหาระยะเวลาในการหมักที่เหมาะสม โดยลดระยะเวลาในการหมักลง เช่น 44 40 36 32 และ 28 ชั่วโมง เป็นต้น เพื่อจะได้ช่วยประหยัดพลังงานในการกวนในขณะทำการหมัก

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

การวิจัยและศึกษาในครั้งนี้ เป็นการศึกษามูลของแหล่งคาร์บอนและจุลินทรีย์ที่มีต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจนในถังปฏิกริยาไร้อากาศแบบไม่ต่อเนื่อง ซึ่งได้แบ่งการทดลองออกเป็น 5 การทดลอง กล่าวคือ การทดลองที่ 1 มุ่งหวังเพื่อศึกษาความสามารถของตะกอนจากแหล่งที่ต่างกัน และชนิดของแหล่งคาร์บอน ที่มีผลต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจนเมื่อมีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากันคือ 5.5 ตลอดจนศึกษาการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในกระบวนการหมักเพื่อผลิตก๊าซไฮโดรเจน การทดลองที่ 2 และ 3 นั้น มีจุดประสงค์ที่จะศึกษามูลของค่าพีเอชเริ่มต้นที่มีต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจนของแหล่งคาร์บอนแต่ละชนิด การทดลองที่ 4 มีจุดประสงค์เพื่อยืนยันว่าเมื่อขยายขนาดถังปฏิกริยาขึ้น และไม่ได้ใช้น้ำกลั่นในการผลิต ก็สามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้เช่นเดียวกันกับถังปฏิกริยาขนาดเล็ก ส่วนการทดลองที่ 5 มุ่งหวังเพื่อศึกษามูลของการเติมเชื้อจุลินทรีย์บริสุทธิ์ที่มีต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจน ซึ่งสรุปผลการทดลองได้ดังนี้คือ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้ มี 5 การทดลอง ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้ คือ

5.1.1 การทดลองที่ 1 ทำการศึกษาและเปรียบเทียบผลของแหล่งคาร์บอนและแหล่งจุลินทรีย์ที่มีผลต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจน

จากการทดลองพบว่าในกระบวนการหมักเพื่อผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยใช้ค่าพีเอชเริ่มต้นของระบบเท่ากันนั้น เมื่อใช้ตะกอนจุลินทรีย์จากแหล่งที่ต่างกันแม้จะมีแหล่งคาร์บอนชนิดเดียวกันก็ทำให้ความสามารถในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนแตกต่างกัน ในขณะที่เดียวกันเมื่อใช้ค่าพีเอชเริ่มต้นที่มีค่าเท่ากันโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์จากแหล่งเดียวกัน แต่มีแหล่งคาร์บอนที่แตกต่างกันก็ทำให้ความสามารถในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนแตกต่างกันด้วย ดังเช่น ถังปฏิกริยา 1AS 2AS 1UASB และ 2UASB มีอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนดังนี้คือ 0.22 0.94 1.04 และ 1.1 L/L/day ตามลำดับ และมีเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 21.47 61.56 59.95 และ 58.98 ตามลำดับซึ่งตลอดการทดลองนี้ใช้ค่า F/M ratio ในการเริ่มต้นการทดลองเท่ากับ 0.99 - 1.04 ส่วนระยะเวลาในการกักเก็บเพื่อผลิตก๊าซไฮโดรเจนนั้นไม่ควรจะเกิน 2 วัน เพราะหลังจากวันที่ 2 ไปแล้วจะมีปริมาณน้อย

5.1.2 การทดลองที่ 2 ศึกษาผลของค่า pH เริ่มต้นที่มีต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจนเมื่อใช้ตะกอนจากถังหมักตะกอนของระบบ AS และแบ่งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน

จากการทดลองพบว่าเมื่อใช้ตะกอนจุลินทรีย์จากถังหมักตะกอนของระบบ AS และแบ่งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน ซึ่งมีพีเอชเริ่มต้นในการหมักเป็น 4 5 6 และ 7 มีอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนดังนี้คือ 0 0.58 1.00 และ 1.03 L/L/day ตามลำดับ ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 0 62.32 63.24 และ 62.86 ตามลำดับ ทั้งนี้ถึงปฏิกิริยาพีเอชเริ่มต้นในการหมักเท่ากับ 7 มี Hydrogen yield สูงที่สุดคือ 4.95 mM/g-COD ซึ่งตลอดการทดลองนี้ใช้ค่า F/M ratio ในการเริ่มต้นการทดลองเท่ากับ 0.97 – 1.02 และมีระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแม้ใช้แหล่งตะกอนจุลินทรีย์และแหล่งคาร์บอนจากแหล่งเดียวกัน แต่ค่าพีเอชเริ่มต้นในการหมักต่างกันก็ทำให้สามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ต่างกันด้วย และเห็นได้ว่าเมื่อค่าพีเอชเริ่มต้นในการหมักสูงขึ้นนั้นทำให้สามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้มากขึ้นด้วย

5.1.3 การทดลองที่ 3 ศึกษาผลของค่า พีเอชเริ่มต้นที่มีต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจนเมื่อใช้ตะกอนจากถังหมักตะกอนของระบบ AS และแบ่งมันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอน

จากการทดลองพบว่าเมื่อใช้ตะกอนจุลินทรีย์จากถังหมักตะกอนของระบบ AS และแบ่งมันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอน ซึ่งมีพีเอชเริ่มต้นในการหมักเป็น 4 5 6 และ 7 มีอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนดังนี้คือ 0 0.42 0.78 และ 0.94 L/L/day ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 0 6.91 50.97 และ 58.64 ตามลำดับ ทั้งนี้ถึงปฏิกิริยาพีเอชเริ่มต้นในการหมักเท่ากับ 7 มี Hydrogen yield สูงที่สุดคือ 3.50 mM/g-COD ซึ่งตลอดการทดลองนี้ใช้ค่า F/M ratio ในการเริ่มต้นการทดลองเท่ากับ 1.05 - 1.06 และมีระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแม้ใช้แหล่งตะกอนจุลินทรีย์และแหล่งคาร์บอนจากแหล่งเดียวกันแต่ค่าพีเอชเริ่มต้นในการหมักต่างกันก็ทำให้สามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ต่างกันด้วย และเห็นได้ว่าเมื่อค่าพีเอชเริ่มต้นในการหมักสูงขึ้นนั้นทำให้สามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้มากขึ้นด้วย ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับการทดลองที่ 2 แต่อัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนเมื่อใช้แบ่งมันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอนนั้น ได้น้อยกว่าเมื่อใช้แบ่งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอนเล็กน้อย

5.1.4 การทดลองที่ 4 ศึกษาและเปรียบเทียบผลของการขยายขนาดของถังปฏิกิริยาที่มีผลต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจน

จากการทดลองพบว่าถังปฏิกิริยาที่มีปริมาตรใช้งานจริงขนาด 4 ลิตรเมื่อผ่านการหมัก 2 วัน มีก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นทั้งสิ้น 17.12 ลิตร และมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 2.15 L/L/day สามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ทั้งหมด 8.94 ลิตร และมีอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้เท่ากับ 1.12 L/L/day ซึ่งมี Hydrogen yield เฉลี่ยเท่ากับ 4.14 mM/g-COD ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับถังปฏิกิริยาที่มีปริมาตรใช้งานจริง ขนาด 1 ลิตร โดยเมื่อผ่านการหมัก 2 วัน มีก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นทั้งสิ้น

3.60 ลิตร และมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 1.80 L/L/day สามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ทั้งหมด 1.89 ลิตร และมีอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้เท่ากับ 0.95 L/L/day มีความเข้มข้นของไฮโดรเจนในก๊าซชีวภาพร้อยละ 60.94 และมี Hydrogen yield สูงที่สุดคือ 3.49 mM/g-COD ซึ่งเห็นว่างถึงปฏิกิริยาที่มีปริมาตรใช้งานจริงขนาด 4 ลิตร จะสามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้มากกว่าถึงปฏิกิริยาที่มีปริมาตรใช้งานจริงขนาด 1 ลิตร อยู่ 0.17 L/L/day ทั้งนี้อาจจะเป็นเพราะเปลี่ยนจากการใช้แท่งแม่เหล็กกวนมาเป็นการใช้มอเตอร์กวนจึงกวนได้ทั่วถึงมากกว่า ทำให้จุลินทรีย์สัมผัสกับอาหารได้ดีกว่า ดังนั้นจึงผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้มากกว่า

5.1.5 การทดลองที่ 5 ศึกษาผลของการเติมเชื้อจุลินทรีย์บริสุทธิ์ ที่มีต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจน

จากการทดลองพบว่าเมื่อเติมเชื้อจุลินทรีย์บริสุทธิ์สายพันธุ์ SWU1 และ SWU2 ลงไปในถังปฏิกิริยาแล้ว ทำให้ระบบสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้เร็วขึ้น กล่าวคือความสามารถในการผลิตก๊าซชีวภาพของ ถังปฏิกิริยาควบคุม ถังปฏิกิริยาที่เติมเชื้อจุลินทรีย์บริสุทธิ์สายพันธุ์ SWU1 และ SWU2 นั้นสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ในชั่วโมงที่ 13-14 8-9 และ 7-8 ตามลำดับ และมี อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเป็น 2.1 3.99 และ 2.58 L/L/day ตามลำดับ ซึ่งมีอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนเป็น 0.94 0.92 0.85 L/L/day มีความเข้มข้นของไฮโดรเจนในก๊าซชีวภาพร้อยละ 58 38 และ 32 ตามลำดับ เห็นได้ว่าถังปฏิกิริยาที่เติมเชื้อจุลินทรีย์บริสุทธิ์นั้น มีความเข้มข้นของไฮโดรเจนในก๊าซชีวภาพน้อยกว่าถังปฏิกิริยาควบคุมเล็กน้อย

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ข้อเสนอแนะในการวิจัย

เพื่อให้ผลการวิจัยกระจ่างชัดเจนมากขึ้น ควรศึกษาเพิ่มเติมดังนี้คือ

5.2.1.1 ศึกษาการผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจากแหล่งอื่นๆ มาเปรียบเทียบกับ เช่น จากดินที่ปลูกพืชชนิดต่างๆ หรือตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้วัตถุดิบชนิดอื่น

5.2.1.2 ศึกษาการผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยใช้แหล่งคาร์บอนชนิดอื่นเช่น น้ำตาล

5.2.1.3 ศึกษาการผลิตก๊าซไฮโดรเจนที่ค่าพีเอชเริ่มต้นสูงกว่า 7 เมื่อใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอน

5.2.1.4 ศึกษาการผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยใช้น้ำเสียจริง จากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ที่มีคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบ

5.2.1.5 ศึกษาปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจน เช่น ค่าซีโอดีเริ่มต้น อุณหภูมิในถังปฏิกิริยาของการหมัก

5.2.1.6 ศึกษาระยะเวลาในการหมักที่มีผลต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจน โดยลดเวลาจาก 48 ชั่วโมง มาเป็น 44 40 36 หรือ 32 ชั่วโมง ตามลำดับ

5.2.1.7 เพื่อให้มีการผลิตก๊าซไฮโดรเจนเป็นไปได้อย่างต่อเนื่องควรศึกษาการผลิตก๊าซไฮโดรเจนในถังปฏิกริยาแบบต่อเนื่อง เช่น CSTR UASB และ ASBR เป็นต้น

5.2.1.8 ศึกษาผลของรูปร่างถังปฏิกริยาที่มีต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจน

5.2.2 ข้อเสนอแนะทั่วไป

จากการศึกษาและทดลองในครั้งนี้ ได้ทำให้ผู้วิจัยพบปัญหาและมีข้อสังเกตที่ต้องการจะแนะนำดังนี้คือ

5.2.2.1 ถังปฏิกริยาตลอดจน วาล์วต่างๆ ไม่ควรใช้วัสดุที่ทำมาจากโลหะ ทั้งนี้ควรใช้พลาสติกหรือวัสดุอื่นๆ ที่สามารถทนต่อสภาพกรดได้ เนื่องจากในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนนั้นอยู่ในสภาวะที่เป็นกรด จึงทำให้เกิดการกัดกร่อนวัสดุที่เป็นโลหะได้

5.2.2.2 ในการทดลองเรื่องการผลิตก๊าซไฮโดรเจนนั้น ควรติดตั้งระบบไว้ในบริเวณที่มีอากาศสามารถถ่ายเทได้สะดวก เนื่องจากว่ามีกลิ่นเหม็นอย่างรุนแรง

5.2.2.3 ในการต้มตะกอนหรือสลัดจ์ก่อนที่จะใช้ในการเริ่มต้นระบบนั้น ควรทำในตู้ที่มีเครื่องดูดอากาศด้วย ทั้งนี้เพราะในขณะที่ต้มนั้นจะก๊าซที่ละลายอยู่ในน้ำเสียนั้นระเหยออกมาด้วย จึงทำให้มีกลิ่นเหม็น และหากสูดดมเข้าไปอาจจะอันตรายต่อสุขภาพได้

5.2.2.4 ไม่ควรเว้นระยะว่าง (Head space) ใวน้อยเกินไป เพราะในขณะที่เกิดก๊าซชีวภาพขึ้นนั้น มักจะพบปัญหาตะกอนลอยและถ้าก๊าซมีแรงดันมากอาจจะดันตะกอนออกมาจากถังปฏิกริยา ทำให้เกิดปัญหาการอุดตันของวาล์วด้านบนของถังปฏิกริยาได้

5.2.2.5 ถ้าใช้สลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนก่อนที่จะนำสลัดจ์มาต้ม ควรจะกรองเอาเศษหิน ดิน ทราย ตลอดจนขยะต่างๆ ที่ปะปนอยู่กับสลัดจ์นั้นออกก่อน เพราะมีสิ่งปะปนอยู่กับสลัดจ์อยู่ในปริมาณค่อนข้างมาก

5.2.2.6 ในการเก็บตัวอย่างน้ำที่ผ่านการหมักนั้น ควรกระทำด้วยความระมัดระวังเพราะอาจจะทำให้น้ำนั้นกรดเสียผ้า และอาจทำให้เสื้อผ้าขาดและเสียหายได้

บรรณานุกรม

- กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน. (2543). รายงานพลังงานของไทย 2543. กรุงเทพฯ.
- เกรียงไกร พัทธยากร. (2545). การใช้จุลินทรีย์ผลิตเอนไซม์ไลเปสในการบำบัดน้ำเสียจากครัวที่ปนเปื้อนไขมัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. (เทคโนโลยีชีวภาพ). กรุงเทพฯ : บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. ถ่ายเอกสาร.
- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. (2539). การบำบัดน้ำเสีย. กรุงเทพฯ : มิตรนราการพิมพ์
- เกรียงศักดิ์ เลิศประภามงคล. (2546). พลังงานสะอาดจากเทคโนโลยีชีวภาพ(ตอนที่ 2 : การใช้ประโยชน์จากน้ำเสีย). LAB.TODAY. 2 (12). 15-19.
- กล้าณรงค์ ศรีรอด. (2543). เทคโนโลยีของแปปิง. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- เครือวัลย์ เคลื่อนสูงเนิน. (2537). ผลของสภาวะต่างๆ ต่อขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ ในการหมักกากมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอน. (คณะวิทยาศาสตร์). กรุงเทพฯ : บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. ถ่ายเอกสาร.
- จินตนา ขอบวิจิษณ์. (2543). การผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยแบคทีเรียสังเคราะห์แสงด้วยแป้งมันสำปะหลัง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย). กรุงเทพฯ : บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. ถ่ายเอกสาร
- ชัยวัฒน์ เจนวณิชย์. (2525). สารานุกรมธาตุ. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์
- ทวี จิตไมตรี. (2538). จุลชีววิทยาของระบบบำบัดน้ำเสีย. การควบคุมดูแลระบบบำบัดน้ำเสีย. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นวลพรรณ ณ ระนอง ; และมงคล เพ็ญสายใจ. (2542). น้ำและการบำบัดน้ำเสีย. กรุงเทพฯ : ภาควิชาชีวภาพประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ประภาพร เพี้ยแป. (2545). การทำงานของดังปฏิกริยาอุปทรงตัวอยู่ในระบบเอสบีอาร์ต่อการบำบัดน้ำเสีย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. (วิศวกรรมศาสตร์). ขอนแก่น : บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น. ถ่ายเอกสาร.
- เพชรพร ชาวกิจเจริญ. ระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจน. การควบคุมดูแลระบบบำบัดน้ำเสีย. หน้า 274. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันสิน ดัชนีกุลเวศม์. (2542). เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม เล่ม 2. กรุงเทพฯ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สมชาย เจียมธีรสกุล. (2530).การผลิตก๊าซมีเทนจากขยะโดยกระบวนการชีวภาพไร้อากาศแบบสองขั้นตอน.วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. (วิศวกรรมศาสตร์).จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: บัณฑิตวิทยาลัย. ถ่ายเอกสาร.

- สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. (2530). การวิจัยและพัฒนาระบบย่อยสลายไร้ออกซิเจนอิสระแบบสองขั้นตอน ขั้นห้องปฏิบัติการ เพื่อผลิตกรดอินทรีย์และก๊าซชีวภาพ. กรุงเทพฯ.
- สถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (2536 ก). การศึกษาการใช้พลังงานไฮโดรเจน. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- _____. (2538 ข). การศึกษาการดัดแปลงใช้เชื้อเพลิงไฮโดรเจนกับยานพาหนะ. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุขเมธ ขวเดช. (2529). การผลิตกรดอินทรีย์จากน้ำทิ้งโรงงานแป้งมันสำปะหลัง. กรุงเทพฯ : สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย.
- สุรพล สายพานิช. (2538). ระบบบำบัดน้ำเสียแบบ ACTIVATED SLUDGE. การควบคุมดูแลระบบบำบัดน้ำเสีย. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อดิศักดิ์ นุสิทธิ์. (2543). การศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงอาหารโดยระบบเอสบีอาร์. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม). กรุงเทพฯ : บัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. ถ่ายเอกสาร.
- อภิชัย เทอดเทียนวงษ์ ; และคนอื่น ๆ. (2541, มิถุนายน – กรกฎาคม). ไฮโดรเจนเชื้อเพลิงใหม่แห่งศตวรรษที่ 21. *Technology Journal*. 25 (139). 51 – 60.
- Afschar, A.S. ; & Schaller, K. (1991). *Production of acetone and butanol from starch by continuous bioprocess*. *J Biotechnol*. 18 : 255 – 264.
- APHA, AWWA, WEF. (1995). *Standard methods for the examination of water and wastewater 19th ed*. American Public Health Association, Washington DC.
- Bartell, T. (1986). *Summary Report : Sequencing Batch Reactor*. U.S. EPA.
- Billings, R.E. (1991). *The hydrogen world view*. American. : Academy of Science.
- Buranakarl, L. ; et al. (1987). *Growth of non-sulfur purple phototrophic bacteria under high temperature*. *Bulletin of Japanese Society of Microbial Ecology*. 2(1) : 13 – 19.
- Chang, F. Y. ; & Lin, C.Y. (2003). *Reactor configuration effect on biohydrogen in an up – flow anaerobic sludge blanket system*. *Proceedings of Asian Water Quality 2003 IWA-Asia Pacific Regional Conference in Bangkok, Thailand*.
- Cohen, A. et al. (1984). *Main characteristics and stoichiometric aspects of acidogenesis of soluble carbohydrate containing wastewater*. *Process. Biochem*. 19:228-237

- Fang, H.P. ; & Lui, H. (2001). *Granulation of a hydrogen – producing acidogenic sludge*. Proceedings of 9th World Congress of Anaerobic digestion, September 2 – 6. Belgium: Antwerpen.
- Ginkel, S.V. ; S.W. Sung; & J.J. Lay. (2001). *Biohydrogen production as a function of pH and substrate concentration*. Environ.Sci. Technol. 2001. 35:4726-4730.
- Grupe, H. ; Gottschalk, G. (1992). *Physiological events in Clostridium acetobutylicum during the shift from acidogenesis to solventogenesis in continous culture and presentation of model for shift induction*. Applied and Environmental Microbiology. 58 : 3896 – 3902.
- Guwy, A.J. ; et al. (1991). *Hydrogen production in a high rate fluidized bed anaerobic digester*. Wat Res. 31 : 1291 – 1298.
- Haffman, P. (1935). *The forever fuel : The story of hydrogen*. U.S.A. : Westview press.
- Han, S. ; Shin, H. (2004). *Performance of an innovative tow –stage process converting food waste to hydrogen and methane*. J. Air & Waste Manage. Assoc. 54 : 242-249.
- Hansel, A. ; & Lindblan P. (1998). *Towards optimization of cyanobacteria as biotechnological relevant produces of molecular hydrogen*. Appl Microbiol Biotechnol. 50 : 153 – 160.
- Hobson, N.P. ; & Wheatley, A. (1992). *Anaerobic digestion Modern theory and practice*. England : Elsevier Appl Sci.
- Stegmann, R & Zurawski, D. (2004). *Fermentative production of biohydrogen from biogenous raw and west materials*. Germany :Hamburg University of Science and Technology.
- Kataoka, N. ; A. Miya. ; & Kiriya, K. (1997). *Studies on hydrogen production by continuous culture system of hydrogen – producing anaerobic bacteria*. Wat Sci Tech. 36 : 41 – 47.
- Kim, S. I. ; et al. (2004). *Effect of low pH on the activity of hydrogen utizing methanogen in bio-hydrogen process*.Intrenational J. of Hydrogen Energy. 29 :1133 -1140.
- Kleerebezen, R ; Stams, AR. (2000). *Kinetics of syntrophic culture: a theoretical treatise on butyrate fermentation*. Biotechnol Bioeng. 67 : 529-543.
- Kruse, B. ;Grinna, S & Buch, C. (2002). *Hydrogen*. Norway: NFK Digitaltrykk. Retrieved February 20, 2005, from <http://www.bello.no/en/>
- Lakeman, B.J. ; Browning, J.D. (2001). *Global Status of Hydrogen Research*. 1st ed. United Kingdom : Crown.
- Lay, J.J. ; Lee, Y. J. : & Nioke, T. (1999a). *Feasibility of biological hydrogen production form organic fraction of municipal solid waste*. Wat Res. 33 : 2579 – 2586.

- _____. (2000b). *Modeling and optimization of anaerobic digested sludge converting starch to hydrogen*. Biotechnol Bioeng. 68 : 269 – 278.
- Lee, Y. ; Miyahara, T. : & Nioke, T. (2002). *Effect of pH on microbial hydrogen fermentation*. J. of Chem. Technol. Biotechnol. 77 : 694.
- Lin, C. ; Chang, R. (1999). *Hydrogen production during the anaerobic acidogenic conversion of glucose*. J. Chem Technol Biotechnol. 74 : 498.
- Lin, C. ; Chou, H. C. (2004). *Anaerobic Hydrogen Production from Sucrose Using an Acid-Enriched Sewage Sludge Microflora*. Eng. Life Sci. 4 : 66-70.
- Metchalf ; & Eddy. (1991). *Wastewater Engineering (treatment disposal reuse)*. 3rd ed. Singapore : Mc Graw – Hill Inc.
- Ming, D.B. ; S.S. Cheng. ; & Yu – Chien Chao. (2003). *Effect of substrates component on hydrogen fermentation of municipal substrates*. Proceedings of Asian Water quality 2003, IWA – Asia Water quality 2003, IWA – Asia Pacific Regional Conference in Bangkok, Thailand.
- Nioke, T. ; & Mizuno O. (2000). *Hydrogen fermentation of organic municipal wastes*. Wat Sci Tech. 42 : 155 – 162.
- Okamoto, M. et al. (2000). *Biological hydrogen potential of materials characteristics of the organic fraction of municipal solid wastes*. Wat Sci Tech. 41 : 25 – 32.
- Pohl, W.H. (1995). *Hydrogen and other alternative fuels for air and ground transportation*. England : John Wiley & Sons Ltd.
- Sung, S ; & T. Duangmanee. (2002). *Hydrogen production by anaerobic microbial communities exposed to repeated heat treatments..* Proceedings of the 2002 U.S. DOE Hydrogen program Review NREL/CP-610-3240.
- Thauer, R.K. (1997). *Limitation of microbial H₂ – formation via formation*. New York : Pergamon Press.
- Wang, C.C. et al. (2002). *Using filtrate of waste biosolids to effectively produce bio-hydrogen by anaerobic fermentation*. Water Research. 37: 2789-2793

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
วิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ

1. ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand, COD)

การวิเคราะห์หาค่าซีโอดีเป็นการวัดความสกปรกของน้ำเสีย โดยคิดเปรียบเทียบกับรูปของปริมาณออกซิเจนที่ต้องการใช้ในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ โดยใช้สารเคมีที่มีอำนาจในการออกซิไดซ์สูงในสารละลายที่เป็นกรด ในการทดลองครั้งนี้ใช้การวิเคราะห์ซีโอดีแบบเปิด (Open Reflux) ซึ่งมีวิธีวิเคราะห์ดังต่อไปนี้คือ

1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1.1.1 ขวดเออร์เลนเมเยอร์ ขนาดความจุ 250 – 500 ลบ.ซม.

1.1.2 เครื่องควบแน่น

1.2 วิธีวิเคราะห์

1.2.1 ใส่เมอร์คิวรี(II)ซัลเฟต(HgSO_4) ประมาณ 0.4 กรัม ลงในขวดรีฟลักซ์ เดิมตัวอย่างอย่างน้ำที่ทำให้เจือจางแล้วลงไป 20 ลบ.ซม. เขย่าให้เข้ากัน เติมสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมตความเข้มข้น 0.0417 โมล/ลบ.ซม. จำนวน 10 ลบ.ซม. แล้วค่อยๆ เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น ซึ่งมีซิลเวอร์ซัลเฟตเจือปนอยู่(ละลายซิลเวอร์ซัลเฟต (Ag_2SO_4) 22 กรัมลงในกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1 ขวด ซึ่งมีน้ำหนัก 4 กิโลกรัม) จำนวน 30 ลบ.ซม. ลงไป ใส่ลูกแก้ว 5-6 เม็ดเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการเดือดอย่างรุนแรง

1.2.2 นำขวดรีฟลักซ์ต่อกับเครื่องควบแน่น ต้มที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสนาน 2 ชั่วโมง ทิ้งไว้เย็น ฉีดล้างหลอดแก้วด้วยน้ำกลั่นก่อนที่นำออกจากเครื่องควบแน่น

1.2.3 ทำส่วนผสมให้เจือจางด้วยน้ำกลั่น จนมีปริมาตรประมาณ 150 ลบ.ซม. ทำให้เย็นลงเท่ากับอุณหภูมิห้อง แล้วไตเตรตหาปริมาณไดโครเมตที่มากเกินพอด้วยสารละลายมาตรฐานไอโอดอน (II) แอมโมเนียมซัลเฟตความเข้มข้น 0.25 โมล/ลบ.ดม. โดยใช้เฟอโรอินเป็นอินดิเคเตอร์

เมื่อถึงจุดสมมูลย์สสารละลายจะเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเขียวเป็นสีน้ำตาลแดง

1.2.4 ทำแบลงค์ (Blank) โดยใช้ น้ำกลั่น 20 ลูกบาศก์กเซนติเมตรแทนน้ำหมัก และทำการวิเคราะห์กันไปกับตัวอย่าง

1.3 การคำนวณ

$$\text{ซีโอดี (มก./ลบ.ซม.)} = \frac{(A-B)M \times 8,000}{\text{ลบ.ซม. ของตัวอย่าง}}$$

A = ลบ.ซม. ของไอโอดอน (II) แอมโมเนียมซัลเฟตซึ่งใช้ไทเทรตสำหรับแบลงค์

B = ลบ.ซม. ของไอโอดอน (II) แอมโมเนียมซัลเฟตซึ่งใช้ไทเทรตสำหรับตัวอย่างน้ำ

M = โมล/ลบ.ดม. ของไอโอดอน (II) แอมโมเนียมซัลเฟต

2. เอ็มแอลวีเอสเอส (Mixed Liquor Volatile Suspended Solids, MLVSS)

เอ็มแอลวีเอสเอส คือ ปริมาณหรือความเข้มข้นโดยประมาณของจุลินทรีย์ในถังปฏิกริยามีหน่วยเป็น มก./ลบ.ดม. สามารถวิเคราะห์โดยใช้น้ำสลัดจ์หรือมิกซ์ลิเควอร์ (Mixed Liquor) ซึ่งหมายถึงของผสมระหว่างน้ำเสียกับมวลจุลินทรีย์มาวิเคราะห์ โดยมีวิธีในการวิเคราะห์ดังนี้คือ

2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

2.1.1 กระดาษกรองใยแก้ว (“ Whatman” GF/C) เส้นผ่านศูนย์กลาง 4.7 ซม.

2.1.2 กรวยบุคเนอร์ ความจุ 100 ลบ.ซม.

2.1.3 เครื่องดูดอากาศ

2.1.4 เตาอบแห้ง

2.1.5 โถทำแห้ง

2.1.6 เครื่องชั่งอย่างละเอียด

2.2 วิธีวิเคราะห์

2.2.1 ออบกระดาษกรองให้แห้งที่อุณหภูมิ 103 – 105 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในโถทำแห้ง แล้วชั่งหาน้ำหนักกระดาษกรอง สมมุติว่าเป็น A มิลลิกรัม

2.2.2 เลือกปริมาตรน้ำตัวอย่าง ซึ่งจะให้ค่าของแข็งซึ่งได้โดยประมาณอย่างน้อยที่สุด

2.5 มก. (เพิ่มจากน้ำหนักกระดาษกรอง)

2.2.3 วางกระดาษกรองลงในกรวยบุคเนอร์ ซึ่งต่อเข้ากับเครื่องดูดอากาศ

2.2.4 ใช้น้ำกลั่นฉีดกระดาษกรองให้เปียกและให้ถูกดูดติดแน่นกับกรวยบุคเนอร์

2.2.5 กรองตัวอย่างน้ำตามปริมาตรที่ต้องการโดยอาศัยแรงดูดช่วย

2.2.6 ใช้น้ำกลั่นฉีดล้างของแข็งที่ติดอยู่ข้างกรวยจนหมดและรองจนกว่าจะแห้ง

2.2.7 ปิดเครื่องดูดอากาศ ใช้ปากคีบคีบกระดาษกรองใส่กระเจกนาฬิกา

2.2.8 นำไปอบที่ตู้อบแห้งที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส จนกว่าจะแห้งใช้เวลา 1 ชั่วโมง

2.2.9 ทิ้งให้เย็นเท่าอุณหภูมิห้องในโถทำแห้ง แล้วชั่งหาน้ำหนักกระดาษกรองใหม่ สมมุติว่าเป็น B มิลลิกรัม

2.3 การคำนวณ

$$\text{ของแข็งแขวนลอย หรือ เอสเอส, มก./ ลบ.ดม.} = \frac{\text{น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น(B-A) x 1,000}}{\text{ลบ.ซม. ตัวอย่างน้ำ}}$$

3. การวิเคราะห์องค์ประกอบและปริมาณของกรดอินทรีย์ระเหย ซึ่งมีรายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้วิเคราะห์ดังนี้คือ

Shimadzu Gas Chromatography Model GC-7AG

Flame Ionization Detector(FID)

Porapak คอลัมน์ ยาว 2 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 3.3 มิลลิเมตร

อุณหภูมิคอลัมน์ 170 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิของ Injector port 240 องศาเซลเซียส

ใช้ไนโตรเจนเป็น Carrier gas ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อนาที

ปริมาตรตัวอย่างที่ฉีดเข้าเครื่อง(Injection Volume) 1 ไมโครลิตร

6. การวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซ

เก็บตัวอย่างก๊าซใส่ในถุงเก็บก๊าซขนาด 1 ลิตร หรือ 0.5 ลิตร ซึ่งใส่อากาศออกไปจนหมดแล้ว (วิธีการใส่อากาศ แสดงในภาคผนวก) จากนั้นนำตัวอย่างก๊าซไป Flow เข้าวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซ ซึ่งมีรายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้วิเคราะห์ดังนี้คือ

Perkin Elmer Gas Chromatography Auto System XL ARNEL

(Refinery Gas Analyzer)

Thermal Conductivity Detector (TCD)

อุณหภูมิคอลัมน์ 60 องศาเซลเซียส

ใช้ไนโตรเจนเป็น Carrier gas

ภาคผนวก ข
การใช้เครื่องมือ

1. การไล่อากาศออกจากถุงเก็บแก๊ส

- 1.1 เติมน้ำในถังทรงกระบอกอย่างประมาณ 2 – 3 ลิตร ใช้สูบลมอัดอากาศเข้าไปถังทรงกระบอกเพื่อดันน้ำขึ้นไปในกระบอกตรงให้เต็ม แล้วปิดวาล์วให้เรียบร้อย
- 1.2 นำถุงเก็บก๊าซที่จะใช้เก็บตัวอย่างมาต่อเข้ากับวาล์วที่มีสายยางสำหรับนำถุงเก็บแก๊สมาต่อเข้า
- 1.3 ปิดวาล์วสำหรับปรับความดันให้เรียบร้อย
- 1.4 ปิดวาล์วที่ด้านล่างของกระบอกตรงและถังทรงกระบอก จากนั้นเปิดวาล์วสำหรับปรับความดันที่ด้านบนของถังทรงกระบอก
- 1.5 อากาศที่อยู่ในถุงเก็บแก๊สจะไหลเข้าไปยังกระบอกตรงแล้วแทนที่น้ำในนั้น น้ำที่ถูกแทนที่ก็จะไหลไปยังถังทรงกระบอก รอกจนกว่าอากาศในถุงเก็บแก๊สจะหมดซึ่งสังเกตได้จากถุงเก็บแก๊สจะแนบติดกันแบนราบ
- 1.6 ปิดวาล์วสำหรับต่อกับถุงเก็บแก๊สและวาล์วที่ถุงเก็บแก๊สให้เรียบร้อยแล้วถอดถุงเก็บแก๊สออก
- 1.7 ถ้าต้องการไล่อากาศออกจากถุงเก็บแก๊สต่อไปก็ทำตามข้อ 1.1 – 1.6 ตามเดิม



ภาพประกอบ 39 แสดงการไล่อากาศออกจากถุงเก็บก๊าซ โดยใช้วิธีการแทนที่น้ำ

2. ขั้นตอนในการใช้อุปกรณ์สำหรับเก็บแก๊ส

ในการทดลองครั้งนี้ใช้อุปกรณ์สำหรับเก็บแก๊สที่ผู้วิจัยได้สร้างขึ้นมาซึ่งอุปกรณ์นี้ใช้หลักการการแทนที่น้ำ โดยมีวิธีในการใช้สำหรับการวัดปริมาตรของแก๊สที่เกิดจากการทดลองและการเก็บตัวอย่างแก๊สเพื่อนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบดังต่อไปนี้

2.1 การวัดปริมาตรของแก๊ส

2.1.1 คลายเหล็กหนีบสายยางออกแล้วเติมน้ำเข้าไปในถังทรงกระบอกด้านนอกให้เต็ม

2.1.2 หมุนเหล็กหนีบสายยางให้แน่นแล้วปิดวาล์วทุกวาล์วให้เรียบร้อย จากนั้นเปิดวาล์วด้านบนของท่อสำหรับเก็บแก๊ส

2.1.3 ใช้สับปีมอากาศเข้าไปในถังทรงกระบอกด้านนอกเพื่อดันน้ำให้ขึ้นไปยังท่อเก็บแก๊สจนเต็ม

2.1.4 นำสายยางสำหรับเป็นทางน้ำไหลออกใส่ในถังพลาสติกใสเพื่อรองรับน้ำที่ถูกแก๊สเข้าไปแทนที่

2.1.5 นำอุปกรณ์สำหรับเก็บแก๊สไปต่อกับถังปฏิกิริยา แล้วเปิดวาล์วของถังปฏิกิริยาและวาล์วของถังเก็บแก๊สที่เชื่อมต่อกันด้วยสายยางให้เรียบร้อย จากนั้นคลายสายยางที่ทางน้ำออกจากถังทรงกระบอกด้านนอก

2.1.6 นำน้ำที่อยู่ในถังพลาสติกใสซึ่งถูกแก๊สแทนที่นั้นไปวัดปริมาตรโดยใช้กระบอกตวงก็จะทราบปริมาตรของแก๊สที่เกิดขึ้นจากการทดลองได้

2.2 การเก็บตัวอย่างแก๊สเพื่อนำไปวิเคราะห์

2.2.1 หมุนเหล็กหนีบสายยางในถังทรงกระบอกด้านนอกให้แน่น จากนั้นปิดวาล์วทุกที่ของถังปฏิกิริยาและวาล์วของท่อเก็บแก๊สให้เรียบร้อย

2.2.2 นำถุงเก็บตัวอย่างแก๊สมาต่อเข้ากับวาล์วสำหรับเก็บแก๊สที่ด้านบนของท่อเก็บแก๊ส จากนั้นเปิดวาล์วของถุงเก็บแก๊สและท่อเก็บแก๊ส

2.2.3 ใช้สับปีมอากาศเข้าไปในถังทรงกระบอกด้านนอกเพื่อดันน้ำขึ้นไปในท่อเก็บแก๊ส แล้วน้ำจะไปดันแก๊สที่อยู่ในท่อเก็บแก๊สให้เข้าไปในถุงเก็บแก๊ส

2.2.4 เมื่อเก็บตัวอย่างพอแล้วปิดวาล์วที่ท่อเก็บแก๊สและที่ถุงเก็บแก๊สแล้วเปิดวาล์วที่ถังทรงกระบอกด้านนอกออกเพื่อปรับความดันโดยให้อากาศออกไป

ภาคผนวก ค
การคำนวณ

ตัวอย่างวิธีการคำนวณ

1. การคำนวณค่า F/M ratio เริ่มต้นการทดลอง

การทดลองที่ 1

ถังปฏิบัติการ 1AS

มีความเข้มข้นของน้ำแอมโมเนียเริ่มต้น 24,112 มิลลิกรัมต่อลิตร
 มีความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ เริ่มต้น 23,204 มิลลิกรัมต่อลิตร
 ดังนั้นมีค่า F/M ratio เริ่มต้นการทดลองเท่ากับ

$$\begin{aligned} \text{F/M ratio} &= \frac{24,112}{23,204} \\ &= 1.04 \end{aligned}$$

ถังปฏิบัติการ 2AS

มีความเข้มข้นของน้ำแอมโมเนียเริ่มต้น 22,228 มิลลิกรัมต่อลิตร
 มีความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ เริ่มต้น 22,393 มิลลิกรัมต่อลิตร
 ดังนั้นมีค่า F/M ratio เริ่มต้นการทดลองเท่ากับ

$$\begin{aligned} \text{F/M ratio} &= \frac{22,228}{22,393} \\ &= 0.99 \end{aligned}$$

ถังปฏิบัติการ 1UASB

มีความเข้มข้นของน้ำแอมโมเนียเริ่มต้น 24,112 มิลลิกรัมต่อลิตร
 มีความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ เริ่มต้น 24,208 มิลลิกรัมต่อลิตร
 ดังนั้นมีค่า F/M ratio เริ่มต้นการทดลองเท่ากับ

$$\begin{aligned} \text{F/M ratio} &= \frac{24,112}{24,208} \\ &= 1.00 \end{aligned}$$

ถังปฏิบัติการ 1UASB

มีความเข้มข้นของน้ำแอมโมเนียเริ่มต้น 22,228 มิลลิกรัมต่อลิตร
 มีความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ เริ่มต้น 24,462 มิลลิกรัมต่อลิตร
 ดังนั้นมีค่า F/M ratio เริ่มต้นการทดลองเท่ากับ

$$\begin{aligned} \text{F/M ratio} &= \frac{22,228}{24,462} = 0.91 \end{aligned}$$

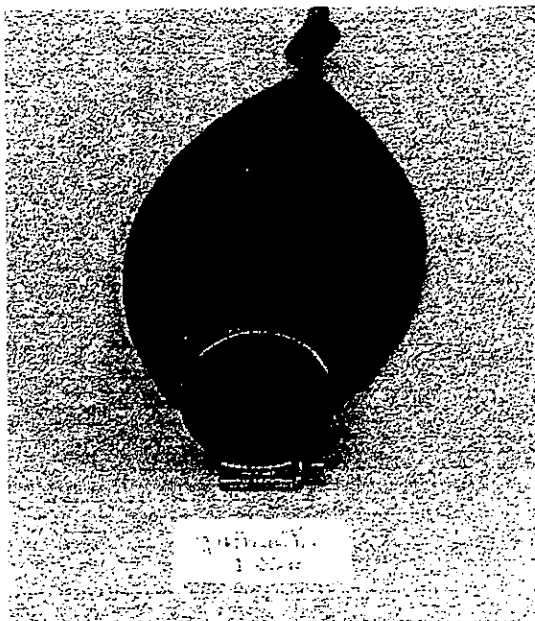
2. Hydrogen yield

การทดลองที่ 2 ถึงปฏิกิริยามีพีเอชเริ่มต้น 7 แบ่งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน			
ซีโอดีของน้ำแป้งสาลี	=	22,228	มิลลิกรัมต่อลิตร
g-COD	=	22.20	กรัมต่อลิตร
ปริมาณก๊าซชีวภาพ			
วันที่ 1	=	3,092	มิลลิลิตร
วันที่ 2	=	982	มิลลิลิตร
รวมมีก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นทั้งหมด	=	4,074	มิลลิลิตร
ร้อยละของก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซชีวภาพ			
วันที่ 1	=	56.00	
วันที่ 2	=	66.39	
ดังนั้นมีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้นวันที่ 1	=	$\frac{56.00 \times 3,092}{100}$	= 1,732 มิลลิลิตร
วันที่ 2	=	$\frac{982 \times 66.39}{100}$	= 652 มิลลิลิตร
รวมทั้ง 2 วัน มีก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้นทั้งหมด	=	1,732 + 652	= 2,384 มิลลิลิตร
คิดเป็น	=	2.38	ลิตร
ก๊าซไฮโดรเจน 1 โมล (mole) ที่ STP มีปริมาตร			
	=	22.4	ลิตร
ดังนั้นในการทดลองนี้มีไฮโดรเจนเกิดขึ้น	=	$\frac{2.38}{22.4}$	= 0.11 mole หรือ 110 m mole
แสดงว่ามีค่า Hydrogen yield			
	=	$\frac{110}{22.20}$	
	=	4.95	m mole/g-COD

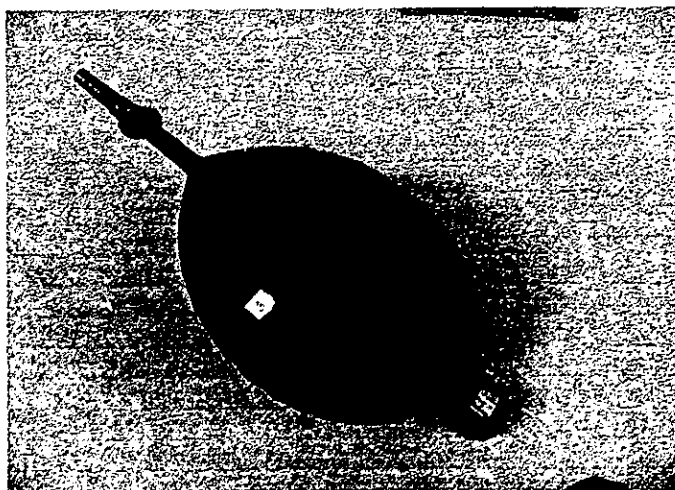
หมายเหตุ เครื่อง GC ที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซในการทดลองครั้งนี้ คำนวณร้อยละในหน่วย ปริมาตร/ปริมาตร (Volume/Volume)

ภาคผนวก ง
ภาพประกอบ

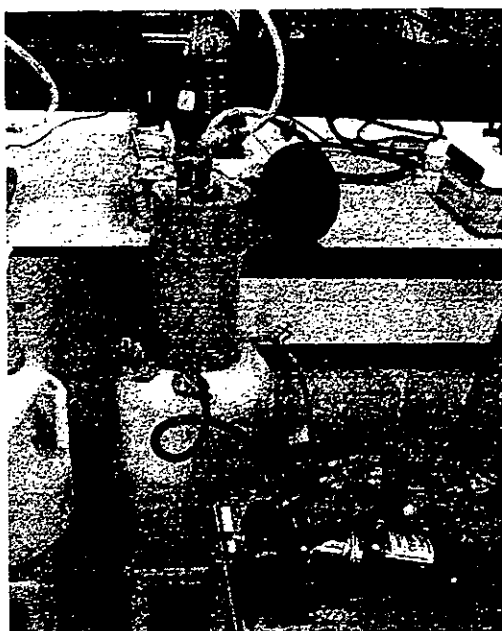
ภาพประกอบ



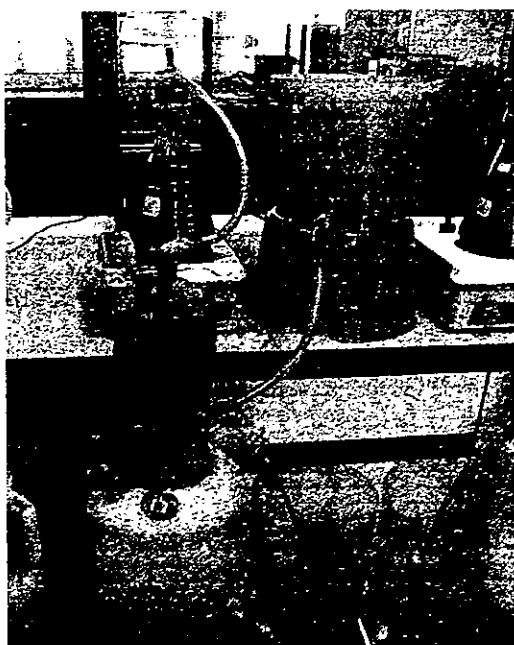
ภาพประกอบ 40 แสดงลักษณะของถุงเก็บก๊าซก่อนที่จะนำไปเก็บตัวอย่างก๊าซ



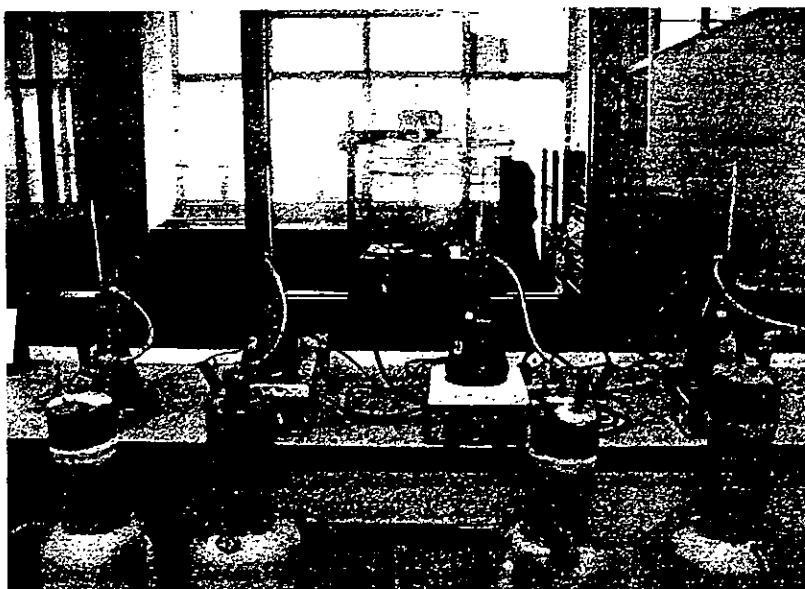
ภาพประกอบ 41 แสดงลักษณะของถุงเก็บก๊าซหลังจากที่เก็บตัวอย่างก๊าซแล้ว



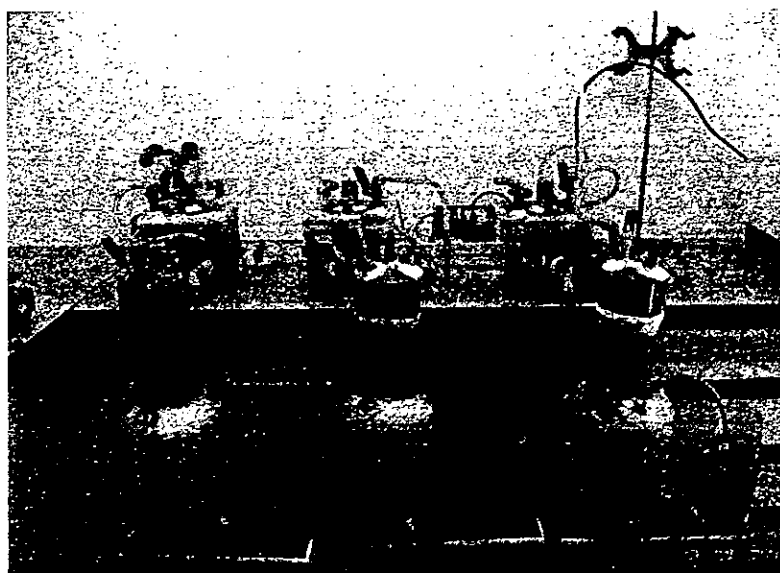
ภาพประกอบ 42 แสดงวิธีการเก็บตัวอย่างก๊าซเพื่อนำไปวิเคราะห์



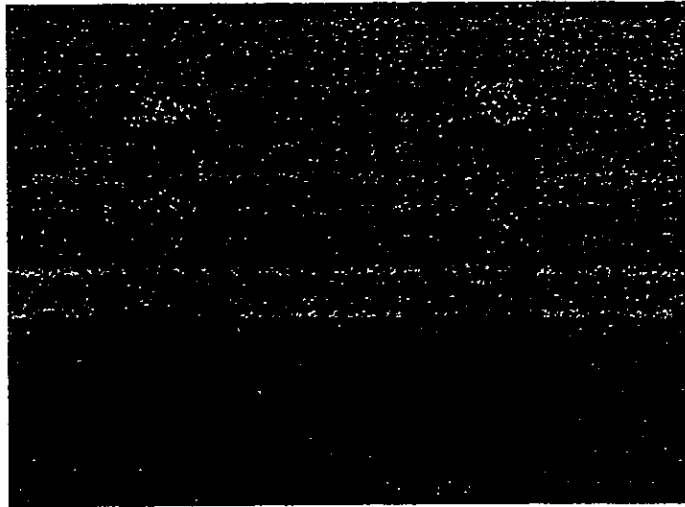
ภาพประกอบ 43 แสดงวิธีการเติมน้ำเข้าไปในถังปรับความดัน



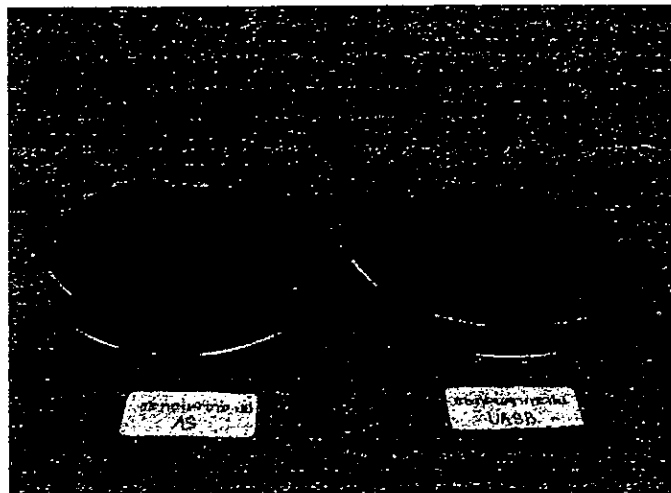
ภาพประกอบ 44 แสดงลักษณะการจัดวางถังปฏิกริยาขนาด 1 ลิตร และอุปกรณ์สำหรับเก็บก๊าซ



ภาพประกอบ 45 แสดงลักษณะการจัดวางถังปฏิกริยาขนาด 4 ลิตร และอุปกรณ์สำหรับเก็บก๊าซ



ภาพประกอบ 46 แสดงลักษณะของเชื้อจุลินทรีย์บริสุทธิ์สายพันธุ์ SWU1 (ซ้าย)
และ SWU2 (ขวา)



ภาพประกอบ 47 แสดงลักษณะของสไลด์จากถังหมักตะกอน ของโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำ
ห้วยขวาง(ซ้าย) และตะกอนชนิดเม็ดจากถังปฏิกริยาเยื่อเอเอสบี ของบริษัท
โรงเส้นไหม ขอสอง จำกัด (ขวา)

ภาคผนวก จ
ผลการทดลอง

ตาราง 7 แสดงข้อมูลค่าเอ็มแอลวีเอสเอส (MLVSS) ในถังปฏิกริยา 1AS และ 2AS (การทดลองที่ 1)

ครั้งที่	เอ็มแอลวีเอสเอส (มก./ล.)									
	ถังปฏิกริยา 1AS					ถังปฏิกริยา 2AS				
	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3
1	21,848	18,917	19,377	16,902	16,250	16,050	20,922	18,450	16,807	16,421
2	20,840	18,480	19,846	17,650	17,854	15,841	19,653	18,020	18,460	15,860
3	22,000	17,640	20,650	18,742	17,020	1,950	21,540	17,850	19,450	17,200
ค่าเฉลี่ย	21,563	18,346	19,958	17,765	17,041	16,280	20,705	18,107	18,239	16,494
									14,100	14,335

ตาราง 8 แสดงข้อมูลค่าเอ็มแอลวีเอสเอส (MLVSS) ในถังปฏิกริยา 1UASB และ 2UASB (การทดลองที่ 1)

ครั้งที่	เอ็มแอลวีเอสเอส (มก./ล.)									
	ถังปฏิกริยา 1UASB					ถังปฏิกริยา 2UASB				
	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3
1	22,766	18,092	21,756	19,340	19,275	17,050	23,045	20,240	22,093	21,229
2	21,840	19,642	20,900	18,640	18,060	16,570	23,784	21,040	21,840	20,640
3	22,952	19,961	20,640	17,900	17,642	15,900	22,640	19,984	20,640	19,780
ค่าเฉลี่ย	22,519	19,232	21,099	18,627	18,326	16,507	23,156	20,421	21,524	20,550
									17,547	17,802

ตาราง 9 แสดงข้อมูลค่าพีเอช ในถังปฏิบัติการ 1AS และ 2AS (การทดลองที่ 1)

ครั้งที่	พีเอช											
	ถังปฏิบัติการ 1AS						ถังปฏิบัติการ 2AS					
	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5
1	5.50	5.50	5.50	5.23	4.90	4.88	5.50	5.51	5.00	4.62	4.51	4.06
2	5.50	5.59	4.38	4.39	4.42	4.44	5.50	4.83	4.25	4.21	4.38	4.27
3	5.50	5.42	5.30	5.18	4.47	4.79	5.50	4.88	4.40	4.43	4.35	4.18
ค่าเฉลี่ย	5.50	5.50	5.06	4.93	4.73	4.70	5.50	5.06	4.55	4.42	4.41	4.17

ตาราง 10 แสดงข้อมูลค่าพีเอช ในถังปฏิบัติการ 1UASB และ 2UASB (การทดลองที่ 1)

ครั้งที่	พีเอช											
	ถังปฏิบัติการ 1UASB						ถังปฏิบัติการ 2UASB					
	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5
1	5.50	5.00	5.17	4.70	4.72	4.67	5.50	5.49	5.42	4.70	4.48	4.35
2	5.50	4.84	4.65	4.50	4.38	4.31	5.50	4.88	4.63	4.48	4.36	4.40
3	5.50	4.84	4.50	4.51	4.43	4.39	5.50	4.91	4.47	4.48	4.31	4.27
ค่าเฉลี่ย	5.50	4.90	4.77	4.57	4.51	4.46	5.50	5.09	4.84	4.55	4.38	4.34

ตาราง 11 แสดงข้อมูลค่าซีไอดี ในถังปฏิกริยา 1AS และ 2AS (การทดลองที่ 1)

ครั้งที่	ซีโอดี (COD)											
	ถังปฏิบัติการ 1AS						ถังปฏิบัติการ 2AS					
	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่3	วันที่ 4	วันที่ 5	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่3	วันที่ 4	วันที่ 5
1	24,112	12,400	9,900	10,950	11,300	10,750	22,228	13,900	8,800	10,000	10250	10470
2	24,112	11,970	10,901	11,200	11,860	9,800	22,228	12,650	9,702	10,922	11720	11200
3	24,112	12,800	10,200	10,020	10,600	11,500	22,228	12,800	10,200	9,850	10540	13650
ค่าเฉลี่ย	24,112	12,390	10,334	10,723	11,253	10,683	22,228	13,117	9,567	10,257	10837	11773

ตาราง 12 แสดงข้อมูลค่าซีไอดี ในถังปฏิกริยา 1 UASB และ 2 UASB (การทดลองที่ 1)

ครั้งที่	ซีไอดี											
	ถังปฏิกริยา 1UASB						ถังปฏิกริยา 2UASB					
	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่3	วันที่ 4	วันที่ 5	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่3	วันที่ 4	วันที่ 5
1	24,112	21,560	18,200	21,700	21,750	21,800	22,228	20,266	18,820	22,100	22800	22880
2	24,112	22,650	19,010	22,840	22,750	20,940	22,228	20,572	18,020	21,700	22650	21900
3	24,112	20,970	18,070	21,500	21,970	21,620	22,228	21,840	18,750	22,080	22420	22000
ค่าเฉลี่ย	24,112	21,727	18,427	22,013	22,157	21,453	22,228	20,893	18,530	21,960	22623	22260

ตาราง 13 แสดงข้อมูลปริมาณก๊าซชีวภาพ ในถังปฏิกริยา 1AS และ 2AS (การทดลองที่ 1)

ครั้งที่	ก๊าซชีวภาพ (มล.)									
	ถังปฏิกริยา 1AS					ถังปฏิกริยา 2AS				
	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3
1	-	860	1,360	1598	1,928	22	-	2,295	918	396
2	-	1,220	462	257	1,320	35	-	2,000	18443	188
3	-	509	2,550	400	1,132	15	-	1,456	1,258	300
ค่าเฉลี่ย	-	863.00	1,457.33	751.67	1,460	24.00	-	1,917.00	1,206.33	294.67
										293.00
										29.00

ตาราง 14 แสดงข้อมูลค่าปริมาณก๊าซชีวภาพ ในถังปฏิกริยา 1 UASB และ 2 UASB (การทดลองที่ 1)

ครั้งที่	ก๊าซชีวภาพ (มล.)									
	ถังปฏิกริยา 1UASB					ถังปฏิกริยา 2UASB				
	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3
1	-	2638	912	820	103	26	-	2334	1950	704
2	-	2009	1845	1159	320	65	-	2004	1985	826
3	-	2015	970	976	455	57	-	1868	1754	627
ค่าเฉลี่ย	-	2220.67	1242.33	985.00	292.67	49.33	-	2068.67	1896.33	719.00
										240.00
										62.00

ตาราง 15 แสดงข้อมูลค่าร้อยละของก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซชีวภาพ ในถังปฏิกริยา 1AS และ 2AS (การทดลองที่ 1)

ร้อยละของก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซชีวภาพ												
ครั้งที่	ถังปฏิกริยา 1AS					ถังปฏิกริยา 2AS						
	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่3	วันที่ 4	วันที่ 5	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่3	วันที่ 4	วันที่ 5
1	-	25.75	6.09	3.39	0	-	-	65.02	64.18	18.43	0	-
2	-	18.10	52.18	0	0	-	-	52.92	58.41	20.30	7.00	-
3	-	22.32	6.15	5.80	0	-	-	60.05	62.08	38.21	2.10	-
ค่าเฉลี่ย	-	22.06	21.47	3.06	0	-	-	59.33	61.56	25.65	4.55	-

หมายเหตุ - หมายถึงไม่ได้ทำการวัดเนื่องจากไม่สามารถเก็บตัวอย่างก๊าซได้เพราะมีปริมาณก๊าซชีวภาพน้อยมาก

ตาราง 16 แสดงข้อมูลค่าร้อยละของก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซชีวภาพ ในถังปฏิกริยา 1 UASB และ 2 UASB (การทดลองที่ 1)

ร้อยละของก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซชีวภาพ												
ครั้งที่	ถังปฏิบัติการ 1UASB					ถังปฏิบัติการ 2UASB						
	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5
1	-	66.06	62.54	61.93	60.03	-	-	61.57	60.99	61.70	60.25	-
2	-	53.01	56.01	55.80	60.25	-	-	52.73	55.04	54.30	60.03	-
3	-	61.38	61.31	62.10	60.53	-	-	62.10	60.92	63.50	61.21	-
ค่าเฉลี่ย	-	60.15	59.95	59.94	60.27	-	-	58.80	58.98	59.83	60.50	-

หมายเหตุ - หมายถึงไม่ได้ทำการวัดเนื่องจากไม่สามารถเก็บตัวอย่างก๊าซได้เพราะมีปริมาณก๊าซชีวภาพน้อยมาก

ตาราง 17 แสดงข้อมูลค่าปริมาณก๊าซไฮโดรเจน ในถังปฏิบัติการ 1AS และ 2AS (การทดลองที่ 1)

ครั้งที่	ก๊าซไฮโดรเจน (มล.)											
	ถังปฏิบัติการ 1AS						ถังปฏิบัติการ 2AS					
	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5
1	-	221.45	82.82	54.17	0	-	-	1,492.21	589.17	72.98	0	-
2	-	221.18	241.07	0	0	-	-	1,058.40	842.86	38.16	21.98	-
3	-	413.61	156.83	23.20	0	-	-	874.33	780.97	114.63	0	-
ค่าเฉลี่ย	-	285.41	160.24	38.69	0	-	-	1,141.44	737.67	75.26	21.98	-

ตาราง 18 แสดงข้อมูลค่าปริมาณก๊าซไฮโดรเจน ในถังปฏิบัติการ 1 UASB และ 2 UASB (การทดลองที่ 1)

ครั้งที่	ก๊าซไฮโดรเจน (มล.)											
	ถังปฏิบัติการ 1UASB						ถังปฏิบัติการ 2UASB					
	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5
1	-	1742.86	570.36	507.83	61.83	-	-	1437.21	1189.31	434.37	123.51	-
2	-	1064.97	1033.38	646.72	192.80	-	-	1056.71	654.60	448.52	120.06	-
3	-	1236.81	594.70	606.10	274.14	-	-	1160.03	1068.54	398.15	189.09	-
ค่าเฉลี่ย	-	1348.15	729.48	586.88	176.26	-	-	1217.91	970.81	427.01	144.22	-

ตาราง 19 แสดงข้อมูลค่าเอ็มแอลวีเอสเอส ในถังปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 4 5 6 และ 7 แบ่งข้าเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน (การทดลองที่ 2)

เอ็มแอลวีเอสเอส (มก./ล.)												
ครั้งที่	ถังปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 4			ถังปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 5			ถังปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 6			ถังปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 7		
	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2
1	22,350	21,000	21,720	22,440	17,750	18,160	23,750	14,980	14,800	21,923	15,080	14,080
2	23,650	22,480	21,010	20,460	15,720	17,500	22,450	15,880	16,400	19,765	13,800	12,860
3	22,480	20,640	19,080	23,640	16,890	17,640	22,790	15,600	17,020	23,760	14,900	13,980
ค่าเฉลี่ย	22,827	21,373	20,037	22,180	16,787	17,767	22,997	15,487	16,073	21,816	14,593	13,640

ตาราง 20 แสดงข้อมูลค่าพีเอชในถังปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 4 5 6 และ 7 แบ่งข้าเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน (การทดลองที่ 2)

พีเอช												
ครั้งที่	ถังปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 4		ถังปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 5		ถังปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 6		ถังปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 7					
	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2
1	4.00	5.47	5.34	5.00	4.71	4.39	6.00	4.59	4.40	7.00	4.69	4.47
2	4.00	5.32	5.56	5.00	4.56	4.42	6.00	4.60	4.38	7.00	4.67	4.38
3	4.00	5.42	5.40	5.00	4.60	4.43	6.00	4.61	4.41	7.00	4.67	4.41
ค่าเฉลี่ย	4.00	5.40	5.43	5.00	4.62	4.41	6.00	4.60	4.40	7.00	4.68	4.50

ตาราง 21 แสดงข้อมูลค่าซีไอดี ในถึงปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 4 5 6 และ 7 แบ่งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน (การทดลองที่ 2)

เอ็มแอลวีเอสเอส (มก./ล.)											
ครั้งที่	ถึงปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 4		ถึงปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 5		ถึงปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 6		ถึงปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 7				
	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2	เริ่มต้น	วันที่ 1
1	22,228	10,680	11,020	22,228	11,750	12,850	22,228	13,020	12,430	22,228	13,010
2	22,228	12,080	11,570	22,228	11,660	11,220	22,228	11,910	12,020	22,228	12,920
3	22,228	11,950	12,640	22,228	10,980	10,200	22,228	12,010	12,340	22,228	14,060
ค่าเฉลี่ย	22,228	11,570	11,743	22,228	11,463	11,423	22,228	12,313	12,263	22,228	13,330
											13,927

ตาราง 22 แสดงข้อมูลปริมาณก๊าซชีวภาพ ในถึงปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 4 5 6 และ 7 แบ่งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน (การทดลองที่ 2)

ปริมาณก๊าซชีวภาพ (มล.)											
ครั้งที่	ถึงปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 4		ถึงปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 5		ถึงปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 6		ถึงปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 7				
	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2	เริ่มต้น	วันที่ 1
1	-	94	191	-	788	1,993	-	4,320	1,075	-	3,092
2	-	110	28	-	1,600	1,360	-	1,896	1,482	-	1,624
3	-	130	90	-	650	1,260	-	1,730	1,450	-	1,870
ค่าเฉลี่ย	-	111.33	104	-	1,012.67	1,537.67	-	2,648.67	1,335.67	-	2,195.33
											1,330.67

ตาราง 23 แสดงข้อมูลค่าร้อยละของก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซชีวภาพ ในถังปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 4 5 6 และ 7 แบ่งขั้วเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน (การทดลองที่ 2)

ร้อยละของก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซชีวภาพ												
ครั้งที่	ถังปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 4		ถังปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 5		ถังปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 6		ถังปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 7					
	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2
1	-	0.51	0.00	-	39.37	61.55	-	36.00	65.05	-	56.00	66.39
2	-	0.00	0.00	-	7.09	63.00	-	55.12	64.18	-	55.93	60.20
3	-	0.00	0.00	-	25.30	62.40	-	48.60	60.50	-	57.02	62.00
ค่าเฉลี่ย	-	0.17	0.00	-	23.92	62.32	-	46.57	63.24	-	56.32	62.86

ตาราง 24 แสดงข้อมูลปริมาณก๊าซไฮโดรเจน ในถังปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 4 5 6 และ 7 แบ่งขั้วเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน (การทดลองที่ 2)

ครั้งที่	ปริมาณก๊าซไฮโดรเจน											
	ถังปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 4		ถังปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 5		ถังปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 6		ถังปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 7					
	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2
1	-	0.48	0.00	-	310.00	1,227	-	1,600.00	699.00	-	1,734.00	652.00
2	-	0.00	0.00	-	113.00	857	-	1,045.00	951.00	-	908.00	903.00
3	-	0.00	0.00	-	164.45	786	-	841.00	877.25	-	1,066.00	936.20
ค่าเฉลี่ย	-	0.16	0.00	-	195.67	956.67	-	1,162.00	842.33	-	1,236.00	830.00

ตาราง 25 แสดงข้อมูลค่า F/M ratio ในถังปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 4 5 6 และ 7 แบ่งเข้าเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน (การทดลองที่ 2)

F/M ratio												
ครั้งที่	ถังปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 4			ถังปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 5			ถังปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 6			ถังปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 7		
	COD (มก./ล.)	MLVSS (มก./ล.)	F/M ratio	COD (มก./ล.)	MLVSS (มก./ล.)	F/M ratio	COD (มก./ล.)	MLVSS (มก./ล.)	F/M ratio	COD (มก./ล.)	MLVSS (มก./ล.)	F/M ratio
1	22,228	22,340	0.99	22,228	22,440	0.99	22,228	23,750	0.94	22,228	21,923	1.01
2	22,228	23,650	0.94	22,228	20,460	1.09	22,228	22,450	0.99	22,228	19,765	1.12
3	22,228	22,480	0.99	22,228	23,640	0.94	22,228	22,790	0.98	22,228	23,760	0.94
ค่าเฉลี่ย	22,228	22,827	0.97	22,228	22,180	1.00	22,228	22,997	0.97	22,228	21,816	1.02
หมายเหตุ	COD หมายถึง ค่าซีโอดีเริ่มต้นของแบ่งเข้าเจ้าในการหมัก											
MLVSS	ค่าเอ็มแอลวีเอสเริ่มต้นในการหมักของตะกอนจุลินทรีย์จากถังหมักตะกอนของระบบบำบัดน้ำเสียแบบ AS											

ตาราง 26 แสดงข้อมูลค่า Hydrogen yield ในถังปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 4 5 6 และ 7 แบ่งเข้าเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน (การทดลองที่ 2)

ครั้งที่	Hydrogen yield (m mole/g-COD)											
	ถังปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 4			ถังปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 5			ถังปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 6			ถังปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 7		
	g-COD	H ₂ (mL)	yield	g-COD	H ₂ (mL)	yield	g-COD	H ₂ (mL)	yield	g-COD	H ₂ (mL)	yield
1	22.2	0.48	0	22.2	1,537.00	3.09	22.2	2,299.00	4.62	22.2	2,386.00	4.80
2	22.2	0.00	0	22.2	970.00	1.95	22.2	1,996.00	4.01	22.2	1,811.00	3.64
3	22.2	0.00	0	22.2	950.45	1.91	22.2	1,718.25	3.46	22.2	2,002.20	4.03
ค่าเฉลี่ย	22.2	0.16	0	22.2	1,152.48	2.32	22.2	2,004.42	4.03	22.2	2,066.40	4.16
หมายเหตุ	yield หมายถึง Hydrogen yield คือความสามารถในการเปลี่ยนแป้งไปเป็นก๊าซไฮโดรเจน มีหน่วยเป็น m mole/g-COD											

ตาราง 27 แสดงข้อมูลค่าเอ็มแอลวีเอสเอส ในถังปฏิกริยาพีเอสเริ่มต้น 4 5 6 และ 7

เอ็มแอลวีเอสเอส (มก./ล.)										
ครั้งที่	ถังปฏิกริยาพีเอสเริ่มต้น 4		ถังปฏิกริยาพีเอสเริ่มต้น 5		ถังปฏิกริยาพีเอสเริ่มต้น 6		ถังปฏิกริยาพีเอสเริ่มต้น 7			
	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 2
1	23440	20033	20060	23321	20960	20010	22600	17600	17960	22400
2	22400	21840	20020	22980	20040	19010	23090	18020	18650	22090
3	22850	19610	19005	23010	19480	20090	22780	17950	18780	22980
ค่าเฉลี่ย	22897	20494	19778	23104	20160	19703	22823	17857	18463	22490
										15807
										14385

ตาราง 28 แสดงข้อมูลค่าพีเอสในถังปฏิกริยาพีเอสเริ่มต้น 4 5 6 และ 7 แบ่งเป็นสามปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอน (การทดลองที่ 2)

พีเอส										
ครั้งที่	ถังปฏิกริยาพีเอสเริ่มต้น 4		ถังปฏิกริยาพีเอสเริ่มต้น 5		ถังปฏิกริยาพีเอสเริ่มต้น 6		ถังปฏิกริยาพีเอสเริ่มต้น 7			
	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 2
1	4.00	5.29	5.33	5.00	5.01	4.61	6.00	4.89	4.51	7.00
2	4.00	5.15	5.21	5.00	4.99	5.01	6.00	4.75	4.50	7.00
3	4.00	5.08	5.17	5.00	5.02	4.98	6.00	4.82	4.49	7.00
ค่าเฉลี่ย	4.00	5.17	5.24	5.00	5.01	4.87	6.00	4.82	4.50	7.00
										4.84
										4.56

ตาราง 29 แสดงข้อมูลค่าไฮโดร ในถังปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 4 5 6 และ 7 แบ่งเข้าเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน (การทดลองที่ 2)

เอ็มแอลวีเอสเอส (มก./ล.)												
ครั้งที่	ถังปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 4		ถังปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 5		ถังปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 6		ถังปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 7					
	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2
1	24,112	11,262	11,050	24,112	12,320	12,190	24,112	13,812	13,120	24,112	13,980	13,260
2	24,112	12,080	11,870	24,112	12,960	11,690	24,112	12,920	12,150	24,112	13,450	12,680
3	24,112	11,840	10,930	24,112	11,920	11,210	24,112	12,340	12,020	24,112	12,970	12,990
ค่าเฉลี่ย	24,112	11,727	11,283	24,112	12,400	11,283	24,112	13,024	12,430	24,112	13,467	12,977

ตาราง 30 แสดงข้อมูลปริมาณก๊าซชีวภาพ ในถังปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 4 5 6 และ 7 แบ่งมันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอน (การทดลองที่ 2)

ปริมาณก๊าซชีวภาพ (มล.)												
ครั้งที่	ถังปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 4		ถังปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 5		ถังปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 6		ถังปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 7					
	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2
1	-	2,400	0	-	800	205	-	1,792	1,738	-	2,802	1,396
2	-	1,850	0	-	250	119	-	1,520	1,650	-	2,260	1,240
3	-	1,980	0	-	570	302	-	1,610	1,580	-	1,970	1,120
ค่าเฉลี่ย	-	2,077.00	0	-	540.00	208.67	-	1,641.00	1,656	-	2,344.00	1,252.00

ตาราง 31 แสดงข้อมูลค่าร้อยละของก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซชีวภาพ ในถึงปฏิกิริยาพีเอชเริ่มต้น 4 5 6 และ 7 แบ่งมันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอน (การทดลองที่ 2)

ร้อยละของก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซชีวภาพ										
ครั้งที่	ถึงปฏิกิริยาพีเอชเริ่มต้น 4		ถึงปฏิกิริยาพีเอชเริ่มต้น 5		ถึงปฏิกิริยาพีเอชเริ่มต้น 6		ถึงปฏิกิริยาพีเอชเริ่มต้น 7			
	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 1
1	-	0	0	-	7.06	7.52	-	42.00	43.60	-
2	-	0	0	-	49.22	8.13	-	48.02	51.30	-
3	-	0	0	-	5.50	5.08	-	40.65	52.60	-
ค่าเฉลี่ย	-	0	0	-	20.59	6.91	-	44.09	50.97	-

ตาราง 32 แสดงข้อมูลปริมาณก๊าซไฮโดรเจน ในถึงปฏิกิริยาพีเอชเริ่มต้น 4 5 6 และ 7 แบ่งมันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอน (การทดลองที่ 2)

ปริมาณก๊าซไฮโดรเจน (มล.)										
ครั้งที่	ถึงปฏิกิริยาพีเอชเริ่มต้น 4		ถึงปฏิกิริยาพีเอชเริ่มต้น 5		ถึงปฏิกิริยาพีเอชเริ่มต้น 6		ถึงปฏิกิริยาพีเอชเริ่มต้น 7			
	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 1
1	-	0	0	-	56.00	15.41	-	781.31	851.97	-
2	-	0	0	-	123.00	15.42	-	729.90	846.45	-
3	-	0	0	-	31.00	9.89	-	654.46	813.08	-
ค่าเฉลี่ย	-	0	0	-	70.00	13.57	-	721.66	837.17	-

ตาราง 33 แสดงข้อมูลค่า F/M ratio ในถังปฏิกริยาฟิเอชเริ่มต้น 4 5 6 และ 7 แบ่งมันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอน (การทดลองที่ 2)

F/M ratio											
ครั้งที่	ถังปฏิกริยาฟิเอชเริ่มต้น 4			ถังปฏิกริยาฟิเอชเริ่มต้น 5			ถังปฏิกริยาฟิเอชเริ่มต้น 6			ถังปฏิกริยาฟิเอชเริ่มต้น 7	
	COD (มก./ล.)	MLVSS (มก./ล.)	F/M ratio	COD (มก./ล.)	MLVSS (มก./ล.)	F/M ratio	COD (มก./ล.)	MLVSS (มก./ล.)	F/M ratio	COD (มก./ล.)	MLVSS (มก./ล.)
1	24,112	23,440	1.03	24,112	23,321	1.04	24,112	22,600	1.07	24,112	22,400
2	24,112	22,400	1.08	24,112	22,980	1.05	24,112	23,090	1.04	24,112	22,090
3	24,112	22,850	1.06	24,112	23,010	1.05	24,112	22,780	1.06	24,112	22,980
ค่าเฉลี่ย	24,112	22,897	1.06	24,112	23,104	1.05	24,112	22,823	1.06	24,112	22,480

หมายเหตุ COD หมายถึง ค่าซีโอดีเริ่มต้นของแป้งมันสำปะหลังในการหมัก

MLVSS หมายถึง ค่าเอ็มแอลวีเอสเอสเริ่มต้นในการหมักของตะกอนจุลินทรีย์จากถังหมักตะกอนของระบบบำบัดน้ำเสียแบบ AS

ตาราง 34 แสดงข้อมูลค่า Hydrogen yield ในถังปฏิกริยาฟิเอชเริ่มต้น 4 5 6 และ 7 แบ่งมันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอน (การทดลองที่ 2)

Hydrogen yield (mM/g-COD)											
ครั้งที่	ถังปฏิกริยาฟิเอชเริ่มต้น 4			ถังปฏิกริยาฟิเอชเริ่มต้น 5			ถังปฏิกริยาฟิเอชเริ่มต้น 6			ถังปฏิกริยาฟิเอชเริ่มต้น 7	
	g-COD	H ₂ (mL)	yield	g-COD	H ₂ (mL)	yield	g-COD	H ₂ (mL)	yield	g-COD	H ₂ (mL)
1	24.1	0	0	24.1	71.41	0	24.1	1,633.28	3.03	24.1	2,207.00
2	24.1	0	0	24.1	138.42	0.26	24.1	1,576.35	2.92	24.1	1,765.65
3	24.1	0	0	24.1	40.89	0.08	24.1	1,467.54	2.72	24.1	1,688.96
ค่าเฉลี่ย	24.1	0	0	24.1	83.57	0.17	24.1	1,559.06	2.89	24.1	1,887.20

หมายเหตุ yield หมายถึง Hydrogen yield คือความสามารถในการเปลี่ยนแป้งไปเป็นก๊าซไฮโดรเจน มีหน่วยเป็น mM/g-COD

ตาราง 35 แสดงข้อมูลค่าความเข้มข้นของสารตัวกลาง ในถึงปฏิริยาที่เอชเริ่มต้น 4 5 6 และ 7 แป้งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน (การทดลองที่ 2 และ3)

ชนิดของแหล่งคาร์บอน	ความเข้มข้นของสารตัวกลาง (ร้อยละ)											
	ถึงปฏิริยาที่เอชเริ่มต้น 4			ถึงปฏิริยาที่เอชเริ่มต้น 5			ถึงปฏิริยาที่เอชเริ่มต้น 6			ถึงปฏิริยาที่เอชเริ่มต้น 7		
	AA	BA	PA	ET	AA	BA	PA	ET	AA	BA	PA	ET
แป้งข้าวเจ้า	29.36	21.11	-	1.46	24.37	58.25	1.58	9.83	18.27	65.57	0.69	7.89
แป้งมันสำปะหลัง	29.33	34.61	-	0.31	15.77	41.73	-	28.56	15.10	49.45	-	31.69
หมายเหตุ	AA หมายถึง กรดอะซิดิก			BA หมายถึง กรดบิวทริก								
	PA หมายถึง กรดไพรฟอนิก			ET หมายถึง เอทานอล								

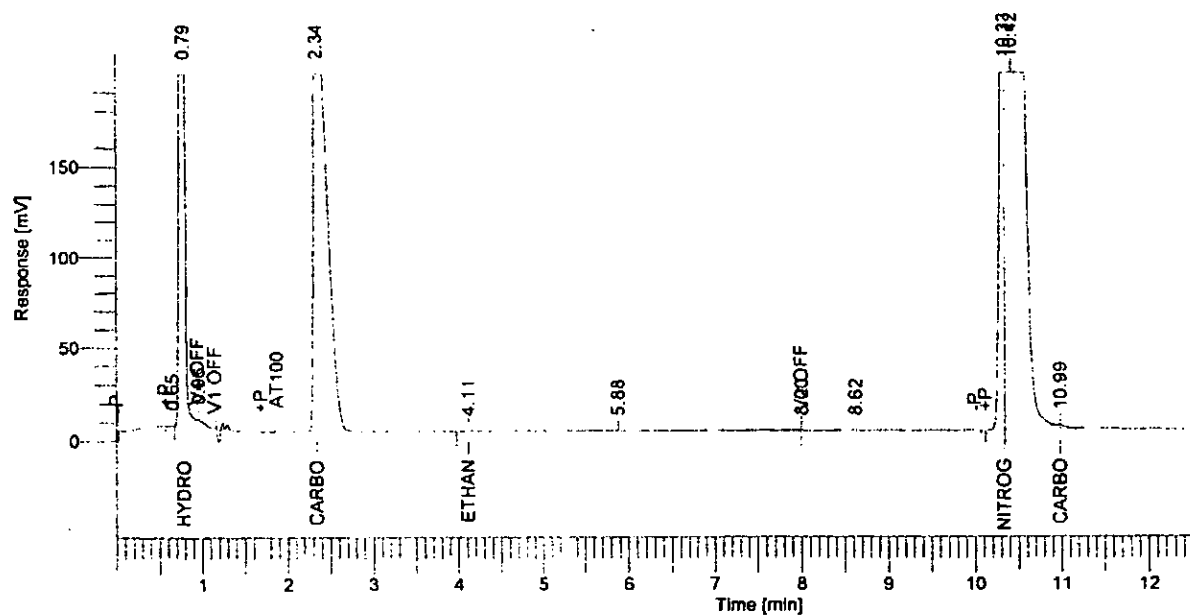
ตาราง 36 แสดงข้อมูลค่าความเข้มข้นของสารตัวกลาง ในถึงปฏิริยาที่เอชเริ่มต้น 4 5 6 และ 7 แป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน (การทดลองที่ 2 และ 3)

ชนิดของแหล่งคาร์บอน	ความเข้มข้นของสารตัวกลาง ((มิลลิโมลาร์)											
	ถึงปฏิริยาที่เอชเริ่มต้น 4			ถึงปฏิริยาที่เอชเริ่มต้น 5			ถึงปฏิริยาที่เอชเริ่มต้น 6			ถึงปฏิริยาที่เอชเริ่มต้น 7		
	AA	BA	PA	ET	AA	BA	PA	ET	AA	BA	PA	ET
แป้งข้าวเจ้า	15.81	5.60	-	0.84	90.78	69.59	6.77	16.36	104.75	119.15	6.09	20.53
แป้งมันสำปะหลัง	19.84	6.93	-	1.09	28.32	24.86	-	22.68	67.03	70.09	-	65.96
หมายเหตุ	AA หมายถึง กรดอะซิดิก			BA หมายถึง กรดบิวทริก								
	PA หมายถึง กรดไพรฟอนิก			ET หมายถึง เอทานอล								

ตาราง 37 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ ในถังปฏิกรณ์ที่มีปริมาตรใช้งานจริง 4 ลิตร

ครั้งที่	MLVSS (มก./ล.)		ชีโอดี (มก./ล.)				พีเอช		พารามิเตอร์			F/M ratio	Hydrogen yield (mM/g-COD)
	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 1	วันที่ 2	biogas มล.	total hydrogen ร้อยละ	total hydrogen มล.	
1	23250	18090	15120	13060	13120	4.62	4.51	4.51	4.51	13,774	62.23	7,445	3.44
2	21710	16980	13860	12540	11820	4.65	4.52	4.52	4.52	14,460	58.32	9,762	4.52
3	22650	17730	14750	13110	12060	4.70	4.51	4.51	4.51	16,320	62.80	9,946	4.60
4	22710	17850	14650	14020	13950	4.59	4.48	4.48	4.48	14,930	61.51	6,374	2.95
5	23020	18020	14860	13210	12720	4.68	4.50	4.50	4.50	16,750	60.02	9,841	4.56
ค่าเฉลี่ย	22668	17734	14648	13188	12739	4.65	4.50	4.50	4.50	15,246.80	60.94	8,673.60	4.01

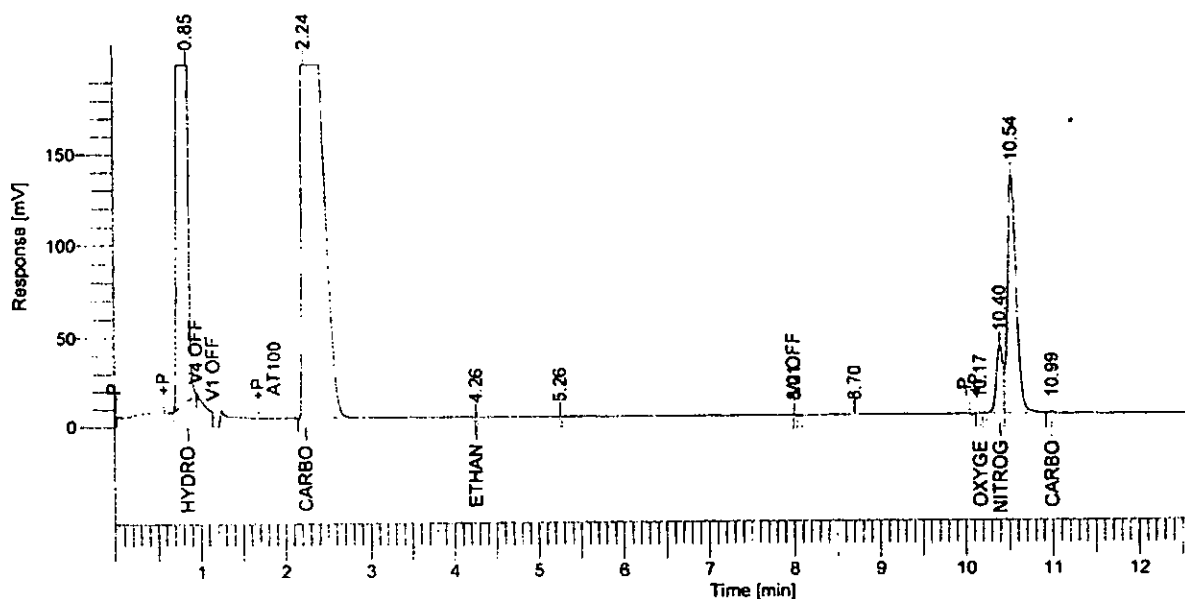
ภาคผนวก จ
ผลการวิเคราะห์ก๊าซ



Peak #	Component Name	Time [min]	Area [_V_s]	BL	Concentration
2	Hydrogen	0.79	1785719.35	BE	25.75
4	Carbon Dioxide	2.34	2613856.62	*BB	14.08
5	Ethane	4.11	468.04	*BB	0.00
9	Nitrogen	10.33	1192096.46	*BV	7.16
11	Carbon Monoxide	10.99	22560.88	*EB	0.15
			5614701.35		47.14

ภาพประกอบ 48 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซในถังปฏิกิริยา 1AS
วันที่ 1 ของการหมัก (การทดลองที่ 1)

หมายเหตุ เนื่องจากเครื่อง GC ที่ใช้ในการวิเคราะห์มีค่า Standard ของพารามิเตอร์อื่นอยู่
จึงทำให้แสดงผลออกมาด้วยด้วย

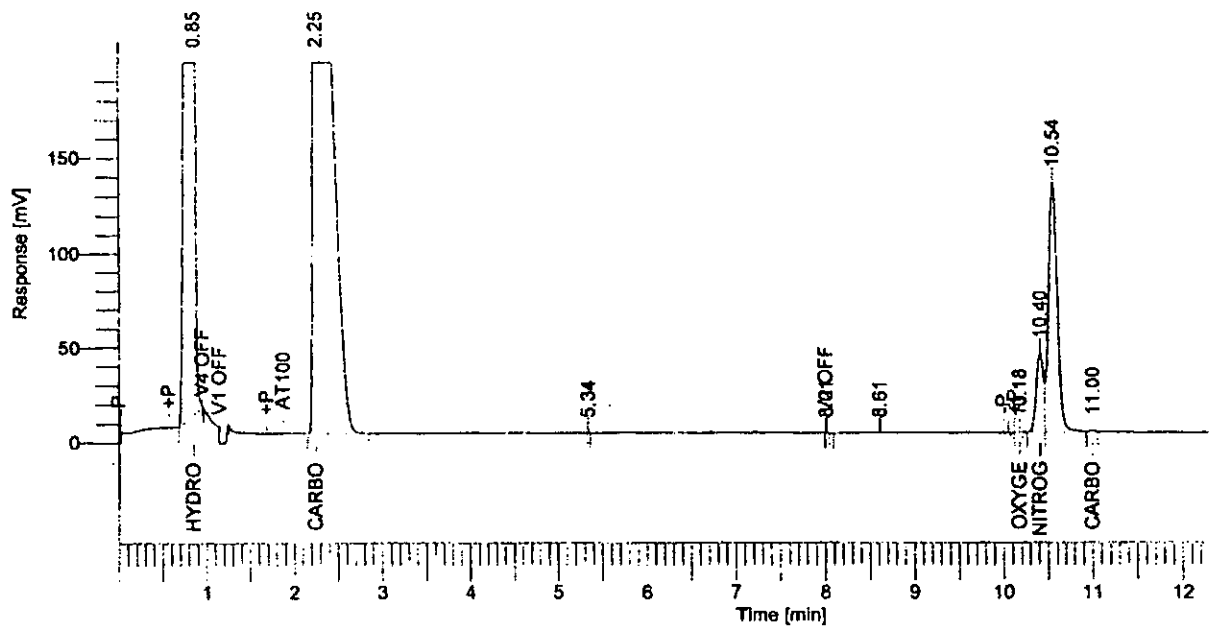


Light Gas Report					
Peak #	Component Name	Time [min]	Area [_V_s]	BL	Concentration
1	Hydrogen	0.85	4508898.05	BB	65.02
2	Carbon Dioxide	2.24	5523963.47	*BB	29.75
3	Ethane	4.26	30.49	*BB	0.00
7	Oxygen	10.17	156.59	*BB	0.00
8	Nitrogen	10.40	203839.55	*BV	1.22
10	Carbon Monoxide	10.99	3132.47	*VB	0.02
			10240020.62		96.02

ภาพประกอบ 49 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซในถังปฏิกรณ์ 2AS

วันที่ 1 ของการหมัก (การทดลองที่ 1)

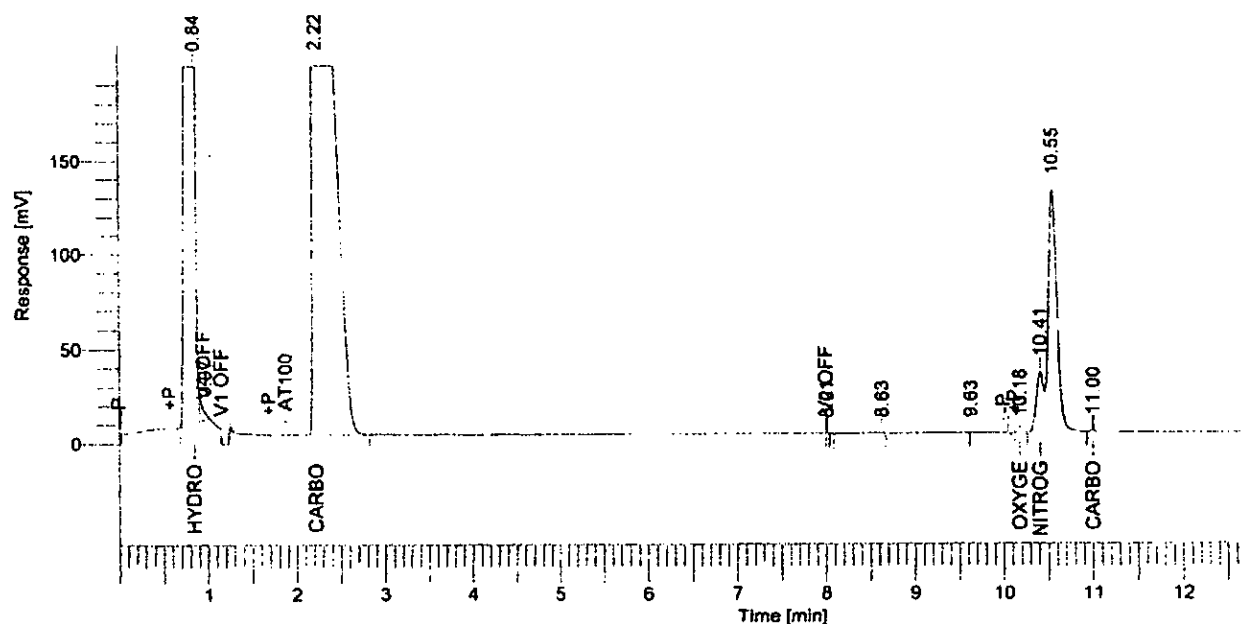
หมายเหตุ เนื่องจากเครื่อง GC ที่ใช้ในการวิเคราะห์มีค่า Standard ของพารามิเตอร์อื่นอยู่ จึงทำให้แสดงผลออกมาด้วยด้วย



Light Gas Report					
Peak #	Component Name	Time [min]	Area [_V_s]	BL	Concentration
1	Hydrogen	0.85	4581265.19	BB	66.06
2	Carbon Dioxide	2.25	5283759.79	*BB	28.46
6	Oxygen	10.18	199.26	*BB	0.00
7	Nitrogen	10.40	224998.31	*BV	1.35
9	Carbon Monoxide	11.00	2617.53	*VB	0.02
			10092840.08		95.89

ภาพประกอบ 50 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซในถังปฏิกิริยา 1UASB
วันที่ 1 ของการหมัก (การทดลองที่ 1)

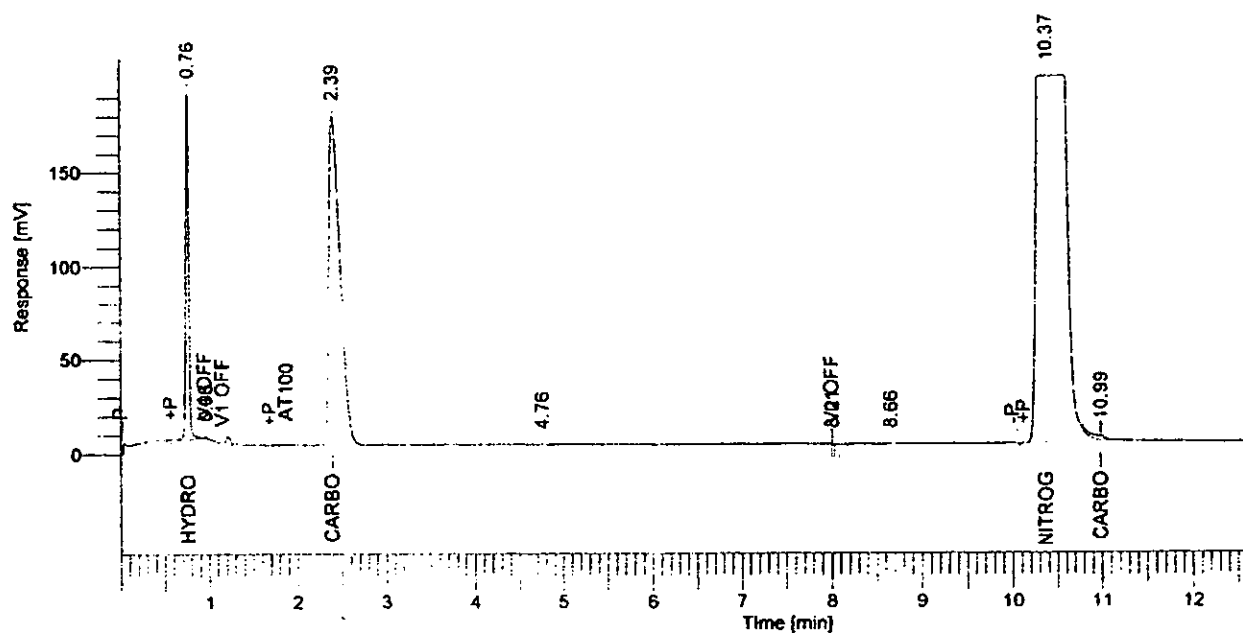
หมายเหตุ เนื่องจากเครื่อง GC ที่ใช้ในการวิเคราะห์มีค่า Standard ของพารามิเตอร์อื่นอยู่
จึงทำให้แสดงผลออกมาด้วยด้วย



Peak #	Component Name	Time [min]	Light Gas Report		
			Area [_V_s]	BL	Concentration
1	Hydrogen	0.84	4269878.07	BE	61.57
3	Carbon Dioxide	2.22	6304693.75	*BB	33.96
7	Oxygen	10.18	215.89	*BB	0.00
8	Nitrogen	10.41	167617.69	*BV	1.01
10	Carbon Monoxide	11.00	3165.95	*VB	0.02
			10745571.35		96.56

ภาพประกอบ 51 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซในถังปฏิกิริยา 2UASB
วันที่ 1 ของการหมัก (การทดลองที่ 1)

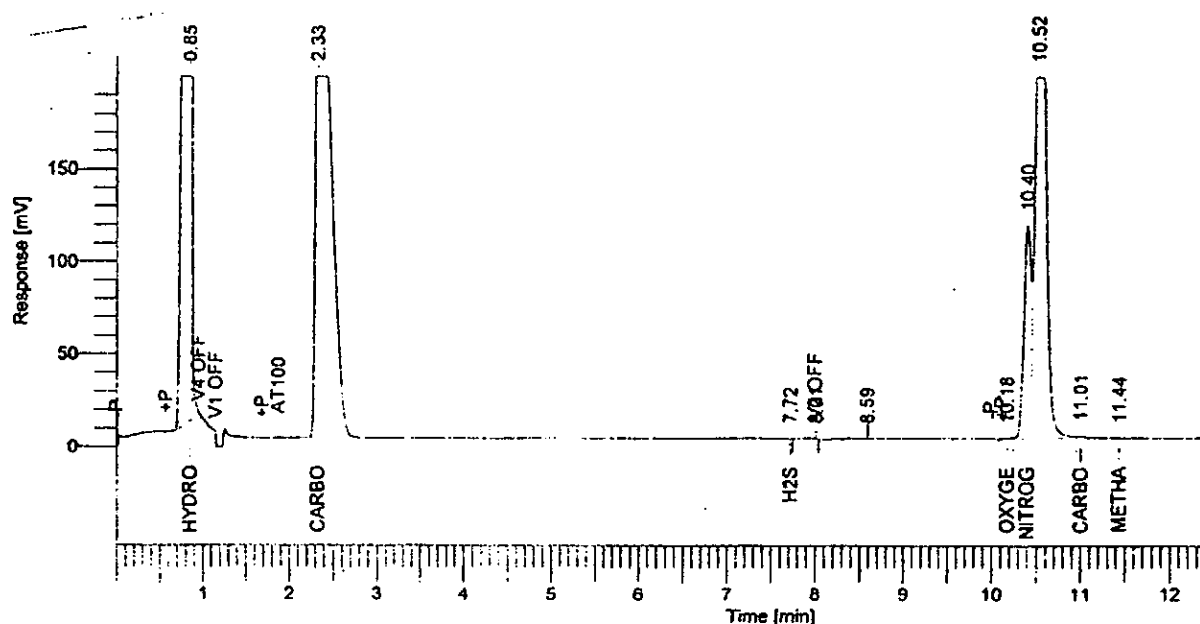
หมายเหตุ เนื่องจากเครื่อง GC ที่ใช้ในการวิเคราะห์มีค่า Standard ของพารามิเตอร์อื่นอยู่ จึงทำให้แสดงผลออกมาด้วยด้วย



Light Gas Report					
Peak #	Component Name	Time [min]	Area [_V_s]	BL	Concentration
1	Hydrogen	0.76	417067.51	BE	6.01
3	Carbon Dioxide	2.39	1530103.91	*BB	8.24
7	Nitrogen	10.37	12954226.57	*BE	77.81
8	Carbon Monoxide	10.99	37198.43	*EB	0.25
			14938596.42		92.32

ภาพประกอบ 52 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซในถังปฏิกิริยา 1AS
วันที่ 2 ของการหมัก (การทดลองที่ 1)

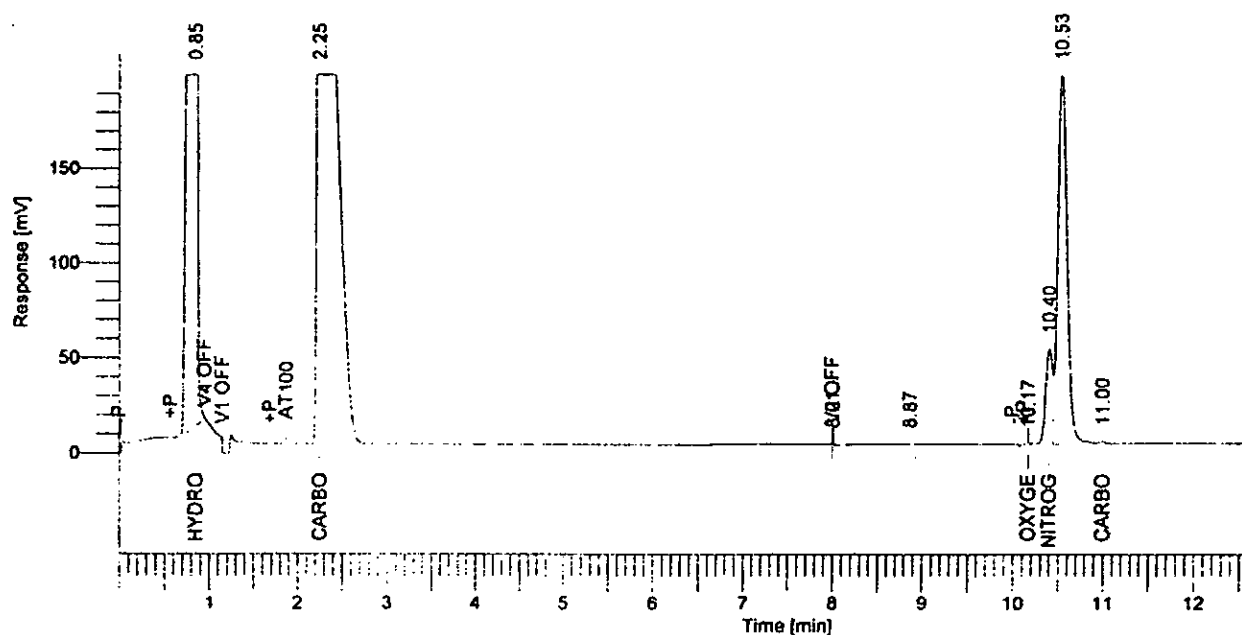
หมายเหตุ เนื่องจากเครื่อง GC ที่ใช้ในการวิเคราะห์มีค่า Standard ของพารามิเตอร์อื่นอยู่
จึงทำให้แสดงผลออกมาด้วยด้วย



Light Gas Report					
Peak #	Component Name	Time [min]	Area [_V_s]	BL	Concentration
1	Hydrogen	0.85	4450807.94	BB	64.18
2	Carbon Dioxide	2.33	3433156.23	*BB	18.49
3	H2S	7.72	27.10	*BB	0.00
6	Oxygen	10.18	493.73	*BV	0.00
7	Nitrogen	10.40	605502.96	*VV	3.64
9	Carbon Monoxide	11.01	4261.21	*VB	0.03
10	Methane	11.44	29.33	*BB	0.00
8494278.50					86.34

ภาพประกอบ 53 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซ ในถังปฏิบัติการ 2AS
วันที่ 2 ของการหมัก (การทดลองที่ 1)

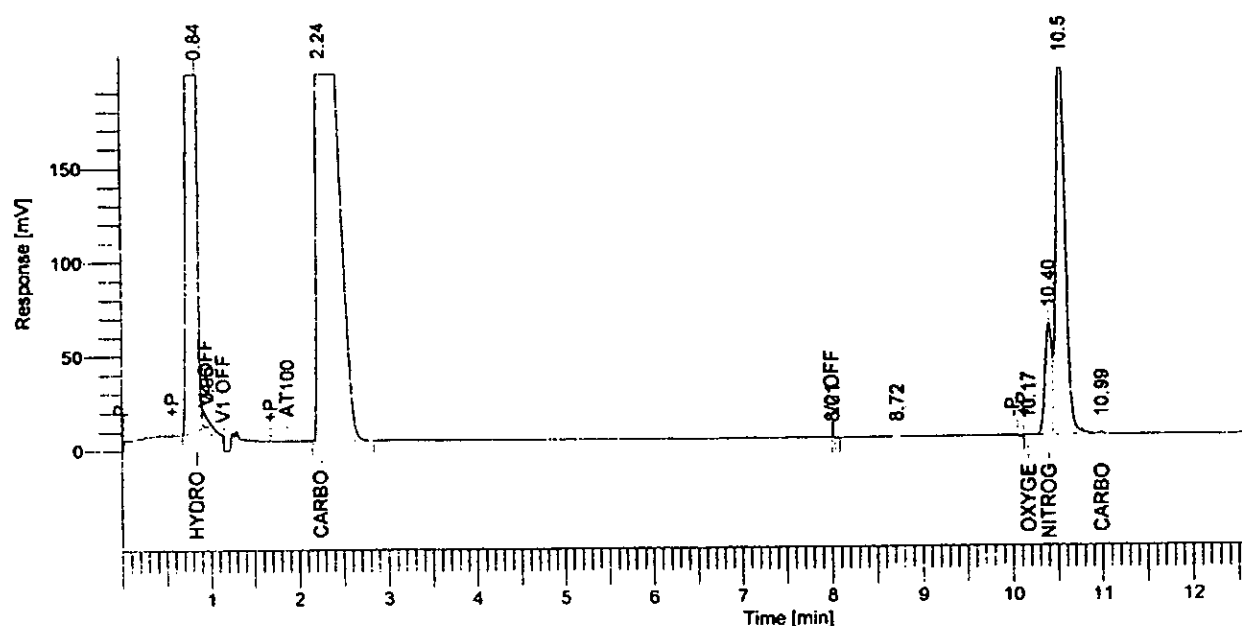
หมายเหตุ เนื่องจากเครื่อง GC ที่ใช้ในการวิเคราะห์มีค่า Standard ของพารามิเตอร์อื่นอยู่
จึงทำให้แสดงผลออกมาด้วยด้วย



Light Gas Report					
Peak #	Component Name	Time [min]	Area [_V_s]	BL	Concentration
1	Hydrogen	0.85	4336651.75	BB	62.54
2	Carbon Dioxide	2.25	5339174.84	*BB	28.76
5	Oxygen	10.17	160.21	*BB	0.00
6	Nitrogen	10.40	258476.08	*BV	1.55
8	Carbon Monoxide	11.00	3815.58	*VB	0.03
			9938278.46		92.87

ภาพประกอบ 54 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซ ในถังปฏิกริยา 1UASB
วันที่ 2 ของการหมัก (การทดลองที่ 1)

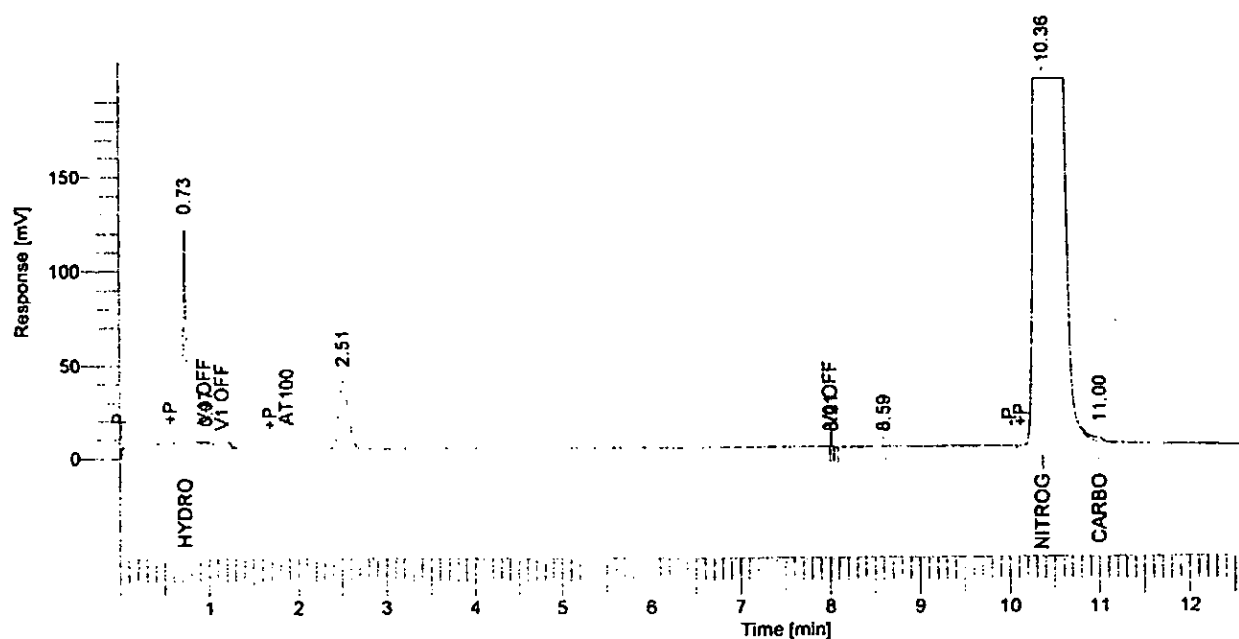
หมายเหตุ เนื่องจากเครื่อง GC ที่ใช้ในการวิเคราะห์มีค่า Standard ของพารามิเตอร์อื่นอยู่
จึงทำให้แสดงผลออกมาด้วยด้วย



Light Gas Report					
Peak #	Component Name	Time [min]	Area [_V_s]	BL	Concentration
1	Hydrogen	0.84	4229342.36	BE	60.99
3	Carbon Dioxide	2.24	5459996.62	*BB	29.41
6	Oxygen	10.17	187.61	*BB	0.00
7	Nitrogen	10.40	310318.00	*BV	1.86
9	Carbon Monoxide	10.99	3659.07	*VB	0.02
			10003503.67		92.29

ภาพประกอบ 55 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซในถังปฏิกิริยา 2UASB
วันที่ 2 ของการหมัก (การทดลองที่ 1)

หมายเหตุ เนื่องจากเครื่อง GC ที่ใช้ในการวิเคราะห์มีค่า Standard ของพารามิเตอร์อื่นอยู่
จึงทำให้แสดงผลออกมาด้วยด้วย

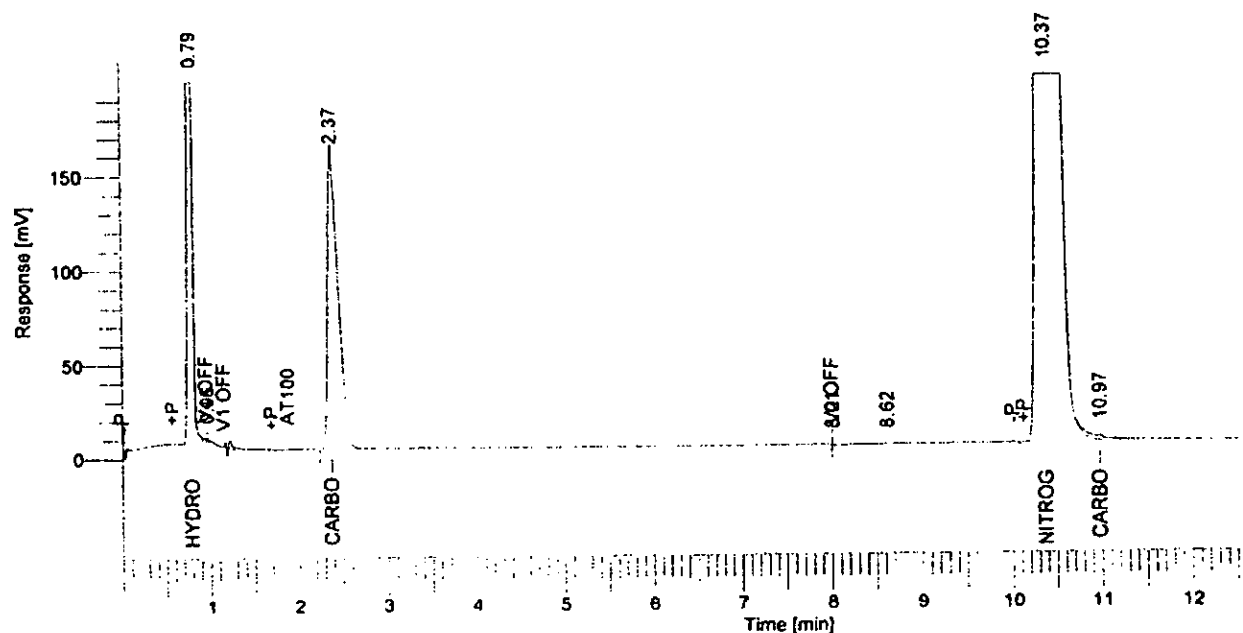


Light Gas Report					
Peak #	Component Name	Time [min]	Area [_V_s]	BL	Concentration
1	Hydrogen	0.73	234955.59	BE	3.39
6	Nitrogen	10.36	14165071.42	*BE	85.08
7	Carbon Monoxide	11.00	28883.36	*EB	0.20
			14428910.37		88.67

ภาพประกอบ 56 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซในถังปฏิกิริยา 1AS

วันที่ 3 ของการหมัก (การทดลองที่ 1)

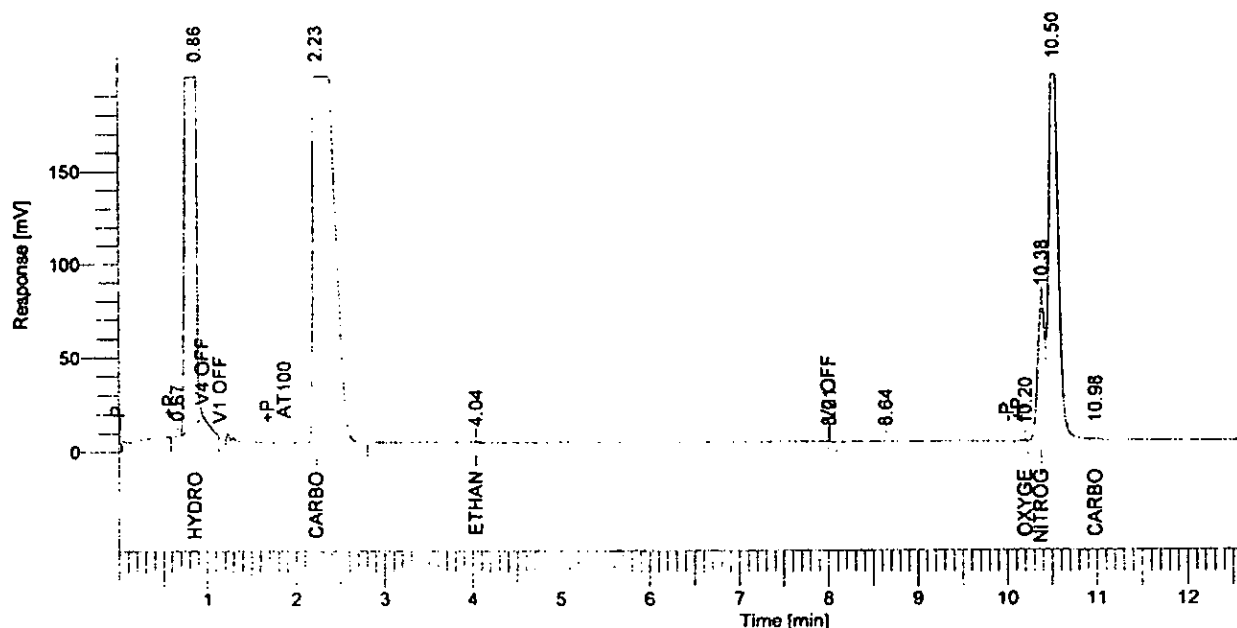
หมายเหตุ เนื่องจากเครื่อง GC ที่ใช้ในการวิเคราะห์มีค่า Standard ของพารามิเตอร์อื่นอยู่ จึงทำให้แสดงผลออกมาด้วยด้วย



Light Gas Report					
Peak #	Component Name	Time [min]	Area [_V_s]	BL	Concentration
1	Hydrogen	0.79	1277887.75	BE	18.43
3	Carbon Dioxide	2.37	1281646.55	*BB	6.90
6	Nitrogen	10.37	11530933.41	*BE	69.26
7	Carbon Monoxide	10.97	39127.36	*EB	0.27
			14129595.06		94.86

ภาพประกอบ 57 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซ ในถังปฏิกิริยา 2AS
วันที่ 3 ของการหมัก การทดลองที่ 1

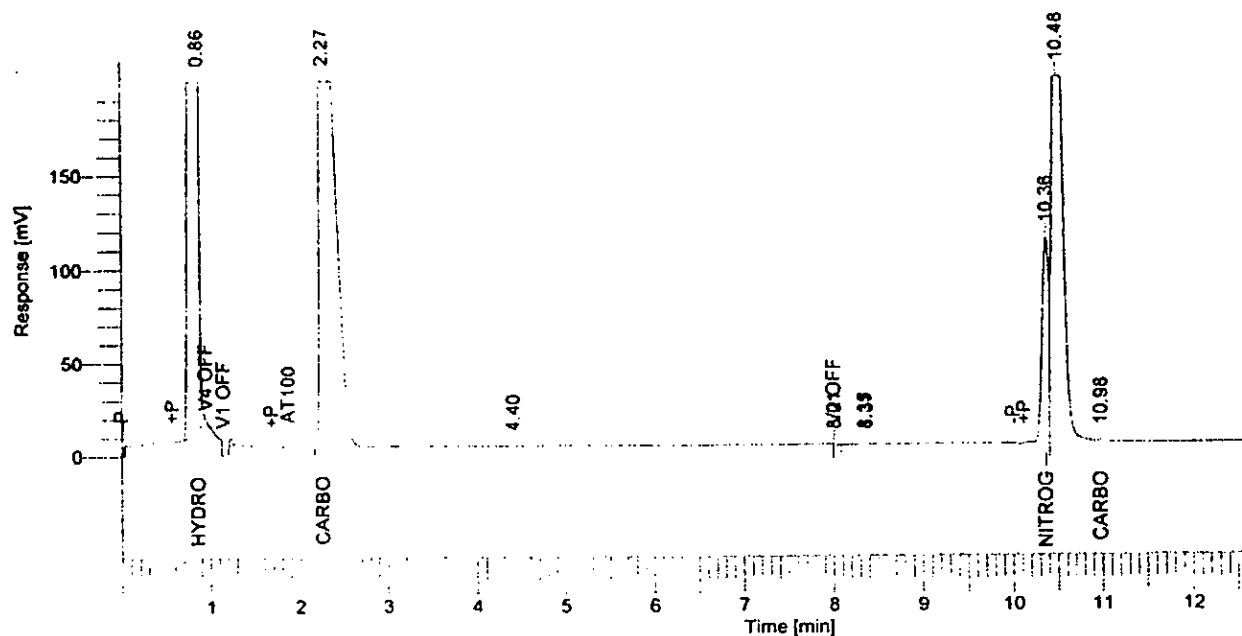
หมายเหตุ เนื่องจากเครื่อง GC ที่ใช้ในการวิเคราะห์มีค่า Standard ของพารามิเตอร์อื่นอยู่
จึงทำให้แสดงผลออกมาด้วยด้วย



Peak #	Component Name	Time [min]	Area [_V_s]	BL	Concentration
2	Hydrogen	0.86	4294713.39	BB	61.93
3	Carbon Dioxide	2.23	4711807.35	*BB	25.38
4	Ethane	4.04	1679.25	*BB	0.01
7	Oxygen	10.20	741.94	*BV	0.01
8	Nitrogen	10.38	380664.70	*VV	2.29
10	Carbon Monoxide	10.98	3871.20	*VB	0.03
			9393477.82		89.63

ภาพประกอบ 58 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซในถังปฏิกิริยา 1UASB
วันที่ 3 ของการหมัก (การทดลองที่ 1)

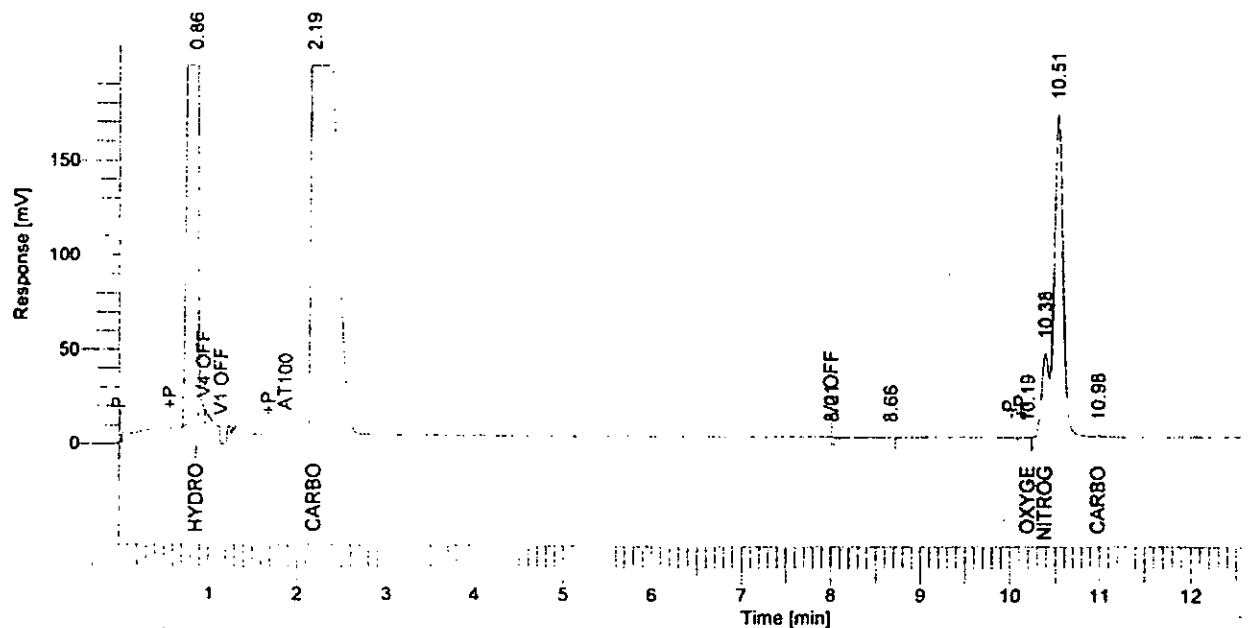
หมายเหตุ เนื่องจากเครื่อง GC ที่ใช้ในการวิเคราะห์มีค่า Standard ของพารามิเตอร์อื่นอยู่
จึงทำให้แสดงผลออกมาด้วยด้วย



Light Gas Report					
Peak #	Component Name	Time [min]	Area [_V_s]	BL	Concentration
1	Hydrogen	0.86	4278594.52	BB	61.70
2	Carbon Dioxide	2.27	3492180.63	*BB	18.81
7	Nitrogen	10.36	545986.23	*BV	3.28
9	Carbon Monoxide	10.98	5228.96	*VB	0.04
			8321990.34		83.82

ภาพประกอบ 59 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซ ในถังปฏิกรณ์ 2UASB
วันที่ 3 ของการหมัก (การทดลองที่ 1)

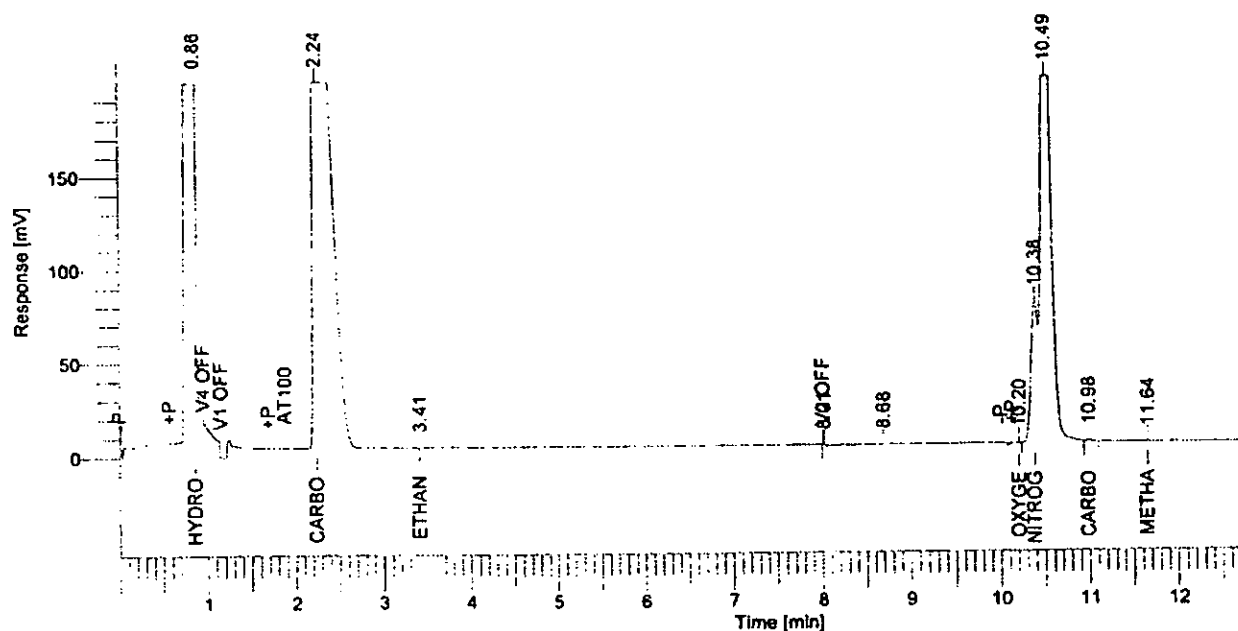
หมายเหตุ เนื่องจากเครื่อง GC ที่ใช้ในการวิเคราะห์มีค่า Standard ของพารามิเตอร์อื่นอยู่
จึงทำให้แสดงผลออกมาด้วยตัว



Light Gas Report					
Peak #	Component Name	Time [min]	Area [_V_s]	BL	Concentration
1	Hydrogen	0.86	4162988.59	BB	60.03
2	Carbon Dioxide	2.19	5904753.68	*BB	31.80
5	Oxygen	10.19	634.63	*BV	0.00
6	Nitrogen	10.38	229753.04	*VV	1.38
8	Carbon Monoxide	10.98	3446.69	*VB	0.02
			10301576.63		93.24

ภาพประกอบ 60 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซ ของถังปฏิกรณ์ 1UASB
วันที่ 4 ของการหมัก (การทดลองที่ 1)

หมายเหตุ เนื่องจากเครื่อง GC ที่ใช้ในการวิเคราะห์มีค่า Standard ของพารามิเตอร์อื่นอยู่
จึงทำให้แสดงผลออกมาด้วยด้วย



Light Gas Report					
Peak #	Component Name	Time [min]	Area [_V_s]	BL	Concentration
1	Hydrogen	0.86	4178008.88	BB	60.25
2	Carbon Dioxide	2.24	4425385.81	*BB	23.83
3	Ethane	3.41	20.52	*BB	0.00
6	Oxygen	10.20	732.69	*BV	0.01
7	Nitrogen	10.38	366027.40	*VV	2.20
9	Carbon Monoxide	10.98	4339.92	*VB	0.03
10	Methane	11.64	27.26	*BB	0.00
			8974542.47		86.32

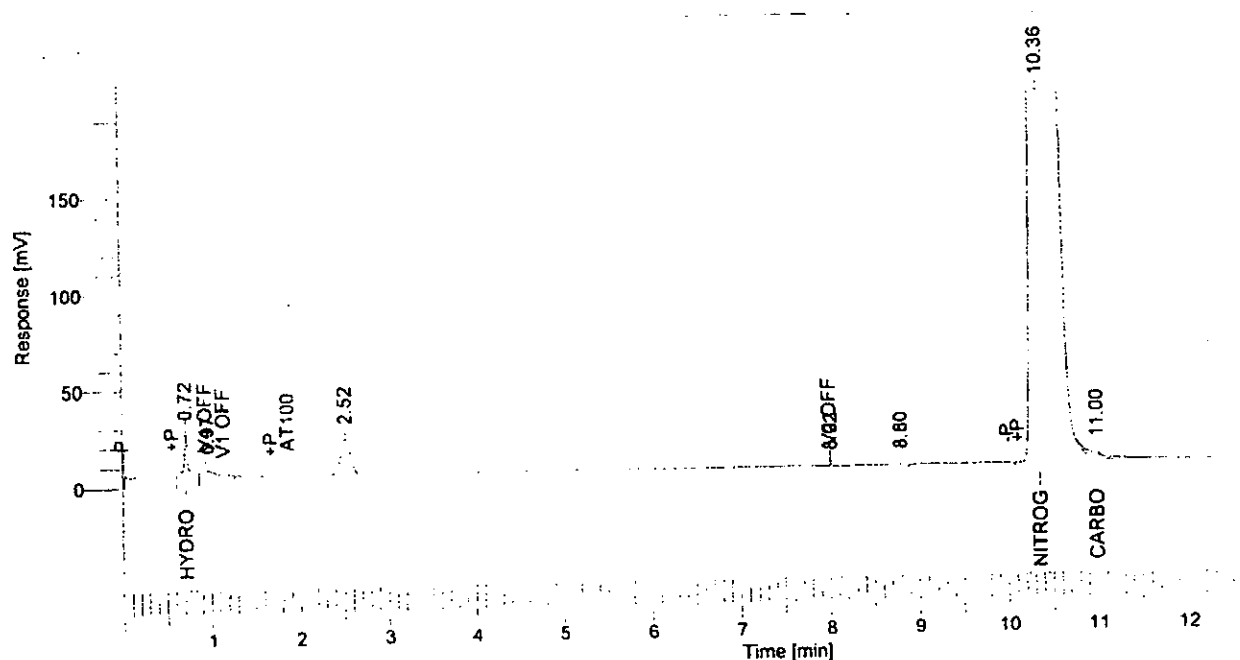
ภาพประกอบ 61 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซในถังปฏิกริยา 2UASB

วันที่ 4 ของการหมัก (การทดลองที่ 1)

หมายเหตุ ถังปฏิกริยา 1AS และ 2AS ก๊าซชีวภาพมีจำนวนน้อยมาก

ไม่สามารถเก็บตัวอย่างได้

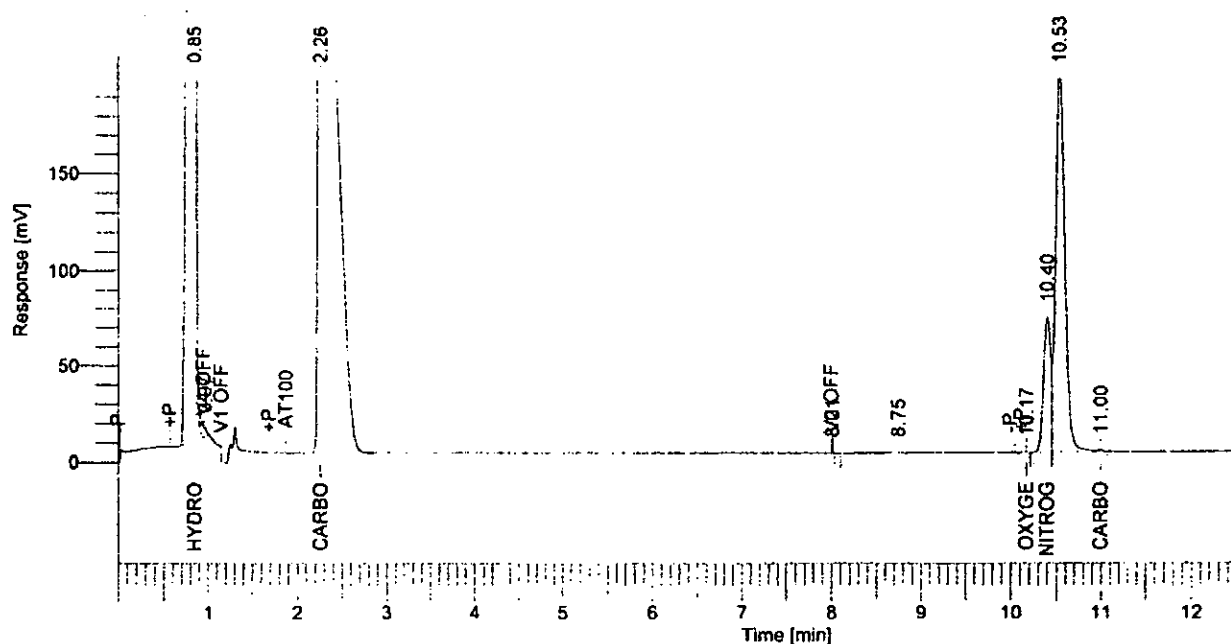
เนื่องจากเครื่อง GC ที่ใช้ในการวิเคราะห์มีค่า Standard ของพารามิเตอร์อื่นอยู่ จึงทำให้แสดงผลออกมาด้วยด้วย



Light Gas Report					
Peak #	Component Name	Time [min]	Area [_V_s]	BL	Concentration
1	Hydrogen	0.72	35246.52	BB	0.51
6	Nitrogen	10.36	14227101.00	*BE	85.45
7	Carbon Monoxide	11.00	50100.77	*EB	0.34
			14312448.29		86.30

ภาพประกอบ 62 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซในถังปฏิกิริยาพีเอชเริ่มต้น 4
 แป้งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน (การทดลองที่ 2)

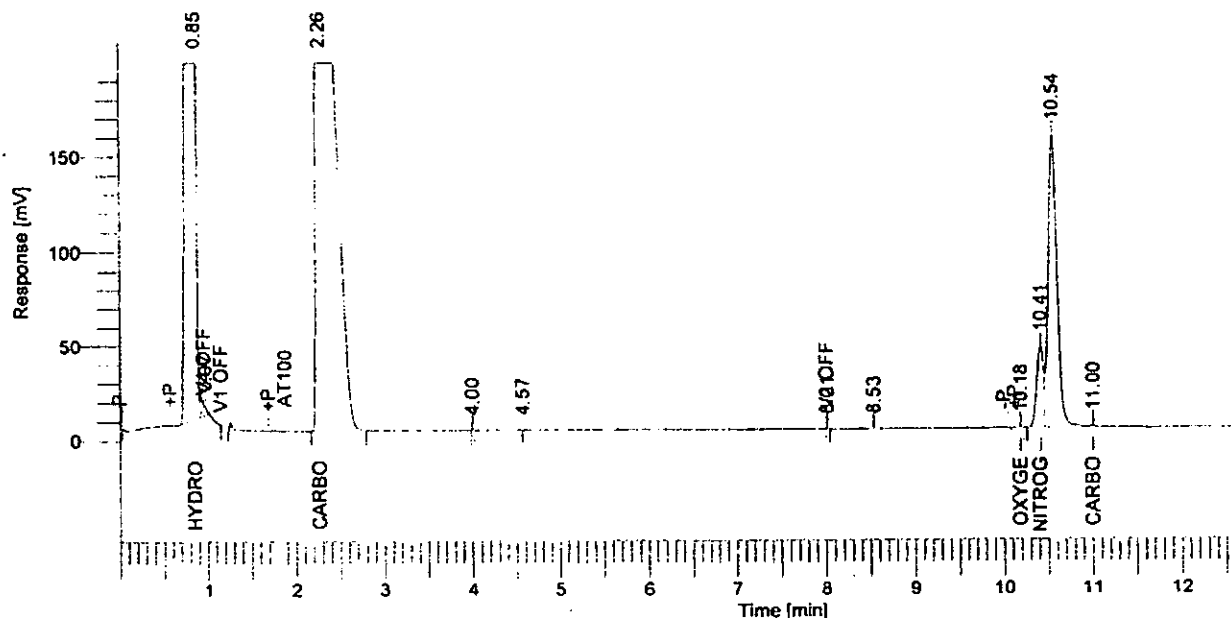
หมายเหตุ เนื่องจากเครื่อง GC ที่ใช้ในการวิเคราะห์มีค่า Standard ของพารามิเตอร์อื่นอยู่
 จึงทำให้แสดงผลออกมาด้วยด้วย



Peak #	Component Name	Time [min]	Area [_V_s]	BL	Concentration
1	Hydrogen	0.85	4267984.56	BE	61.55
3	Carbon Dioxide	2.26	5209567.14	*BB	28.06
6	Oxygen	10.17	458.15	*BV	0.00
7	Nitrogen	10.40	377854.23	*VV	2.27
9	Carbon Monoxide	11.00	3257.06	*VB	0.02
			9859121.15		91.90

ภาพประกอบ 63 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซของถังปฏิบัติการยาพีเอชเริ่มต้น 5
แป้งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน (การทดลองที่ 2)

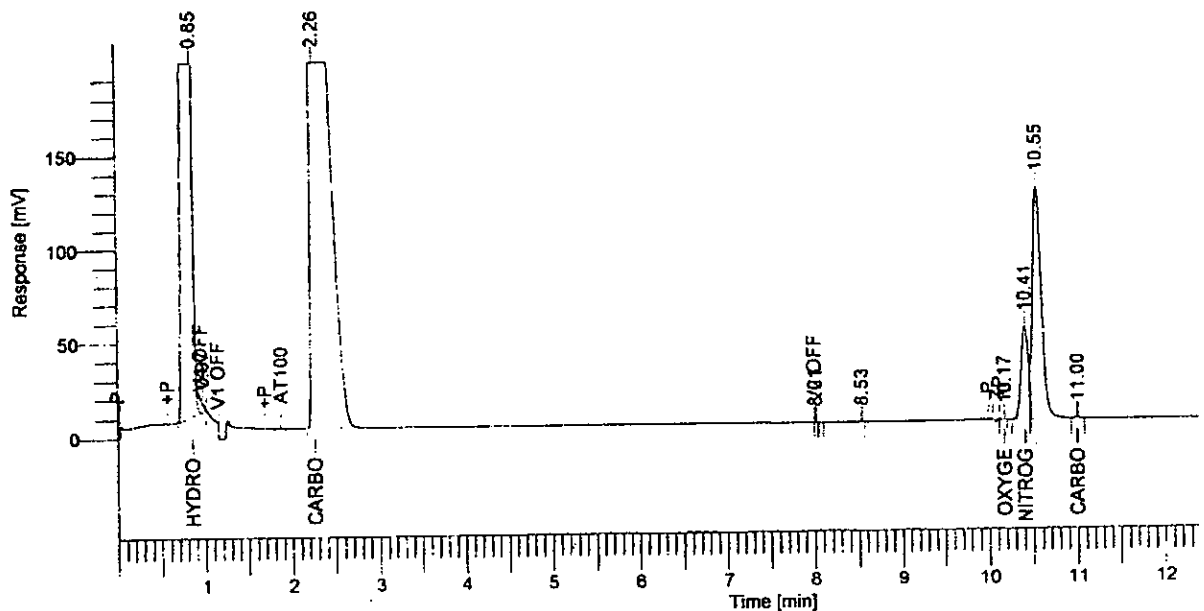
หมายเหตุ เนื่องจากเครื่อง GC ที่ใช้ในการวิเคราะห์มีค่า Standard ของพารามิเตอร์อื่นอยู่
จึงทำให้แสดงผลออกมาด้วยด้วย



Peak #	Component Name	Time [min]	Area [_V_s]	BL	Concentration
1	Hydrogen	0.85	4510867.45	BE	65.05
3	Carbon Dioxide	2.26	5091389.16	*BB	27.42
8	Oxygen	10.18	247.77	*BB	0.00
9	Nitrogen	10.41	228084.06	*BV	1.37
11	Carbon Monoxide	11.00	3504.49	*VB	0.02
			9834092.92		93.87

ภาพประกอบ 64 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซ ในถังปฏิบัติการพีเอชเริ่มต้น 6
แบ่งเข้าจำเป็นแหล่งคาร์บอน (การทดลองที่ 2)

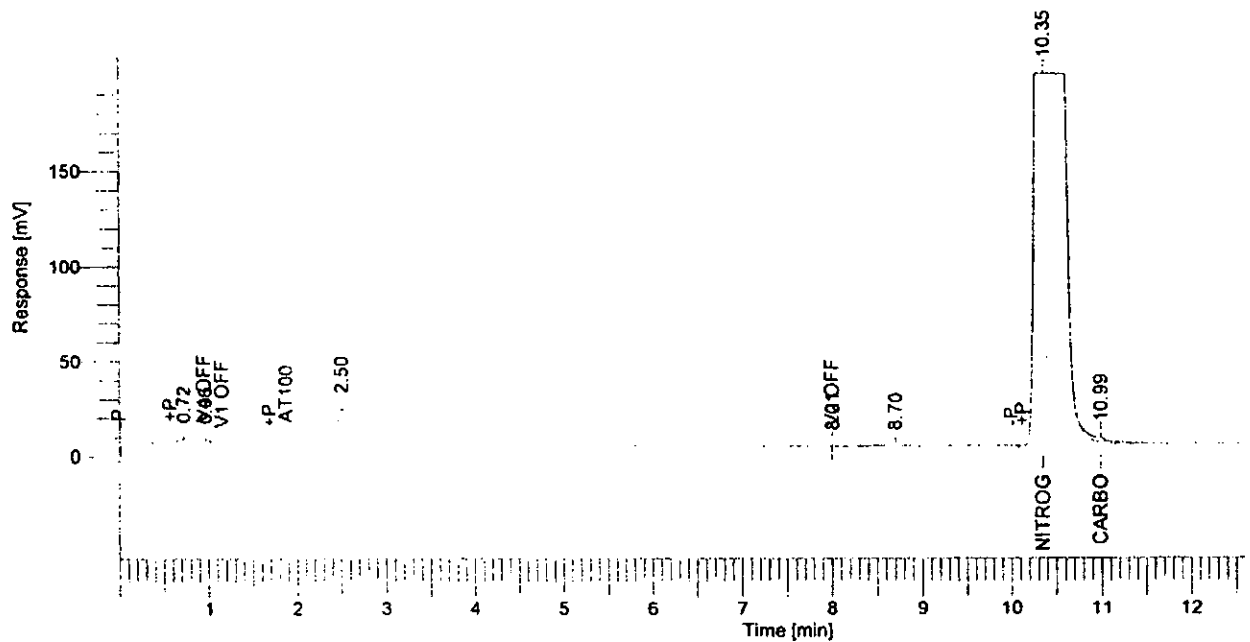
หมายเหตุ เนื่องจากเครื่อง GC ที่ใช้ในการวิเคราะห์มีค่า Standard ของพารามิเตอร์อื่นอยู่
จึงทำให้แสดงผลออกมาด้วยด้วย



Light Gas Report					
Peak #	Component Name	Time [min]	Area [_V_s]	BL	Concentration
1	Hydrogen	0.85	4603996.60	BE	66.39
3	Carbon Dioxide	2.26	5025239.89	*BB	27.07
6	Oxygen	10.17	214.09	*BB	0.00
7	Nitrogen	10.41	267142.36	*BV	1.60
9	Carbon Monoxide	11.00	3172.12	*VB	0.02
			9899765.06		95.08

ภาพประกอบ 65 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซในถังปฏิกิริยาพีเอชเริ่มต้น 7
 แป้งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน (การทดลองที่ 2)

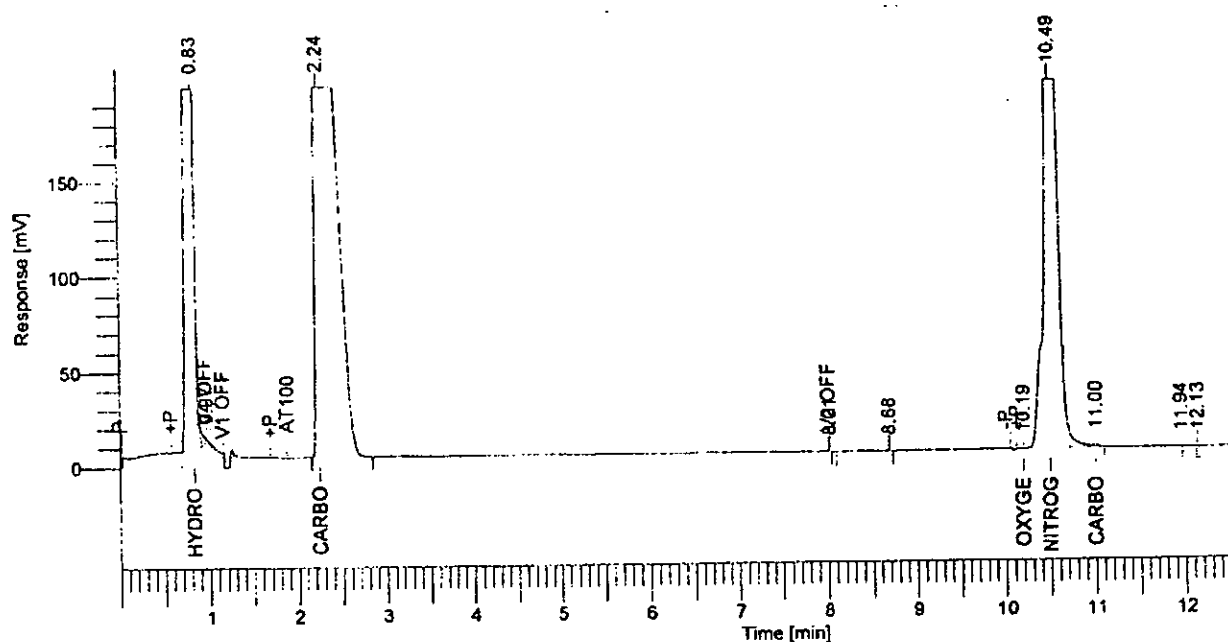
หมายเหตุ เนื่องจากเครื่อง GC ที่ใช้ในการวิเคราะห์มีค่า Standard ของพารามิเตอร์อื่นอยู่
 จึงทำให้แสดงผลออกมาด้วยด้วย



Light Gas Report					
Peak #	Component Name	Time [min]	Area [_V_s]	BL	Concentration
6	Nitrogen	10.35	14338758.70	*BE	86.12
7	Carbon Monoxide	10.99	44565.45	*EB	0.30
			14383324.15		86.43

ภาพประกอบ 66 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซในถังปฏิกิริยาพีเอชเริ่มต้น 4
แ่งมันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอน (การทดลองที่ 3)

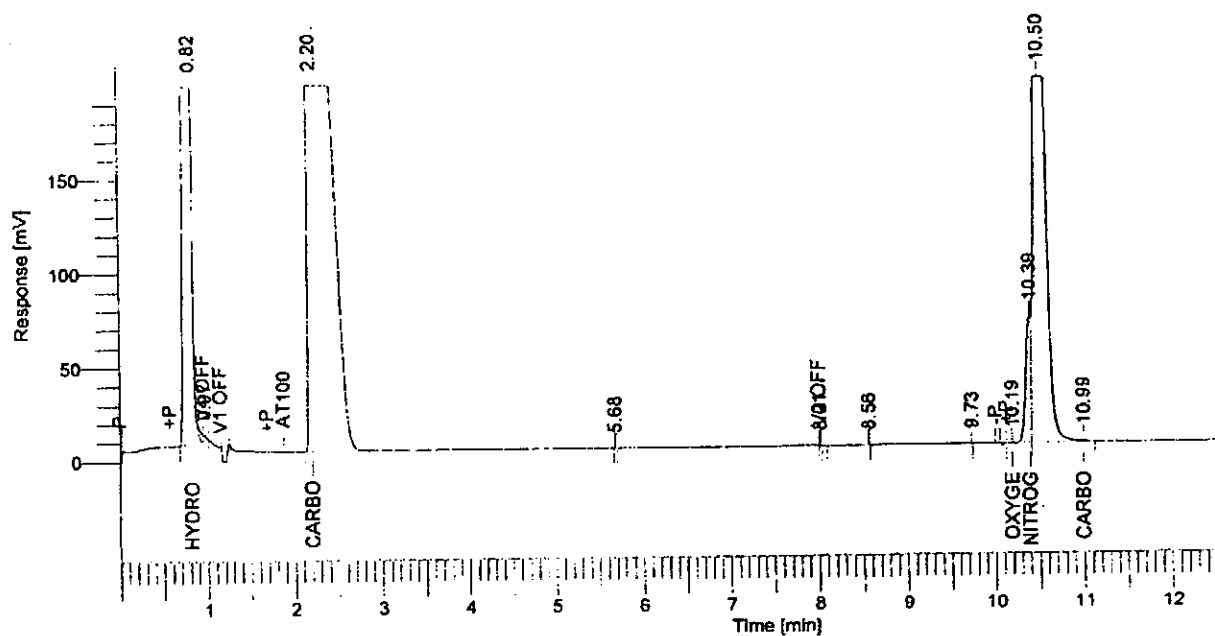
หมายเหตุ เนื่องจากเครื่อง GC ที่ใช้ในการวิเคราะห์มีค่า Standard ของพารามิเตอร์อื่นอยู่
จึงทำให้แสดงผลออกมาด้วยด้วย



Light Gas Report					
Peak #	Component Name	Time [min]	Area [_V_s]	BL	Concentration
1	Hydrogen	0.83	3413016.55	BE	49.22
3	Carbon Dioxide	2.24	5543283.93	*BB	29.86
6	Oxygen	10.19	638.09	*BV	0.00
7	Nitrogen	10.49	3600237.06	*VE	21.62
8	Carbon Monoxide	11.00	12002.43	*EB	0.08
			12569178.06		100.78

ภาพประกอบ 67 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซในถังปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 5
 แบ็งมันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอน (การทดลองที่ 3)

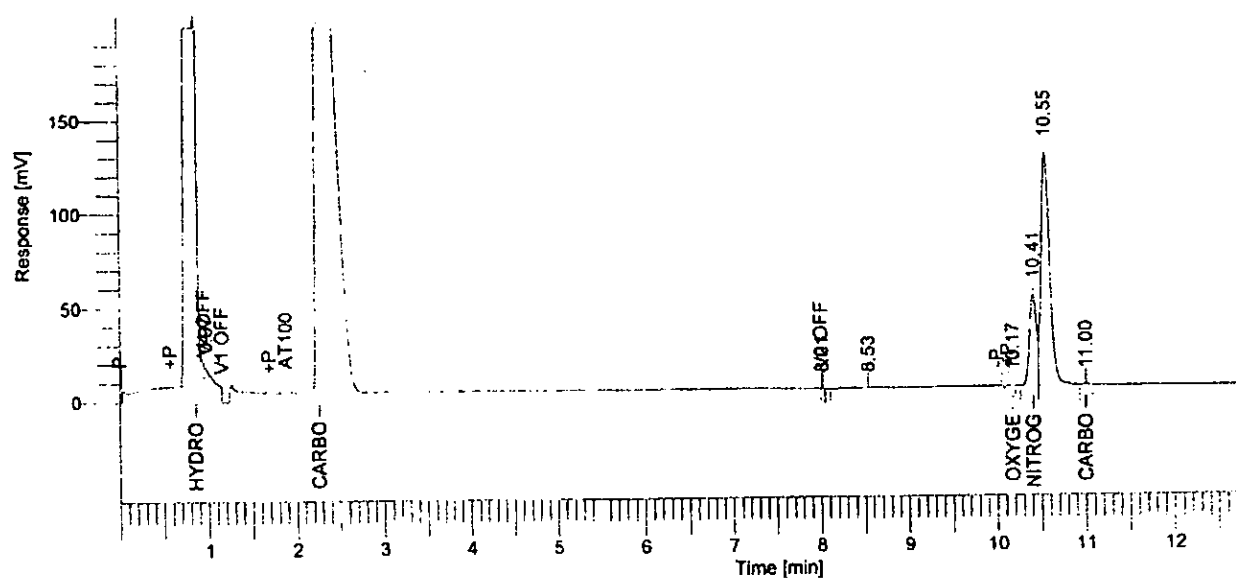
หมายเหตุ เนื่องจากเครื่อง GC ที่ใช้ในการวิเคราะห์มีค่า Standard ของพารามิเตอร์อื่นอยู่
 จึงทำให้แสดงผลออกมาด้วยด้วย



Light Gas Report					
Peak #	Component Name	Time [min]	Area [_V_s]	BL	Concentration
1	Hydrogen	0.82	3023390.97	BE	43.60
3	Carbon Dioxide	2.20	6976141.16	*BB	37.57
8	Oxygen	10.19	608.85	*BV	0.00
9	Nitrogen	10.39	273677.60	*VV	1.64
11	Carbon Monoxide	10.99	8596.54	*EB	0.06
			10282415.11		82.88

ภาพประกอบ 68 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซในถังปฏิกริยาพีเอชเริ่มต้น 6
แป้งมันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอน (การทดลองที่ 3)

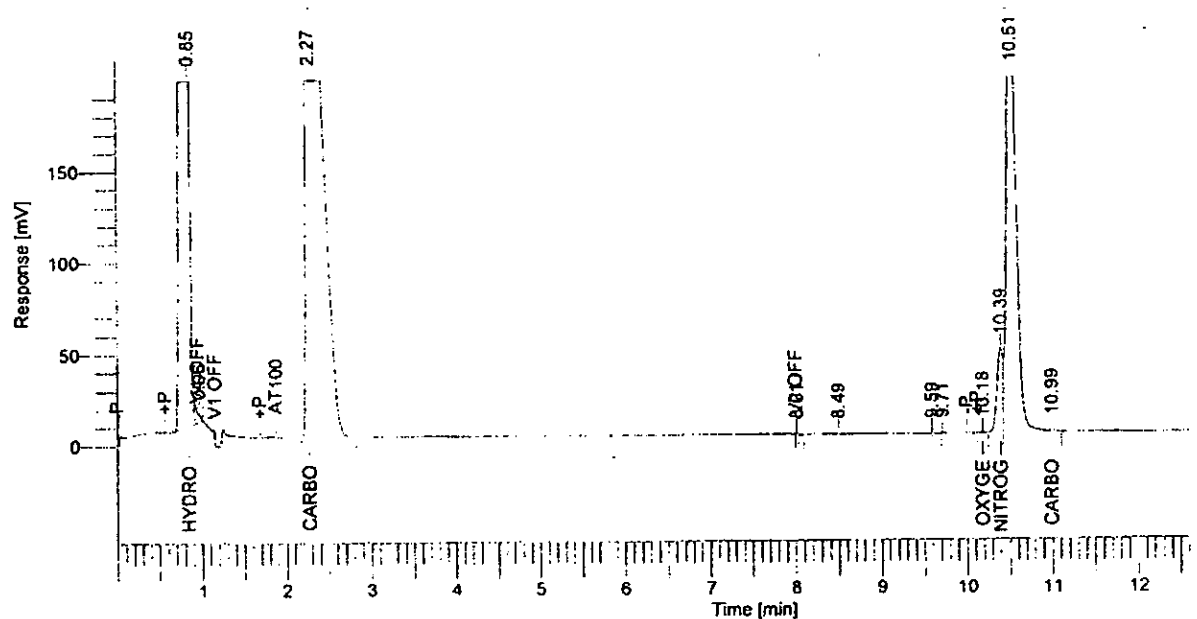
หมายเหตุ เนื่องจากเครื่อง GC ที่ใช้ในการวิเคราะห์มีค่า Standard ของพารามิเตอร์อื่นอยู่
จึงทำให้แสดงผลออกมาด้วยด้วย



Light Gas Report					
Peak #	Component Name	Time [min]	Area [_V_s]	BL	Concentration
1	Hydrogen	0.85	4603996.60	BE	66.39
3	Carbon Dioxide	2.26	5025239.89	*BB	27.07
6	Oxygen	10.17	214.09	*BB	0.00
7	Nitrogen	10.41	267142.36	*BV	1.60
9	Carbon Monoxide	11.00	3172.12	*VB	0.02
			9899765.06		95.08

ภาพประกอบ 69 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซในถังปฏิกิริยาพีเอชเริ่มต้น 7
แ่งมันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอน (การทดลองที่ 3)

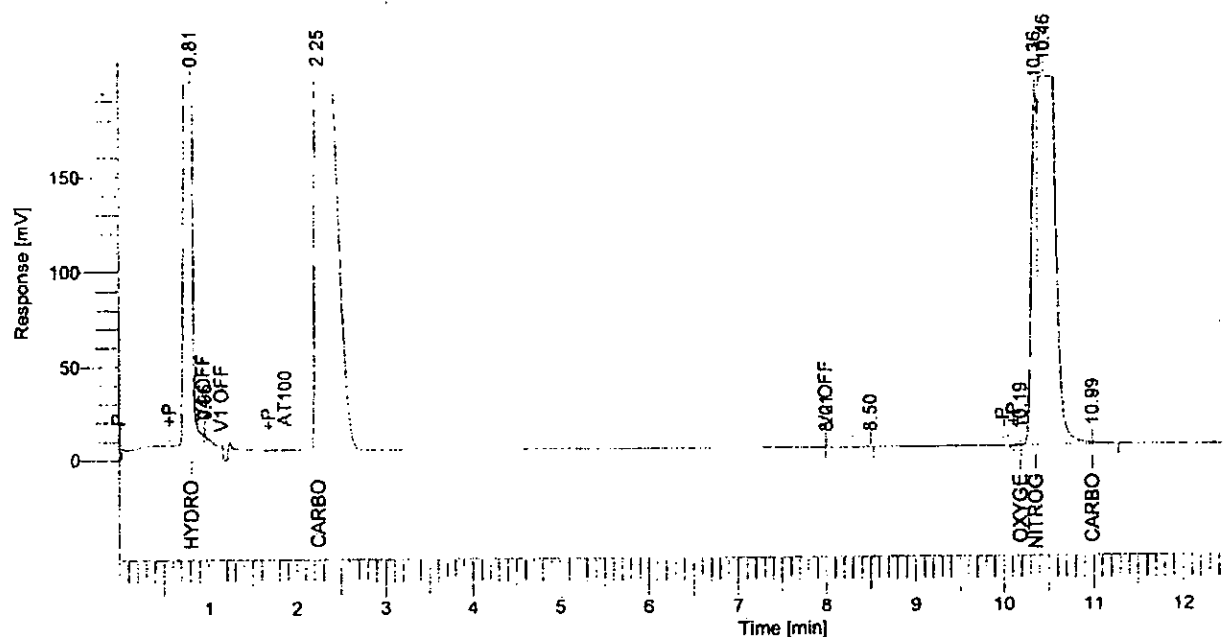
หมายเหตุ เนื่องจากเครื่อง GC ที่ใช้ในการวิเคราะห์มีค่า Standard ของพารามิเตอร์อื่นอยู่
จึงทำให้แสดงผลออกมาด้วยด้วย



Peak #	Component Name	Time [min]	Area [_V_s]	BL	Concentration
1	Hydrogen	0.85	4315629.53	BE	62.23
3	Carbon Dioxide	2.27	4561274.70	*BB	24.57
8	Oxygen	10.18	434.68	*BV	0.00
9	Nitrogen	10.39	208156.02	*VV	1.25
11	Carbon Monoxide	10.99	4521.39	*VB	0.03
			9090016.32		88.08

ภาพประกอบ 70 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซในถังปฏิกิริยาขนาดใช้งานจริง 4 ลิตร
แป้งมันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอน (การทดลองที่ 4)

หมายเหตุ เนื่องจากเครื่อง GC ที่ใช้ในการวิเคราะห์มีค่า Standard ของพารามิเตอร์อื่นอยู่
จึงทำให้แสดงผลออกมาด้วยด้วย

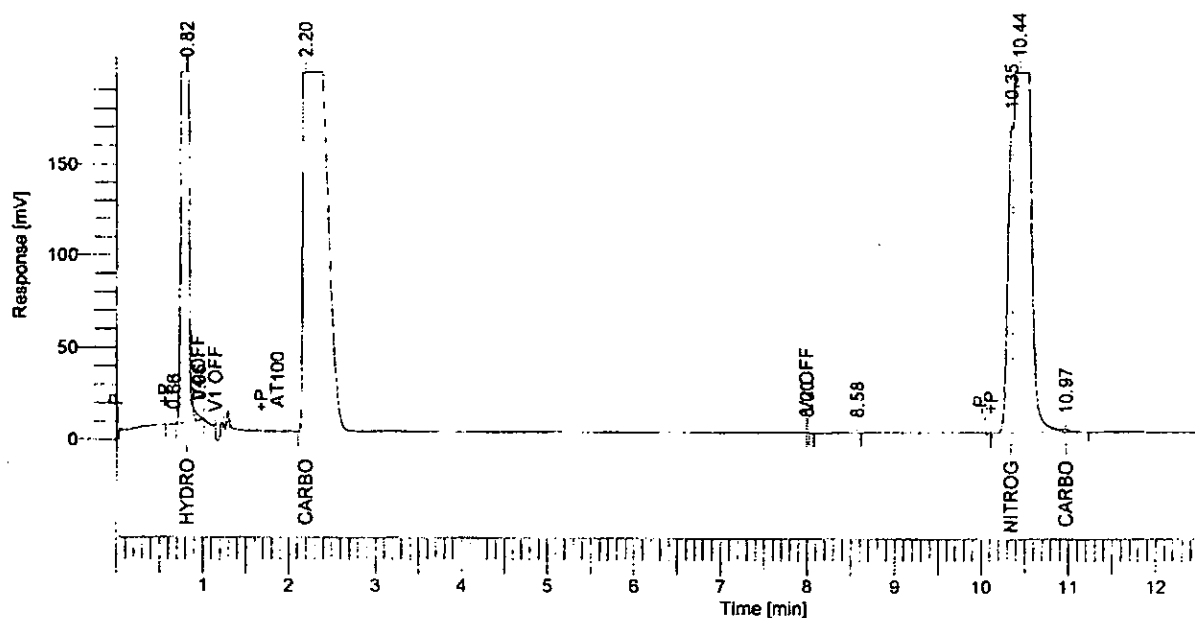


Light Gas Report					
Peak #	Component Name	Time [min]	Area [_V_s]	BL	Concentration
1	Hydrogen	0.81	2619169.33	BE	37.77
3	Carbon Dioxide	2.25	5158524.13	*BB	27.78
6	Oxygen	10.19	438.34	*BV	0.00
7	Nitrogen	10.36	803161.65	*VV	4.82
9	Carbon Monoxide	10.99	15085.84	*EB	0.10
			8596379.29		70.48

ภาพประกอบ 71 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซในถังปฏิกิริยาพีเอชเริ่มต้น 7

แบ่งมันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอน เติมเชื้อจุลินทรีย์บริสุทธิ์สายพันธุ์ SWU1
(การทดลองที่ 5)

หมายเหตุ เนื่องจากเครื่อง GC ที่ใช้ในการวิเคราะห์มีค่า Standard ของพารามิเตอร์อื่นอยู่
จึงทำให้แสดงผลออกมาด้วยด้วย



Light Gas Report					
Peak #	Component Name	Time [min]	Area [_V_s]	BL	Concentration
2	Hydrogen	0.82	2490787.29	BE	35.92
4	Carbon Dioxide	2.20	5790612.05	*BB	31.19
7	Nitrogen	10.35	662103.92	*BV	3.98
9	Carbon Monoxide	10.97	13924.07	*EB	0.09
			8957427.33		71.18

ภาพประกอบ 64 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซในถังปฏิบัติการพีเอชเริ่มต้น 7

แป้งมันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอน เดิมเชื้อจุลินทรีย์บิสสุทธีสายพันธุ์ SWU2 (การทดลองที่ 5)

หมายเหตุ เนื่องจากเครื่อง GC ที่ใช้ในการวิเคราะห์มีค่า Standard ของพารามิเตอร์อื่นอยู่ จึงทำให้แสดงผลออกมาด้วยด้วย

ประวัติย่อผู้ทำวิจัย

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ ชื่อสกุล	นางสาวบุหงา รongไชย
วันเดือนปีเกิด	17 เมษายน 2521
สถานที่เกิด	อำเภอภูผาแดง จังหวัดกาฬสินธุ์
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	99/137 หมู่บ้านขามภรณ์ ถ. เทพารักษ์ ต. บางปลา อ.บางพลี จ. สมุทรปราการ 10540
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2548	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
พ.ศ. 2545	ประกาศนียบัตรวิชาชีพครู จากมหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช
พ.ศ. 2544	วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
พ.ศ. 2540	มัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนบัวขาว จ. กาฬสินธุ์