



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพโดยการหมักแบบไร้ออกซิเจนของน้ำเสียแป้งมันสำปะหลัง

Biohydrogen Production by Dark Fermentation of Starch Wastewater

นามผู้วิจัย นางสาวบุษกร กาญจนาคาร

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์สุชาติ เหลืองประเสริฐ, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์นุชรา สีนบัวทอง, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ชาติ เขียมไชยศรี, D.Eng.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพโดยการหมักแบบไร้แสงของน้ำเสียแป้งมันสำปะหลัง

Biohydrogen Production by Dark Fermentation of Starch Wastewater

โดย

นางสาวบุษกร กาญจนาคาร

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2555

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

บุษกร กาญจนาคาร 2555: การผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพโดยการหมักแบบไร้แสงของน้ำเสียแป้งมันสำปะหลัง ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) สาขา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์สุชาติ เหลืองประเสริฐ, Ph.D. 139 หน้า

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากน้ำเสียโรงงานแป้งมันสำปะหลัง น้ำเสียจากโรงงานมีค่าซีโอดีประมาณ 29,300 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่า pH 3.79 โดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์จากกันดั้ชยูเอเอสบีของโรงงานเดียวกัน นำตะกอนจุลินทรีย์มาทำการคัดกรองด้วยการปรับสภาพด้วยความร้อน กรด ค่าง คลอโรฟอร์ม และการแช่แข็งและละลาย ทำการเพิ่มปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ด้วยสารอาหารและน้ำเสีย จากนั้นเดินระบบหมักแบบเดิมครั้งเดียวที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ในการศึกษาเบื้องต้นพบว่าสัดส่วนมวลตะกอนจุลินทรีย์ต่อความสกปรกอินทรีย์ในรูปซีโอดีที่เหมาะสมคือ 0.26 กรัมเซลล์ต่อกรัมซีโอดี เมื่อทำการทดลองที่สัดส่วนมวลตะกอนจุลินทรีย์ต่อความสกปรกอินทรีย์ในรูปซีโอดีนี้ โดยปรับ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 4-7 โดยในระบบหมักมีค่าซีโอดีประมาณ 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีมวลตะกอนจุลินทรีย์ประมาณ 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร การศึกษาพบว่าตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยการปรับสภาพด้วยความร้อน กรด และค่างสามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ดี และได้ผลผลิตไฮโดรเจน และอัตราการเกิดไฮโดรเจนจำเพาะสูง ส่วนตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยการปรับสภาพด้วยคลอโรฟอร์มและการแช่แข็งและละลายไม่พบว่าเกิดก๊าซไฮโดรเจน pH เริ่มต้นของน้ำเสียมีผลต่อการผลิตไฮโดรเจน เมื่อตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยการปรับสภาพด้วยความร้อนมาทำการทดลอง โดยตะกอนจุลินทรีย์ที่มีความสามารถที่แตกต่างกันทำให้ pH เริ่มต้นของน้ำเสียที่เหมาะสมในการผลิตไฮโดรเจนเปลี่ยนไป เมื่อตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยการปรับสภาพด้วยความร้อนที่มีความสามารถของตะกอนจุลินทรีย์ต่ำพบว่า pH เริ่มต้นที่เหมาะสมของน้ำเสียในการผลิตไฮโดรเจนมีค่าเป็น 7 ขณะที่ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองที่มีความสามารถของตะกอนจุลินทรีย์สูงพบว่า pH เริ่มต้นที่เหมาะสมของน้ำเสียในการผลิตไฮโดรเจนมีค่าเป็น 4 และในการหมักให้ได้ไฮโดรเจนปริมาณสูง ควรควบคุม pH ของระบบให้มีค่าประมาณ 4.4-4.7

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Budsakorn Kanchanakhan 2012: Biohydrogen Production by Dark Fermentation of Starch Wastewater. Master of Engineering (Environmental Engineering), Major Field: Environmental Engineering, Department of Environmental Engineering. Thesis Advisor: Mr. Suchat Leungprasert, Ph.D. 139 pages.

This research aimed to study on the biohydrogen production from starch wastewater by dark fermentation. Wastewater has approximately 29,300 mg COD/l and its initial pH was 3.79. Mixed culture sludge were obtained from the bottom of the upflow anaerobic sludge blanket tank of its plant. The mixed sludge had been subjected to treatment processes including the use of heat, acid, base, chloroform and freezing and thawing. The treated sludge were acclimated with nutrient medium followed by starch wastewater. Experiments were performed at 35 Celsius in a batch process. Preliminary result found that the appropriate ratio of the mass of sludge-to-substrate is 0.26 g cell/g COD. The experiments were conducted at this ratio by varying the initial pH of wastewater in the range of 4-7. The starch wastewater of 20,000 mg COD/l and sludge mass of 5,000 mg MLVSS/l were used as the fermentation medium. The results found that heat, acid and base treated sludge could produce hydrogen effectively. The hydrogen yield and the specific hydrogen production rate were acceptably high. On the other hand, the chloroform and freezing and thawing treated sludge could not produce hydrogen. The initial pH of starch wastewater affected hydrogen production. When using heat treated sludge, difference of sludge activity affected the optimum initial pH of starch wastewater in hydrogen production. The low activity sludge produced maximum hydrogen when the initial pH of starch wastewater was at 7, while the high activity sludge produced maximum hydrogen when the initial pH was at 4. In order to produce maximum hydrogen, the high activity sludge and the initial pH of starch wastewater at 4 were recommended. The pH of the fermentation medium must be controlled at the pH range of 4.4-4.7.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลงได้ด้วยความช่วยเหลือจากหลายท่านที่ได้อนุเคราะห์ให้ความร่วมมือช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ดร.สุชาติ เหลืองประเสริฐ ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำที่ดียิ่งตั้งแต่เริ่มต้นดำเนินงาน ตลอดจนตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ และ ดร.นุชรา สีนบัวทอง ที่ได้ให้คำแนะนำในการคัดเลือกเรื่องที่ศึกษา พร้อมทั้งให้คำปรึกษาในเรื่องการวิเคราะห์วิจัย การใช้เครื่องมือวิทยาศาสตร์ การแปรผลข้อมูล การสรุปและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ตลอดการดำเนินการศึกษา ส่งผลให้การศึกษาสำเร็จลุล่วงด้วยดี รวมทั้ง ผศ.ดร.สัตยา สิริวิทยาภรณ์ ประธานการสอบปากเปล่าขั้นสุดท้ายและผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ผศ.ดร.ชลอ จารุสุทธิรักษ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำในการแก้ไขวิทยานิพนธ์ ส่งผลให้วิทยานิพนธ์ มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

การศึกษาครั้งนี้จะสำเร็จลงไม่ได้หากขาดความอนุเคราะห์จากฝ่ายเครื่องมือและวิทยาศาสตร์ อาคารปฏิบัติการกลาง สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่และเครื่องมือในการปฏิบัติการทดลอง ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ขอขอบคุณอาจารย์ปราโมทย์ สิริโรจน์ ภาคจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ได้อนุเคราะห์ข้อมูลและคำแนะนำในด้านการทดลอง และขอบคุณบริษัท โซโซวชั่นอุตสาหกรรม จำกัด อำเภอ บางละมุง จังหวัดชลบุรี ที่อนุเคราะห์น้ำเสียจากโรงงานเป็งมันสำปะหลังและแบคทีเรีย เพื่อใช้ในการศึกษาครั้งนี้ด้วย

สุดท้าย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณครอบครัวกาญจนาคาร ที่ให้การอบรมเลี้ยงดูด้วยความรัก ความอบอุ่น ให้การศึกษาและเป็นกำลังใจที่สำคัญอย่างยิ่ง ขอขอบคุณนางสาวชไมพร สมจิตต์ ที่ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจตลอดการศึกษาในครั้งนี้ ขอขอบคุณกำลังใจอย่างสิ้นหลามของเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

บุษกร กาญจนาคาร

มีนาคม 2555

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(13)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	4
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	20
อุปกรณ์	20
วิธีการ	21
ผลและวิจารณ์	30
สรุปและข้อเสนอแนะ	46
สรุป	46
ข้อเสนอแนะ	47
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	48
ภาคผนวก	56
ภาคผนวก ก ข้อมูลดิบจากการศึกษา	57
ภาคผนวก ข วิธีการคำนวณค่าต่างๆ ในการศึกษา	130
ประวัติการศึกษาและทำงาน	139

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
1	ลักษณะเริ่มต้นของน้ำเสียโรงงานแป้งมันสำปะหลัง	30
2	สรุปผลการศึกษาในการเดินระบบด้วย Batch process ของการคัดกรองตะกอนจุลินทรีย์ด้วยวิธีต่างๆ โดยใช้สัดส่วน Cell: COD = 0.26 ตะกอนจุลินทรีย์เริ่มต้นการหมักด้วย Activity สูง (%H ₂ ในการเริ่มต้นการหมักประมาณ 50%)	45
ตารางผนวกที่		
ก1	ผลการ Acclimation ของตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองโดยการปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (ไม่ได้้นำตะกอนจุลินทรีย์ไปใช้ในการศึกษาขั้นต่อไป)	58
ก2	ผลการ Acclimation ของตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองโดยการปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (นำตะกอนจุลินทรีย์ไปใช้ในการศึกษาความเหมาะสมของ Cell: COD)	61
ก3	ผลการ Acclimation ของตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองโดยการปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (นำตะกอนจุลินทรีย์ไปใช้ในการศึกษาความเหมาะสมของ Cell: COD และศึกษาถึง Activity ของตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตไฮโดรเจน)	63
ก4	ผลการ Acclimation ของตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองโดยการปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (นำตะกอนจุลินทรีย์ไปใช้ในการศึกษาถึง Activity ของตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตไฮโดรเจน และใช้ในการศึกษาผลของ pH เริ่มต้นของน้ำเสียที่ส่งผลต่อการผลิตไฮโดรเจน)	65
ก5	ผลการ Acclimation ของตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองโดยการปรับสภาพด้วยกรด (Acid treatment)	67
ก6	ผลการ Acclimation ของตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองโดยการปรับสภาพด้วยด่าง (Base treatment)	69

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ก7 ผลการ Acclimation ของตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองโดยการปรับสภาพด้วยคลอโรฟอร์ม (Chloroform)	71
ก8 ผลการ Acclimation ของตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองโดยการปรับสภาพด้วยการแช่แข็งและละลาย (Freezing and thawing)	73
ก9 pH เฉลี่ยที่เกิดขึ้นหลังจากการเดินระบบ Batch process โดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาความเหมาะสมของ Cell: COD)	75
ก10 pH เฉลี่ยที่เกิดขึ้นหลังจากการเดินระบบ Batch process โดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาความเหมาะสมของ Cell: COD และศึกษาถึง Activity ของตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตไฮโดรเจน)	75
ก11 pH เฉลี่ยที่เกิดขึ้นหลังจากการเดินระบบ Batch process โดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาถึง Activity ของตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตไฮโดรเจนและใช้ในการศึกษาผลของ pH เริ่มต้นของน้ำเสียที่ส่งผลต่อการผลิตไฮโดรเจน)	76
ก12 pH เฉลี่ยที่เกิดขึ้นหลังจากการเดินระบบ Batch process โดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยกรด (Acid treatment)	76
ก13 pH เฉลี่ยที่เกิดขึ้นหลังจากการเดินระบบ Batch process โดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยด่าง (Base treatment)	77
ก14 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 4 ของการผลิตไฮโดรเจน โดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาความเหมาะสมของ Cell: COD)	78

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ก15 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 4.5 ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาความเหมาะสมของ Cell: COD)	79
ก16 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 5 ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาความเหมาะสมของ Cell: COD)	80
ก17 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 5.5 ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาความเหมาะสมของ Cell: COD)	81
ก18 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 6 ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาความเหมาะสมของ Cell: COD)	82
ก19 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 6.5 ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาความเหมาะสมของ Cell: COD)	83
ก20 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 7 ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาความเหมาะสมของ Cell: COD)	84

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ก21 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมที่ใช้ น้ำกลั่นเป็น substrate (Control) ของการผลิตไฮโดรเจน โดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาความเหมาะสมของ Cell: COD)	85
ก22 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 4 ของการผลิตไฮโดรเจน โดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาความเหมาะสมของ Cell: COD และศึกษาถึง Activity ของตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตไฮโดรเจน)	86
ก23 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 4.5 ของการผลิตไฮโดรเจน โดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาความเหมาะสมของ Cell: COD และศึกษาถึง Activity ของตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตไฮโดรเจน)	87
ก24 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 5 ของการผลิตไฮโดรเจน โดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาความเหมาะสมของ Cell: COD และศึกษาถึง Activity ของตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตไฮโดรเจน)	88
ก25 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 5.5 ของการผลิตไฮโดรเจน โดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาความเหมาะสมของ Cell: COD และศึกษาถึง Activity ของตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตไฮโดรเจน)	89
ก26 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 6 ของการผลิตไฮโดรเจน โดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาความเหมาะสมของ Cell: COD และศึกษาถึง Activity ของตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตไฮโดรเจน)	90

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ก27 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 6.5 ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาความเหมาะสมของ Cell: COD และศึกษาถึง Activity ของตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตไฮโดรเจน)	91
ก28 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 7 ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาความเหมาะสมของ Cell: COD และศึกษาถึง Activity ของตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตไฮโดรเจน)	92
ก29 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมที่ใช้น้ำกลั่นเป็น substrate (Control) ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาความเหมาะสมของ Cell: COD และศึกษาถึง Activity ของตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตไฮโดรเจน)	93
ก30 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 4 ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาถึง Activity ของตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตไฮโดรเจนและใช้ในการศึกษาผลของ pH เริ่มต้นของน้ำเสียที่ส่งผลต่อการผลิตไฮโดรเจน)	94
ก31 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 4.5 ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาถึง Activity ของตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตไฮโดรเจนและใช้ในการศึกษาผลของ pH เริ่มต้นของน้ำเสียที่ส่งผลต่อการผลิตไฮโดรเจน)	95

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ก32 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 5 ของการผลิตไฮโดรเจน โดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาถึง Activity ของตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตไฮโดรเจนและใช้ในการศึกษาผลของ pH เริ่มต้นของน้ำเสียที่ส่งผลต่อการผลิตไฮโดรเจน)	96
ก33 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 5.5 ของการผลิตไฮโดรเจน โดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาถึง Activity ของตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตไฮโดรเจนและใช้ในการศึกษาผลของ pH เริ่มต้นของน้ำเสียที่ส่งผลต่อการผลิตไฮโดรเจน)	97
ก34 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 6 ของการผลิตไฮโดรเจน โดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาถึง Activity ของตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตไฮโดรเจนและใช้ในการศึกษาผลของ pH เริ่มต้นของน้ำเสียที่ส่งผลต่อการผลิตไฮโดรเจน)	98
ก35 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 6.5 ของการผลิตไฮโดรเจน โดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาถึง Activity ของตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตไฮโดรเจนและใช้ในการศึกษาผลของ pH เริ่มต้นของน้ำเสียที่ส่งผลต่อการผลิตไฮโดรเจน)	99
ก36 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 7 ของการผลิตไฮโดรเจน โดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาถึง Activity ของตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตไฮโดรเจนและใช้ในการศึกษาผลของ pH เริ่มต้นของน้ำเสียที่ส่งผลต่อการผลิตไฮโดรเจน)	100

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ก37 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมที่ใช้ น้ำกลั่นเป็น substrate (Control) ของการผลิตไฮโดรเจน โดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาถึง Activity ของตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตไฮโดรเจนและใช้ในการศึกษาผลของ pH เริ่มต้นของน้ำเสียที่ส่งต่อการผลิตไฮโดรเจน)	101
ก38 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 4 ของการผลิตไฮโดรเจน โดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยกรด (Acid treatment)	102
ก39 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 4.5 ของการผลิตไฮโดรเจน โดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยกรด (Acid treatment)	103
ก40 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 5 ของการผลิตไฮโดรเจน โดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยกรด (Acid treatment)	104
ก41 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 5.5 ของการผลิตไฮโดรเจน โดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยกรด (Acid treatment)	105
ก42 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 6 ของการผลิตไฮโดรเจน โดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยกรด (Acid treatment)	106
ก43 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 6.5 ของการผลิตไฮโดรเจน โดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยกรด (Acid treatment)	107
ก44 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 7 ของการผลิตไฮโดรเจน โดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยกรด (Acid treatment)	108

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ก45 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมที่ใช้ น้ำกลั่นเป็น substrate (Control) ของการผลิตไฮโดรเจน โดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยกรด (Acid treatment)	109
ก46 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 4 ของการผลิตไฮโดรเจน โดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยด่าง (Base treatment)	110
ก47 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 4.5 ของการผลิตไฮโดรเจน โดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยด่าง (Base treatment)	111
ก48 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 5 ของการผลิตไฮโดรเจน โดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยด่าง (Base treatment)	112
ก49 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 5.5 ของการผลิตไฮโดรเจน โดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยด่าง (Base treatment)	113
ก50 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 6 ของการผลิตไฮโดรเจน โดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยด่าง (Base treatment)	114
ก51 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 6.5 ของการผลิตไฮโดรเจน โดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยด่าง (Base treatment)	115
ก52 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 7 ของการผลิตไฮโดรเจน โดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยด่าง (Base treatment)	116

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ก53 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมที่ใช้ น้ำกลั่นเป็น substrate (Control) ของการผลิตไฮโดรเจน โดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความต่าง (Base treatment)	117
ก54 ปริมาณ COD ที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียตั้งแต่ 5.5-7 ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาความเหมาะสมของ Cell: COD)	118
ก55 ปริมาณ COD ที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียตั้งแต่ 5.5-7 ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาความเหมาะสมของ Cell: COD และศึกษาถึง Activity ของตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตไฮโดรเจน)	118
ก56 ปริมาณ COD ที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียตั้งแต่ 4-7 ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาถึง Activity ของตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตไฮโดรเจนและใช้ในการศึกษาผลของ pH เริ่มต้นของน้ำเสียที่ส่งผลต่อการผลิตไฮโดรเจน)	119
ก57 ปริมาณ COD ที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียตั้งแต่ 4-7 ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยกรด (Acid treatment)	119
ก58 ปริมาณ COD ที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียตั้งแต่ 4-7 ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยด่าง (Base treatment)	120
ก59 ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ (%COD degraded) และผลผลิตไฮโดรเจน (H_2 yield) ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาความเหมาะสมของ Cell: COD)	121

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า	
ก60	ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ (%COD degraded) และผลผลิตไฮโดรเจน (H ₂ yield) ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาความเหมาะสมของ Cell: COD และศึกษาถึง Activity ของตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตไฮโดรเจน)	122
ก61	ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ (%COD degraded) และผลผลิตไฮโดรเจน (H ₂ yield) ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาถึง Activity ของตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตไฮโดรเจนและใช้ในการศึกษาผลของ pH เริ่มต้นของน้ำเสียที่ส่งผลต่อการผลิตไฮโดรเจน)	123
ก62	ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ (%COD degraded) และผลผลิตไฮโดรเจน (H ₂ yield) ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยกรด (Acid treatment)	124
ก63	ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ (%COD degraded) และผลผลิตไฮโดรเจน (H ₂ yield) ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยด่าง (Base treatment)	125
ก64	อัตราการผลิตไฮโดรเจนจำเพาะ (Specific hydrogen production rate, SHPR) ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาความเหมาะสมของ Cell: COD)	126
ก65	อัตราการผลิตไฮโดรเจนจำเพาะ (Specific hydrogen production rate, SHPR) ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาความเหมาะสมของ Cell: COD และศึกษาถึง Activity ของตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตไฮโดรเจน)	126

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ก66 อัตราการผลิตไฮโดรเจนจำเพาะ(Specific hydrogen production rate, SHPR) ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตใน pH ต่างๆ)	127
ก67 อัตราการผลิตไฮโดรเจนจำเพาะ(Specific hydrogen production rate, SHPR) ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยกรด (Acid treatment)	128
ก68 อัตราการผลิตไฮโดรเจนจำเพาะ(Specific hydrogen production rate, SHPR) ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยด่าง (Base treatment)	129
ข1 ตัวอย่างปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสม	135

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แนวทางการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากมวลชีวภาพ	6
2	ขั้นตอนการย่อยสลายของกระบวนการย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจน	10
3	การคัดกรองตะกอนจุลินทรีย์ที่ผลิตไฮโดรเจน โดยการปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment)	22
4	การเก็บตัวอย่างก๊าซในช่วง Acclimation ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gas chromatograp	24
5	ลักษณะขวดเก็บก๊าซที่เป็นการเก็บตัวอย่างก๊าซโดยการแทนที่น้ำ (Water displacement)	25
6	การเดินระบบแบบ Batch process	27
7	แผนภูมิการดำเนินงานตลอดระยะเวลาการทำงาน	29
8	%H ₂ ที่เกิดจากการเพิ่มปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ชนิดที่ผลิตไฮโดรเจนของ ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธี Heat treatment (ไม่ได้นำตะกอน จุลินทรีย์ไปใช้ในการศึกษาขั้นต่อไป)	31
9	%H ₂ ที่เกิดจากการเพิ่มปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ชนิดที่ผลิตไฮโดรเจนของ ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธี Heat treatment (นำตะกอนจุลินทรีย์ ไปใช้ในการศึกษาความเหมาะสมของ Cell: COD)	32
10	%H ₂ ที่เกิดจากการเพิ่มปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ชนิดที่ผลิตไฮโดรเจนของ ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธี Heat treatment (นำตะกอนจุลินทรีย์ ไปใช้ในการศึกษาความเหมาะสมของ Cell: COD และศึกษาถึง Activity ของ ตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตไฮโดรเจน)	32
11	%H ₂ ที่เกิดจากการเพิ่มปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ชนิดที่ผลิตไฮโดรเจนของ ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธี Heat treatment (จากตะกอนจุลินทรีย์ ที่ใช้ในการศึกษาถึง Activity ของตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตไฮโดรเจนและใช้ ในการศึกษาผลของ pH เริ่มต้นของน้ำเสียที่ส่งผลต่อการผลิตไฮโดรเจน)	33

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
12	ปริมาณไฮโดรเจนสะสมที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียที่แตกต่างกัน หมักด้วยตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธี Heat treatment ของ Cell: COD = 4 โดยในช่วงเริ่มต้นการหมักตะกอนจุลินทรีย์ชนิดที่ผลิตไฮโดรเจนมี Activity ต่ำ (%H ₂ ในการเริ่มต้นการหมักประมาณ 25%)	34
13	ปริมาณไฮโดรเจนสะสมที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียที่แตกต่างกัน หมักด้วยตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธี Heat treatment ของ Cell: COD = 0.26 โดยในช่วงเริ่มต้นการหมักตะกอนจุลินทรีย์ชนิดที่ผลิตไฮโดรเจนมี Activity ต่ำ (%H ₂ ในการเริ่มต้นการหมักประมาณ 30%)	34
14	การเปรียบเทียบ (ก) H ₂ yield และ (ข) SHPR ที่ได้จากการเดินระบบบำบัดที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียแตกต่างกัน หมักด้วยตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธี Heat treatment ของ Cell: COD = 4 และ Cell: COD = 0.26 โดยแสดงผล pH เริ่มต้นของน้ำเสียที่ 5.5-7 (ไม่รายงานผลที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสีย 4-5 เพราะปริมาณไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นน้อยมาก)	35
15	ปริมาณไฮโดรเจนสะสมที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียที่แตกต่างกัน หมักด้วยตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธี Heat treatment ของ Cell: COD = 0.26 โดยในช่วงเริ่มต้นการหมักตะกอนจุลินทรีย์ชนิดที่ผลิตไฮโดรเจนมี Activity สูง (%H ₂ ในการเริ่มต้นการหมักประมาณ 50%)	38
16	การเปรียบเทียบ (ก) H ₂ yield และ (ข) SHPR ที่ได้จากการเดินระบบบำบัดที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียแตกต่างกัน หมักด้วยตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธี Heat treatment ของตะกอนจุลินทรีย์ที่มี Activity ต่ำ (%H ₂ ในการเริ่มต้นการหมักต่ำกว่า 50%) และตะกอนจุลินทรีย์ที่มี Activity สูง (%H ₂ ในการเริ่มต้นการหมักประมาณ 50%)	39
17	%H ₂ ที่เกิดจากการเพิ่มปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ชนิดที่ผลิตไฮโดรเจนของตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธี Acid treatment	40
18	ปริมาณไฮโดรเจนสะสมที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียที่แตกต่างกันด้วยตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธี Acid treatment	40

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
19	การเปรียบเทียบ(ก) H_2 yield และ (ข) SHPR ที่ได้จากการเดินระบบบำบัดที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียแตกต่างกัน หมักด้วยตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธี Acid treatment ของตะกอนจุลินทรีย์ที่มี Activity สูง ($\%H_2$ ในการเริ่มต้นการหมักประมาณ 50%)	41
20	$\%H_2$ ที่เกิดจากการเพิ่มปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ชนิดที่ผลิตไฮโดรเจนของตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธี Base treatment	42
21	ปริมาตรไฮโดรเจนสะสมที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียที่แตกต่างกันด้วยตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธี Base treatment	43
22	การเปรียบเทียบ(ก) H_2 yield และ (ข) SHPR ที่ได้จากการเดินระบบบำบัดที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียแตกต่างกัน หมักด้วยตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธี Base treatment ของตะกอนจุลินทรีย์ที่มี Activity สูง ($\%H_2$ ในการเริ่มต้นการหมักประมาณ 50%)	43
ภาพผนวกที่		
ก1	$\%H_2$ ที่เกิดจากการเพิ่มปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ที่ผลิตไฮโดรเจนของตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีคลอโรฟอร์ม (Chloroform)	72
ก2	$\%H_2$ ที่เกิดจากการเพิ่มปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ที่ผลิตไฮโดรเจนของตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีการแช่แข็งและละลาย (Freezing and thawing)	74
ข1	ความดันของก๊าซในระบบเก็บก๊าซของการทดลอง	133
ข2	โครมาโตแกรมของก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทนมาตรฐาน	136
ข3	โครมาโตแกรมของตัวอย่างก๊าซในระบบ	136
ข4	เครื่อง Gas chromatograph (GC/TCD) Model Shimadzu รุ่น GC-14B	136

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่

หน้า

- ข5 ปริมาตรไฮโดรเจนสะสมที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 7 ด้วยตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธี Heat treatment ของ Cell: COD = 0.26 โดยในช่วงเริ่มต้นการหมักตะกอนจุลินทรีย์ที่ผลิตไฮโดรเจนมี Activity ต่ำ (%H₂ ในการเริ่มต้นการหมักต่ำกว่า 50%)

138

การผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพโดยการหมักแบบไร้แสงของน้ำเสียแป้งมันสำปะหลัง

Biohydrogen Production by Dark Fermentation of Starch Wastewater

คำนำ

ปัจจุบันปัญหาการขาดแคลนพลังงานเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นทั่วโลก ในหลายประเทศได้มีการศึกษาวิจัยอย่างกว้างขวางเพื่อแสวงหาพลังงานทดแทน ซึ่งความต้องการพลังงานในระดับโลกมีสูงขึ้นในขณะที่เชื้อเพลิงฟอสซิลที่มีอยู่อย่างจำกัดลดลง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการหาก๊าซที่ให้พลังงานสูงมาแทนเชื้อเพลิงฟอสซิล โดยในการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลนี้ก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งไม่เป็นผลดีต่อสิ่งแวดล้อม และการศึกษาผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อเป็นพลังงานทดแทนส่วนใหญ่ในประเทศไทยยังเป็นไปเพื่อผลิตก๊าซมีเทน

การบำบัดน้ำเสียอินทรีย์ที่ได้รับความสนใจมากที่สุดวิธีหนึ่งคือ การใช้ตะกอนจุลินทรีย์ในการลดความสกปรกอินทรีย์ทำให้น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมีคุณภาพดีขึ้น ขณะเดียวกันสามารถผลิตพลังงานออกมาด้วย ในอดีตจนถึงปัจจุบันการผลิตก๊าซมีเทน (Methane, CH₄) ได้รับความสนใจอย่างต่อเนื่องและสามารถนำไปใช้ใน scale ใหญ่ได้อย่างแพร่หลาย ความสนใจต่อมาก็คือก๊าซชีวภาพอื่นที่ให้พลังงานสูงกว่ามีเทน และการผลิตใช้เวลาสั้นกว่า ก็ือก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogen, H₂) ซึ่งถือได้ว่าเป็นพลังงานเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้ที่มีประสิทธิภาพสูง สะอาดและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ได้รับการคาดหมายว่าจะเป็นแหล่งของพลังงานเชื้อเพลิงที่สำคัญมากในอนาคต

เทคโนโลยีในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนแบ่งได้เป็น 3 เทคโนโลยีหลัก ได้แก่ Thermal processes, Electrolytic processes และ Photolytic processes เป็นการใช้พลังงานแสงเพื่อแยกน้ำเป็นไฮโดรเจนและออกซิเจน ซึ่งในปัจจุบันการผลิตก๊าซไฮโดรเจนในเชิงพาณิชย์ จะผลิตจากก๊าซธรรมชาติโดยวิธี Stream reforming เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ถูกที่สุดและเป็นกระบวนการที่ใหญ่ที่สุดสำหรับการผลิตพลังงานไฮโดรเจน แต่ปัญหาหลักที่สำคัญมากของกระบวนการนี้คือ การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณมากซึ่งเป็นสาเหตุของสภาวะโลกร้อน หรือปรากฏการณ์เรือนกระจก นอกจากนี้แล้วยังประสบปัญหาการขาดแคลนแหล่งของไฮโดรคาร์บอนที่นำมาใช้ในกระบวนการ ซึ่งทำให้มีต้นทุนในการผลิตค่อนข้างสูง ดังนั้นกระบวนการอื่นซึ่งเป็นทางเลือกใหม่ที่ปลอดภัย และสามารถผลิตพลังงานไฮโดรเจนได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงควรได้มีการพัฒนาขึ้นเพื่อรองรับความต้องการพลังงานไฮโดรเจนในอนาคต โดยการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากการหมัก

แบบไม่ใช้ออกซิเจนในสภาวะไร้แสง (Dark fermentation) จะเป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถประหยัดต้นทุนและยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมด้วย

การเกิดก๊าซไฮโดรเจนจำเป็นต้องมีการยับยั้งแบคทีเรียสร้างมีเทน เนื่องจากแบคทีเรียผลิตกรด (Acidogenic bacteria) จะมีการสร้างสปอร์ที่มีความสามารถในการทนต่อสภาพต่างๆ ได้ดี ซึ่งแบคทีเรียผลิตมีเทน (Methane producing bacteria, MPB) จะไม่มีการสร้างสปอร์ ทำให้มีการคัดกรองแบคทีเรียเพื่อทำให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนได้ดี ในปัจจุบันการศึกษาสำหรับการคัดกรองแบคทีเรียชนิดที่ผลิตไฮโดรเจนจากกากตะกอน ส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วยวิธีการคัดกรองแบคทีเรียชนิดที่ผลิตไฮโดรเจนโดยการปรับสภาพความร้อน (Heat treatment), กรด (Acid treatment), ด่าง (Base treatment), การเติมอากาศ (Aeration), การแช่แข็งและละลาย (Freezing and thawing), คลอโรฟอร์ม (Chloroform) , sodium 2-bromoethanesulfonate หรือ 2-bromoethanesulfonic acid และ iodopropane ในปัจจุบัน ได้มีการศึกษาเปรียบเทียบหลายวิธีการในการปรับสภาพต่างๆ กัน

โรงงานอุตสาหกรรมแปรรูปทางการเกษตร เช่น โรงงานแป้งมันสำปะหลัง โรงงานอาหารและเครื่องดื่ม โรงงานน้ำมันปาล์ม โรงงานสุราและเบียร์ โรงงานกระดาษ โรงงานเอทานอล จัดเป็นโรงงานที่มีน้ำเสียความเข้มข้นสารอินทรีย์สูง สามารถนำน้ำเสียมาผลิตก๊าซชีวภาพที่ให้ผลคุ้มค่าในเชิงพาณิชย์ สำหรับโรงงานแป้งมันสำปะหลัง จัดเป็นกลุ่มอุตสาหกรรมที่มีศักยภาพสูงสุดที่ได้รับการส่งเสริมและสนับสนุนให้มีการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสีย เนื่องจากเป็นน้ำเสียที่ย่อยสลายง่าย มีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ต่ำ มีคุณสมบัติและปริมาณที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ และสามารถนำก๊าซชีวภาพไปใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดโดยมีการลงทุนน้อยที่สุด นอกจากนี้ยังช่วยลดผลกระทบสิ่งแวดล้อมในเรื่องก๊าซเรือนกระจก และลดระดับกลิ่นรบกวนลงได้มาก

โดยทั่วไป แป้งมันสำปะหลัง 1 ตัน ก่อให้เกิดน้ำเสียประมาณ 10 – 20 ลูกบาศก์เมตร และมีภาระความสกปรกของสารอินทรีย์สูง (ปริมาณบีโอดี ประมาณ 55 - 200 กิโลกรัม ปริมาณซีโอดี ประมาณ 130 - 400 กิโลกรัม ปริมาณสารแขวนลอย ประมาณ 40 - 140 กิโลกรัม ฟอสฟอรัส ทั้งหมดประมาณ 0.2 - 0.6 กิโลกรัม และไนโตรเจนทั้งหมดประมาณ 3 - 10 กิโลกรัม) นอกจากนี้กระบวนการผลิตยังก่อให้เกิดสิ่งปฏิจุลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วในรูปของแข็ง ได้แก่ เปลือก ราก และกากมันสำปะหลัง ซึ่งเมื่อเทียบปริมาณความสกปรกที่เกิดจากน้ำเสียของโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังกับปริมาณความสกปรกจากประชากรพบว่า โรงงานอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังชนิด Native starch โดยทั่วไปจำนวนหนึ่งแห่ง ที่มีกำลังการผลิตเฉลี่ย 100-200 ตันแป้งต่อวัน ทำให้เกิดน้ำเสียที่มีความสกปรกเทียบเท่าประชากรจำนวน 92,000-680,000 คน ในแต่ละกระบวนการส่งผลให้เกิดมลพิษทั้งทางน้ำ อากาศ และเศษวัสดุเหลือทิ้ง จึงต้องมีแนวทางในการจัดการที่แตกต่างกัน

ออกไป ในการจัดการมลพิษทางน้ำสามารถทำได้โดยการติดตั้งระบบบำบัด ระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงงานแป่งมันสำปะหลังที่นิยมใช้กันมากในประเทศไทยจากเดิม คือ ระบบบ่อหมัก และบ่อปรับเสถียร โดยในปัจจุบันได้ใช้กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียที่มีอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์สูง เช่น ระบบ UASB, ABR หรือ Covered Lagoon เป็นต้น

(<http://www.thailandtapiocastarch.net/technology-detail/>, ธันวาคม 2553)

งานวิจัยในครั้งนี้จึงศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตก๊าซไฮโดรเจน (H_2) จากน้ำเสีย ซึ่งใช้น้ำเสียจากโรงงานผลิตแป่งมันสำปะหลังและใช้ตะกอนจุลินทรีย์ผสม (Mixed culture) ของโรงงานภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนโดยมีการคัดกรองแบคทีเรียในวิธีต่างๆ

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาการผลิตก๊าซไฮโดรเจนและการลดปริมาณสารอินทรีย์โดยวิธีการทางชีวภาพ เพื่อให้ได้วิธีการที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากน้ำเสียโรงงานแปรงมันสำปะหลัง ซึ่งตะกอนจุลินทรีย์ผสมของโรงงานแปรงมันสำปะหลัง ภายใต้สภาวะไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic process) และสภาวะไร้แสง (Dark fermentation) โดยศึกษาถึง

1. การผลิตไฮโดรเจนด้วยน้ำเสียจากโรงงานแปรงมันสำปะหลัง ด้วยการเดินระบบแบบเดิมครั้งเดียว (Batch process) ใช้ตะกอนจุลินทรีย์จากโรงงานแปรงมันสำปะหลัง เมื่อตะกอนจุลินทรีย์ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีต่างๆ
2. สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไฮโดรเจน ในด้านสัดส่วนมวลตะกอนจุลินทรีย์ต่อความสกปรกอินทรีย์ในรูป Cell: COD ความสามารถของตะกอนจุลินทรีย์ (Activity) ในการเริ่มต้นการหมักและ pH เริ่มต้นของน้ำเสียที่ส่งผลต่อการผลิตไฮโดรเจน
3. ก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นในรูปปริมาตรไฮโดรเจน ผลผลิตไฮโดรเจน (H_2 yield) และอัตราการผลิตไฮโดรเจนจำเพาะ (Specific hydrogen production rate)
4. ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียของระบบ โดยพิจารณาจากความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ในรูป COD (%COD degraded)

ขอบเขตการวิจัย

1. เก็บตัวอย่างจากกลุ่มตะกอนจุลินทรีย์ผสม (Mixed culture sludge) จากโรงงานแปรงมันสำปะหลังมาทำการศึกษา โดยใช้ตัวอย่างตะกอนจุลินทรีย์และน้ำเสียจากโรงงานของ บริษัท โซโซ-ไฮยวัฒน์อุตสาหกรรม จำกัด อำเภอบางละมุง จังหวัดชลบุรี
2. ใช้น้ำเสียโรงงานแปรงมันสำปะหลังเป็น Substrate ในการศึกษา โดยความเข้มข้นของน้ำเสียมีค่า COD ประมาณ 29,300 mg/l ซึ่งเป็นความเข้มข้นจริงจากโรงงาน
3. การศึกษาจะทำในระดับห้องปฏิบัติการด้วยขนาดถังปฏิกรณ์ระดับห้องปฏิบัติการ (Lab scale) และเดินระบบแบบ Batch process กระบวนการหมักในสภาวะไม่ใช้ออกซิเจนและไร้แสง

การตรวจเอกสาร

ไฮโดรเจน

พลังงานไฮโดรเจนไม่ใช่เป็นเรื่องใหม่แต่มีการใช้มานานตั้งแต่ปี 1950 โดยร้อยละ 50 ของไฮโดรเจนใช้ในอุตสาหกรรมผลิตสารเคมี โลหะ และอาหาร อีกร้อยละ 50 ใช้ในระดับครัวเรือน ไฮโดรเจนเป็นพลังงานสะอาดเป็นประโยชน์กับสิ่งแวดล้อมเนื่องจากไม่เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

กระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนได้รับการพัฒนาจากการเปลี่ยนสารอินทรีย์ให้เป็นไฮโดรเจนแทนที่จะเป็นมีเทน ไฮโดรเจนเป็นที่นิยมมากกว่ามีเทนด้วยเหตุผล 2 ประการ ประการแรกคือ ไฮโดรเจนมีการใช้งานอย่างกว้างขวางในงานอุตสาหกรรมมากกว่ามีเทน มันสามารถใช้สำหรับการสังเคราะห์แอมโมเนีย แอลกอฮอล์และแอลดีไฮด์รวมทั้งสำหรับปฏิกิริยาของน้ำมัน, ปิโตรเลียม, ถ่านหินและน้ำมันดินดินดาน (Hart, 1997) ในขณะที่ก๊าซมีเทนส่วนใหญ่ใช้เป็นเชื้อเพลิง ประการที่สองไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงที่เมื่อมีการเผาไหม้จะมีผลผลิตเป็นน้ำเท่านั้น มันสามารถนำมาใช้โดยตรงในเครื่องยนต์เผาไหม้ภายในหรือใช้ในการผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิง (Hart, 1997; Dincer, 2002; Dunn, 2002; Iwasaki, 2003) ผู้เชี่ยวชาญด้านพลังงานไฮโดรเจนหลายคนเชื่อว่าไฮโดรเจนจะเป็นพลังงานในรุ่นถัดจากเชื้อเพลิงฟอสซิล (Hoffmann, 2001; Rocha *et al.*, 2001) บางคนคาดการณ์ว่าเศรษฐกิจใหม่จะเติบโตด้วยไฮโดรเจน โดยพื้นฐานจะเปลี่ยนลักษณะของตลาด การเมืองและสถาบันทางสังคมเช่นเดียวกับถ่านหินในศตวรรษที่ 19 และน้ำมันปิโตรเลียมในศตวรรษที่ 20 (Rifkin, 2002; Winter, 2004) นอกจากนี้ก๊าซมีเทนเป็นก๊าซเรือนกระจกที่มีผลต่อการดักจับความร้อนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (IPCC, 1996; US EPA, 2005)

การผลิตไฮโดรเจน

เทคโนโลยีในการผลิตไฮโดรเจน สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 เทคโนโลยีหลัก ได้แก่

Thermo Chemical Processes, Electro Chemical Processes และ Photolytic Processes

1. Thermo-chemical Process (กระบวนการความร้อนเคมี) ไฮโดรเจนสามารถผลิตได้โดยวิธีทางเคมีโดยใช้ความร้อน มีวัตถุดิบหลักที่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เช่น ก๊าซธรรมชาติ ถ่านหิน ชีวมวล เป็นต้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือก๊าซสังเคราะห์ซึ่งประกอบด้วย ไฮโดรเจน(H_2)

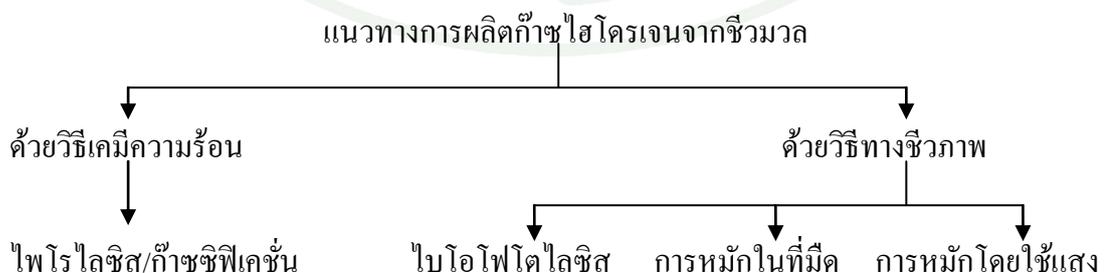
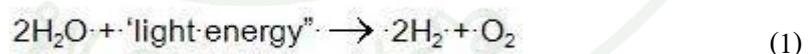
คาร์บอนมอนอกไซด์(CO) คาร์บอนไดออกไซด์(CO₂) น้ำ(H₂O) และมีเทน(CH₄) จากนั้นจะผ่านกระบวนการเพิ่มเติมเพื่อทำให้ได้ไฮโดรเจนที่บริสุทธิ์ขึ้น ซึ่งการผลิตไฮโดรเจนโดยกระบวนการความร้อนเคมี ได้แก่ กระบวนการรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำ (Steam Reforming) กระบวนการก๊าซซิฟิเคชัน (Gasification) ปัจจุบันการผลิตไฮโดรเจนจากกระบวนการรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำจากก๊าซธรรมชาติเป็นกระบวนการที่ใช้กันแพร่หลายในเชิงพาณิชย์ ซึ่งในประเทศไทยใช้กระบวนการนี้ในการผลิตไฮโดรเจนเพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นในอุตสาหกรรมต่างๆ

2. Electro-chemical Process (กระบวนการไฟฟ้าเคมี) เป็นการใช้ไฟฟ้าเพื่อแยกน้ำเพื่อให้ได้ไฮโดรเจนและออกซิเจน โดยไฟฟ้าที่มาจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าทุกชนิดสามารถใช้ได้กับกระบวนการนี้ ไม่ว่าจะเป็นไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานหมุนเวียน รวมทั้งจากพลังงานนิวเคลียร์

3. Bio-chemical Process (กระบวนการชีวเคมี) กระบวนการนี้เป็นการผลิตไฮโดรเจนโดยการใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพื่อแยกน้ำเป็นไฮโดรเจนและออกซิเจน มีการใช้แสงแดดและกระบวนการทางชีวภาพของสาหร่ายเซลล์เดียวและแบคทีเรียในการแยกน้ำให้ เป็นไฮโดรเจนและออกซิเจน จัดว่าเป็น “เทคโนโลยีสีเขียว” เนื่องจากมีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

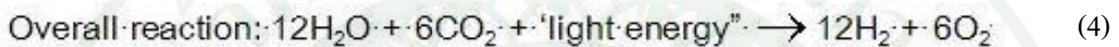
กระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนด้วยวิธีทางชีวภาพ แบ่งออกเป็นได้หลายวิธี ดังแสดงในรูปที่ 1 กระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนด้วยวิธีทางชีวภาพหลักๆ นั้นมีทั้งสิ้น 4 วิธี คือ

3.1 วิธีไบโอโฟโตไลซิสทางตรง (Direct Biophotolysis) เป็นกระบวนการที่มักพบในการสังเคราะห์แสงของพืชและสาหร่าย เช่น สาหร่ายสีเขียว (green algae) โดยมีการใช้แสงเป็นแหล่งพลังงานเปลี่ยนน้ำให้เป็นก๊าซไฮโดรเจนและออกซิเจน ดังสมการ

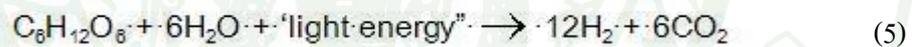


ภาพที่ 1 แนวทางการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากชีวมวล

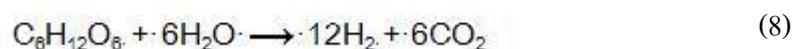
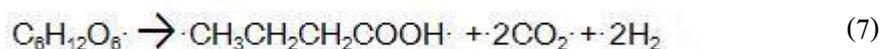
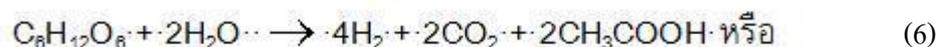
3.2 วิธีไบโอโฟโตไลซิสทางอ้อม (Indirect Biophotolysis) เป็นการผลิตก๊าซไฮโดรเจนด้วยไซยาโนแบคทีเรีย (cyanobacteria) ซึ่งมักรู้จักกันในชื่อสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (blue-green algae) โดยจะแยกปฏิกิริยาออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรก ไซยาโนแบคทีเรียจะใช้คาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศเป็นแหล่งคาร์บอนและแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงาน เพื่อผลิตออกซิเจนและน้ำตาลเพื่อใช้ในการผลิตไฮโดรเจนในปฏิกิริยาที่สอง ต่อไป ดังสมการ



3.3 วิธีการหมักโดยใช้แสง (Photo-fermentation) ใช้แบคทีเรียกลุ่ม Photosynthesis bacteria เช่น *Rhodobacter sphaeroides* ซึ่งจะใช้เอนไซม์ไนโตรจีเนส (nitrogenase) ร่วมกับแสงอาทิตย์ในการย่อยสลายกรดอินทรีย์ (organic acids) เช่น กรดอะซิติกให้กลายเป็นก๊าซไฮโดรเจนภายใต้สภาวะไร้อากาศ โดยมีการถ่ายเทอิเล็กตรอนผ่านเฟอร์รีดอกซิน (Ferredoxin) ไปสู่เอนไซม์ ไนโตรจีเนสเพื่อสร้าง ATP มีปฏิกิริยาเป็นไปดังสมการ



3.4 วิธีการหมักในที่มืด (Dark fermentation) เป็นกระบวนการหมัก anaerobic bacteria และสาหร่ายบางชนิดที่เจริญเติบโตในสภาวะที่ไร้แสง กระบวนการหมักจะเปลี่ยนสารที่มีปริมาณคาร์โบไฮเดรตสูงไปเป็นก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ กระบวนการหมักจะเกิดผ่านกลไกของปฏิกิริยาของ pyruvate เพื่อสร้าง acetyl-CoA และคาร์บอนไดออกไซด์ โดยมีเฟอร์รีดอกซินทำหน้าที่เป็นสารออกซิไดซ์ จากนั้นในขั้นตอนต่อไปเฟอร์รีดอกซินจะถูกออกซิไดซ์กลับมาอยู่ในรูปแบบเดิมพร้อมกับสร้างก๊าซไฮโดรเจนขึ้นมา ปฏิกิริยารวมเป็นดังนี้



อย่างไรก็ตาม กระบวนการทางชีวภาพยังมีข้อจำกัดอยู่บ้าง คือ อัตราการผลิตไฮโดรเจนยังต่ำและเทคโนโลยีในปัจจุบันยังต้องการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ในปัจจุบันมีผู้ทำการศึกษาถึงผลของปัจจัยต่างๆ อาทิเช่น ชนิดของเชื้อจุลินทรีย์ ชนิดของซับสเตรท อุณหภูมิของระบบ ตลอดจนวิธีการเริ่มต้นดำเนินระบบ เพื่อเพิ่มอัตราการผลิตไฮโดรเจนให้ได้มากที่สุดอย่างต่อเนื่อง ดังนั้น การศึกษาและการพัฒนากระบวนการสำหรับการผลิตก๊าซไฮโดรเจนด้วยวิธีทางชีวภาพอาจจะเป็นกุญแจสำคัญในการแก้ ปัญหาทางด้านวิกฤติพลังงาน ลดปัญหาสภาวะเรือนกระจกและยังสามารถนำของเสียอินทรีย์มาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด นอกจากนี้ปัญหาด้านการออกแบบถังปฏิกรณ์ ด้านความปลอดภัยของระบบการเก็บกักและการขนส่งก็เป็นสิ่งที่จะต้องให้ความสำคัญเป็นอย่างยิ่งควบคู่ไปกับการพัฒนากระบวนการผลิต เนื่องจากก๊าซไฮโดรเจนนั้นเป็นก๊าซที่เบาและสามารถติดไฟได้ง่าย

กระบวนการแต่ละกระบวนการมีข้อดีข้อด้อยแตกต่างกันไปตามเงื่อนไขสภาพแวดล้อม แต่กระบวนการที่มีความเป็นไปได้มาก คือ กระบวนการ dark fermentation เนื่องจากมีความคล้ายคลึงกับกระบวนการย่อยสลายของแบคทีเรียไม่ใช้ออกซิเจนที่ใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพจากการบำบัดน้ำเสียหรือการหมักของเสียต่างๆ เพียงแต่มีการปรับเปลี่ยนขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการไม่ให้มีการผลิตก๊าซมีเทนแต่ผลิตก๊าซไฮโดรเจนแทน และต้องควบคุมกระบวนการให้ได้สภาวะที่เหมาะสมได้แก่

1. ค่าความเป็นกรดด่าง (pH) เป็นหนึ่งในพารามิเตอร์ของกระบวนการที่สำคัญในการผลิตไฮโดรเจนเพราะมีผลต่อกิจกรรมของ hydrogenase โดยตรง (Dabrock *et al.*, 1992) รวมทั้งกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วย (Lay., 2000) นอกจากนี้ยังเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างยิ่งสำหรับการยับยั้งกิจกรรมของแบคทีเรียที่บริโภคไฮโดรเจนอีกด้วย (Chen *et al.*, 2002) โดยค่า pH ที่เหมาะสมในการผลิตไฮโดรเจนจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ความเข้มข้นของสารตั้งต้น ชนิดของสารตั้งต้น อุณหภูมิ เวลา

2. อุณหภูมิ ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของแบคทีเรียแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วงคือช่วงเทอร์โมฟิลิก (Thermophilic) จะมีอุณหภูมิประมาณ 50-65 องศาเซลเซียส ช่วงมีโซฟิลิก (Mesophilic) จะมีอุณหภูมิประมาณ 20-45 องศาเซลเซียส ช่วงไซโครฟิลิก (Psychrophilic) จะมีอุณหภูมิประมาณ 5-15 องศาเซลเซียส การบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนในช่วงเทอร์โมฟิลิก แบคทีเรียจะมีอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์และการผลิตก๊าซชีวภาพสูงกว่าในช่วงมีโซฟิลิก โดยสามารถทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้เร็วกว่าช่วงมีโซฟิลิกประมาณ 20-50% แต่สำหรับประเทศไทยแม้ว่าประสิทธิภาพของระบบในช่วงมีโซฟิลิกจะด้อยกว่า แต่เมื่อเทียบในเรื่องของค่าใช้จ่าย

พบว่าค่าใช้จ่ายในการทำความร้อนจะแพงมาก ทำให้ผู้ออกแบบในประเทศไทยไม่นิยมที่จะออกแบบระบบบำบัดให้อยู่ในช่วงเทอร์โมฟิลิก

3. สารอาหาร สารอาหารในน้ำเสียมีความสัมพันธ์โดยตรงกับชนิดของแบคทีเรียในระบบ รวมไปถึงประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียและผลิตก๊าซ โดยพบว่าสารอาหารที่ต่างชนิดกันมีผลต่ออัตราการย่อยสลายที่แตกต่างกัน โดยสารอาหารจำพวกคาร์โบไฮเดรตจะให้อัตราการย่อยสลายที่เร็วกว่าโปรตีนและไขมัน

กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน

สารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำเสียจะเป็นสารประกอบจำพวก โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และไขมัน ทั้งที่อยู่ในรูปของแข็งและสารละลาย กระบวนการย่อยสารอินทรีย์ในน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอน (ภาพที่ 2) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 : Solubilisation หรือ Hydrolysis

ขั้นตอนที่ 2 : Acidogenesis

ขั้นตอนที่ 3 : Acetogenesis

ขั้นตอนที่ 4 : Methanogenesis

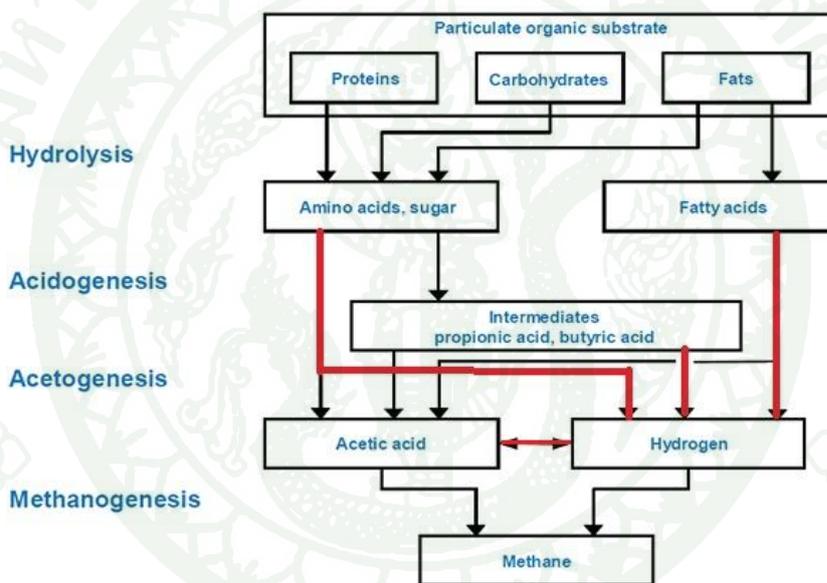
โดยอาจแบ่งขั้นตอนในการย่อยสลายได้เป็นสองระดับ ตามผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการย่อยสลายคือการย่อยสลายแบบไม่มีการสร้างก๊าซมีเทน และการย่อยสลายแบบที่มีการสร้างก๊าซมีเทน

1. การย่อยสลายแบบไม่มีการสร้างก๊าซมีเทน

ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียจะต้องทำการเปลี่ยนโมเลกุลขนาดใหญ่ของสารอินทรีย์จำพวก โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และไขมัน ให้มีขนาดเล็กลงจนถึงขั้นของกรดไขมันระเหยง่ายขนาดเล็กเช่นกรดอะซิติก (CH_3COOH) ซึ่งขั้นตอนนี้เรียกรวมกันว่าเป็นขั้นตอนการสร้างกรด (Acid formation phase) โดยกลไกการสร้างกรดแบ่งออกได้เป็นสองส่วนคือกระบวนการที่เกิดขึ้นภายนอกเซลล์และกระบวนการที่เกิดขึ้นภายในเซลล์

การย่อยสลายภายนอกเซลล์ ได้แก่ ขั้นตอนที่ 1 คือ กระบวนการ Hydrolysis สารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต ไขมันและโปรตีน จะถูกแบคทีเรียย่อยสลายโดยใช้เอนไซม์ที่ถูกปล่อยออกมาภายนอกเซลล์ (Extracellular enzyme) ให้กลายเป็นสารประกอบเชิงเดี่ยว (Monomer) สำหรับใช้ในกระบวนการสร้างกรด แบคทีเรียที่ทำหน้าที่ในการย่อยสลายคือแบคทีเรีย

จำพวกแฟลคคัลเททีฟแอนแอโรบิกแบคทีเรีย (Facultative anaerobic bacteria) โดยกลุ่มของแบคทีเรียในขั้นตอนนี้ แบ่งได้ตามชนิดของเอนไซม์ที่ใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์คือ Cellulytic, Lipolytic และ Proteolytic สำหรับความเร็วของกระบวนการย่อยสลายในขั้นตอนนี้ขึ้นอยู่กับเอนไซม์ที่ถูกปล่อยออกมาจากแบคทีเรีย ซึ่งเอนไซม์ที่ปล่อยออกมาจะเลือกชนิดของปฏิกิริยา ชนิดของสารที่เข้าทำปฏิกิริยา รวมถึงการทำงานของเอนไซม์ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการเช่น ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ ความเข้มข้นของเอนไซม์ อุณหภูมิ และการสัมผัสระหว่างเอนไซม์กับสารอินทรีย์ เป็นต้น จากการศึกษากระบวนการแตกสลายโพลีเมอร์จากของเสียหลายๆประเภท พบว่าการย่อยสลายโดยใช้แบคทีเรียหลายชนิดร่วมกันจะได้ผลดีมากกว่าการย่อยสลายโดยใช้แบคทีเรียเพียงชนิดเดียว (Diaz *et al.*, 1993)



ภาพที่ 2 ขั้นตอนการย่อยสลายของกระบวนการย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจน

ที่มา: The Waste-to-Energy Research and Technology Council (2009)

หลังจากเกิดกระบวนการย่อยสลายภายนอกเซลล์ การย่อยสลายก็จะเข้าสู่ขั้นตอนการย่อยสลายภายในเซลล์ ซึ่งได้แก่ขั้นตอนที่ 2 และขั้นตอนที่ 3 โดยในขั้นตอนที่ 2 หรือการเกิดกระบวนการ Acidogenesis การย่อยสลายในขั้นตอนนี้จะใช้สารที่ได้จากการย่อยสลายในขั้นตอนแรกเป็นสารตั้งต้น สำหรับแบคทีเรียประเภทสร้างกรด โดยแบคทีเรียกลุ่มนี้จะเปลี่ยนสารอาหารดังกล่าวให้เป็นกรดอินทรีย์ชนิดโมเลกุลเล็ก เช่น กรดอะซิติก (Acetic acid) กรดไพรูไวโอนิก

(Propionic acid) กรดวาเลอริก (Valeric acid) และกรดแลคติก (Lactic acid) โดยกรดที่เกิดขึ้นทั้งหมดมีส่วนส่วนของกรดอะซิติกสูงสุด และมีการเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นในขั้นตอนนี้ด้วย แบคทีเรียสร้างกรดมีอัตราการเจริญเติบโตสูงและทนทานต่อสภาพแวดล้อมได้ดี เป็นผลสืบเนื่องมาจากการอยู่ร่วมกันของแบคทีเรียหลายสปีชีส์ (Species) กรณีที่กลุ่มของแบคทีเรียสร้างกรดมีการสร้างกรดมากเกินไป จะก่อให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับระบบผลิตก๊าซชีวภาพโดยรวม เนื่องจากแบคทีเรียสร้างมีเทนถูกยับยั้งการทำงาน เนื่องจากกรดที่มากเกินไปให้ค่าพีเอชของระบบลดลงและส่งผลกระทบต่อการทำงานของกลุ่มแบคทีเรียสร้างมีเทนได้ สำหรับแบคทีเรียที่อยู่ในขั้นตอนของการสร้างกรด (Acidogenesis) คือแบคทีเรียในกลุ่มของ Fermentative Bacteria หรือ Acidogens ซึ่งเป็นแบคทีเรียที่สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยา Hydrolysis ได้อีกด้วย

การกำหนดชนิดของผลผลิตในขั้นตอนนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 ประการคือ ชนิดของสารตั้งต้น ซึ่งได้จากขั้นตอนที่ 1 และความดันย่อยของก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogen Partial Pressure) ยกตัวอย่างเช่นในการย่อยสลายของกลูโคส ในสถานะที่ความดันย่อยของก๊าซไฮโดรเจนมีค่าต่ำ (Low Hydrogen Partial Pressure) ผลผลิตที่ได้คือกรดอะซิติก ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แต่ถ้าในสถานะที่มีความดันย่อยของก๊าซไฮโดรเจนมีค่าสูง (High Hydrogen Partial Pressure) ผลผลิตที่ได้จะอยู่ในรูปของกรดอะซิติก กรดโพรพิออนิก คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน ดังตัวอย่างในปฏิกิริยา

สภาวะ Low Hydrogen Partial Pressure



สภาวะ High Hydrogen Partial Pressure



สำหรับการเกิดปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ 3 หรือการเกิดกระบวนการ Acetogenesis นั้น เป็นผลอันเนื่องมาจากแบคทีเรียสร้างมีเทนต้องการสารอาหารที่มีความเฉพาะเจาะจงสูง โดยสารอาหารที่แบคทีเรียสร้างมีเทนสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ประกอบไปด้วย กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก ไฮโดรเจน เมทานอล และเมธิลลามีน แต่ไม่สามารถใช้กรดไขมันระเหยง่ายที่มีคาร์บอนอะตอมเกินกว่าสองอะตอม เช่น กรดโพรพิออนิก กรดบิวทริก เป็นสารอาหารในการผลิตก๊าซมีเทนโดยตรงได้ ดังนั้นในกรณีที่กรดไขมันระเหยง่าย (Volatile Fatty Acid) ที่สร้างขึ้นยังอยู่ในรูปของกรดอินทรีย์ที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม แบคทีเรียสร้างมีเทนไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เกิดการสะสม

ของกรดอินทรีย์ในระบบ เพื่อให้ระบบอยู่ในสภาพที่เหมาะสมต่อการดำรงชีพของแบคทีเรีย จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องทำการย่อยสลายกรดอินทรีย์เหล่านั้นให้มีอะตอมของคาร์บอนที่ลดลง เพื่อให้ปฏิกิริยาดำเนินต่อไปได้ แบคทีเรียกลุ่มหนึ่งที่สามารถย่อยสลายกรดไขมันระเหยง่ายที่มีคาร์บอนอะตอมมากกว่า 2 อะตอมให้เป็นกรดอะซิติก ได้แก่ แบคทีเรียที่สร้างไฮโดรเจน (Hydrogen Producing Acetogenic Bacteria) ผลผลิตที่ได้ประกอบไปด้วยกรดอะซิติก คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน โดยปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ดีในภายใต้สภาวะ Low Hydrogen Partial Pressure ดังสมการ



นอกจากการสร้างกรดด้วยกระบวนการทั้งสองชนิดแล้ว ยังพบว่ามีแบคทีเรียบางกลุ่มที่สามารถสร้างกรดอะซิติกได้จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนดังสมการ



2. กระบวนการย่อยสลายแบบที่มีการสร้างมีเทน

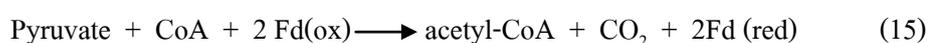
กระบวนการนี้เกิดขึ้นเฉพาะในขั้นตอนที่ 4 เรียกว่ากระบวนการ Methanogenesis โดยที่กรดอินทรีย์โมเลกุลเล็ก ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ที่เกิดจากขั้นตอนการสร้างกรดจะถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยแบคทีเรียชนิดสร้างก๊าซมีเทน (Methane Forming Bacteria)

การผลิตก๊าซไฮโดรเจนจึงเป็นที่สนใจในการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีในการผลิตในต่างประเทศมากขึ้นการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากกระบวนการชีวภาพ เป็นวิธีการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่มีออกซิเจนในขั้นตอนการสร้างกรด โดยที่เอนไซม์ (Enzymes) 2 ชนิดในการย่อยสลายดังนี้

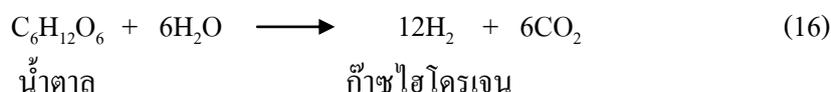
ก. Pyruvate: formate lyase (PFL)



ข. Pyruvate: ferredoxin (avodoxin) oxido reductase (PFOR)



ตามทฤษฎีสามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจน 12 โมล จาก 1 โมลของกลูโคส ดังสมการ



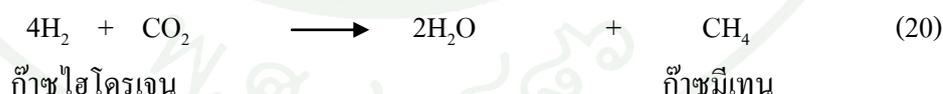
แต่ถ้าพิจารณาทางด้านเทอร์โมไดนามิกส์กระบวนการนี้จะให้ไฮโดรเจนสูงเพียง 4 โมล และกรดอะซิติก 2 โมล ดังแสดงในสมการ



แต่จากผลการทดลองพบว่า ไฮโดรเจนที่ผลิตได้อยู่ในช่วง 2-3 โมลต่อ 1 โมลของกลูโคส ทั้งนี้เนื่องจาก ปฏิกิริยาเกิดกรดบิวทิริก ดังสมการ



และยังพบว่ามีปฏิกิริยาการใช้ไฮโดรเจน 2 ปฏิกิริยา ได้แก่ ปฏิกิริยาการเกิดกรดโพรไพโอนิกและปฏิกิริยาเกิดก๊าซมีเทน (Methanogenesis) ดังสมการ



จะเห็นได้ว่ามีหลายปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการหมักกรด (Acidogenesis) ดังนั้นถ้าต้องการผลิตก๊าซไฮโดรเจนให้ได้ในปริมาณสูง จึงจำเป็นต้องควบคุมให้เกิดเฉพาะปฏิกิริยาที่ผลิตกรดอะซิติกและกรดบิวทิริก ในขณะที่เดียวกันต้องยับยั้งปฏิกิริยาที่ใช้ก๊าซไฮโดรเจน โดยต้องควบคุมไม่ให้มีปริมาณของกรดโพรไพโอนิกมากเกินไป และไม่ควรมีการผลิตก๊าซมีเทนร่วมด้วยในการผลิตก๊าซไฮโดรเจน กระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยวิธีหมักนี้มีความเป็นไปได้ในทางเทคนิคและมีความเหมาะสมอย่างมาก เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นก่อนการเกิดก๊าซมีเทนในกระบวนการหมักในสภาวะไร้อากาศ และสามารถใช้กับของเสียต่างๆ ได้ โดยไม่ต้องการแสงใน

การทำงาน ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นประกอบด้วยก๊าซไฮโดรเจนร้อยละ 30-40 และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 60-70 (www.eng.mut.ac.th, มกราคม 2553)

แบคทีเรียชนิดที่ผลิตไฮโดรเจน

แบคทีเรียที่ใช้หมักเพื่อผลิตไฮโดรเจนจำนวนมากถูกใช้เป็นตัวกลางในการนำพาพลังงาน และเป็นตัวจัดเก็บในเซลล์ การผลิตไฮโดรเจนเป็นกลไกที่เฉพาะเจาะจงที่จะจัดการกับอิเล็กตรอนส่วนเกินผ่านการทำงานของ hydrogenase ในแบคทีเรีย โดยแบคทีเรียจะเป็นแบคทีเรียประเภท anaerobe (*Clostridia*, *Methylotrophs*, *Rumen bacteria*, *Methanogenic bacteria*, *Archaea*), facultative anaerobe (*Escherichia coli*, *Enterobacter*, *Citrobacter*) และแม้แต่ aerobe (*Alcaligenes*, *Bacillus*) Nandi and Sengupta (1998) ได้รายงานผลการศึกษาที่ครอบคลุมเกี่ยวกับลักษณะการผลิตไฮโดรเจนของแบคทีเรียเหล่านี้

แบคทีเรียชนิดที่เกี่ยวข้องกับการผลิตไฮโดรเจนได้แก่ Green algae, Cyanobacteria, Thermophilic bacteria, Photosynthetic bacteria และ Fermentative bacteria

1. Green algae การผลิตไฮโดรเจนโดย Green algae โดยการสังเคราะห์แสง ไฮโดรเจนเป็นพลังงานทางเลือกซึ่งโดยทั่วไปแล้วพลังงานทางเลือกหรือพลังงานสนับสนุน (sustainable energy) มาจากพลังงานทดแทน (renewable source) เช่น ดวงอาทิตย์ ลม น้ำและชีวมวล เป็นที่ทราบกันมานานกว่า 70 ปีแล้วว่า green algae อย่างเช่น *Scenedesmus obliquus* สามารถผลิตไฮโดรเจนได้ แต่กระบวนการนี้ไม่มีประสิทธิภาพเพราะเกิดออกซิเจนด้วย ซึ่งจะไปยังยังเอนไซม์ hydrogenase ดังนั้นในช่วง light reaction มีการสะสมออกซิเจนมีผลยับยั้งการผลิตไฮโดรเจน การสร้างไฮโดรเจนโดยสาหร่ายสีเขียวและน้ำเงินแกมเขียวจึงเกี่ยวข้องกับการเกิดน้ำ (biophotosynthesis) ไฮโดรเจนและออกซิเจน สาหร่ายสีเขียวจึงเป็นจุลินทรีย์ที่ผลิตไฮโดรเจนที่สำคัญ

2. Cyanobacteria การผลิตไฮโดรเจนจาก *Chlamydomonas reinhartii* ซึ่งสามารถเจริญอยู่ได้ถึงแม้จะมีซัลเฟอร์ในปริมาณจำกัด นอกจากนี้ยังมี cyanobacteria (สาหร่ายสีน้ำเงินแกมเขียว) และแบคทีเรีย สังเคราะห์แสง เช่น *Rhodobacter sphaeroides* ก็ผลิตไฮโดรเจนได้เช่นกัน โดยทั่วไปเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการสร้างไฮโดรเจนโดย cyanobacteria มีอยู่ด้วยกัน 3 ชนิด ได้แก่ nitrogenase, membrane-bound hydrogenase และ soluble hydrogenase

Anabaena PCC 7120 และ *Anabaena* AMC 414 เป็น cyanobacterium ที่พิสูจน์แล้วว่าสามารถผลิตไฮโดรเจน การผลิตไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้นและการผลิตไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ argon แทนอากาศ

3. Thermophilic bacteria เป็นจุลินทรีย์ที่สามารถผลิตไฮโดรเจนได้จากคาร์โบไฮเดรต ซึ่งมีคุณสมบัติเป็น hyperthermophilic และ anaerobic โพลีแซคคาไรด์และ lignocellulose สารอินทรีย์ถูกย่อยสลายได้ไฮโดรเจน และ acetic acid ซึ่ง hyper-thermophilic bacteria จากนั้น acetic acid จะถูกเปลี่ยนเป็นไฮโดรเจน โดย mesophilic photoheterotrophic bacteria ของเสียสารอินทรีย์ถูกเปลี่ยนเป็นไฮโดรเจนโดย *R. capsulatus* และ *thermohydrogenium kirishis* โดยใช้กลูโคสเป็นสารอาหาร *Caldicellulosiruptor saccharolyticus* และ *Thermotoga elfii* เป็นพวก extreme thermophiles

4. Photosynthetic bacteria ใช้แบคทีเรียที่เรียกลุ่ม Photosynthesis Bacteria เช่น *Rhodobacter sphaeroides* ซึ่งจะใช้อิออนไซมในโตรจีเนส (Nitrogenase) ร่วมกับแสงอาทิตย์ในการย่อยสลายกรดอินทรีย์ (Organic acids) เช่น กรดอะซิติกให้กลายเป็นก๊าซไฮโดรเจนภายใต้สภาวะไม่ใช้ออกซิเจน โดยมีการถ่ายทอดอิเล็กตรอนผ่านเฟอร์รีดอก (Ferredoxin) ไปสู่อิออนไซมในโตรจีเนสเพื่อสร้าง ATP มีเอนไซม์ 2 ชนิดที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยานี้ ได้แก่ CO dehydrogenase (CODH) และ hydrogenase อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการผลิตไฮโดรเจน คือ 40 °C สัมผัสแสงในช่วง 520 nm และ 570 nm ความเข้มแสง 100 lux

5. Fermentative bacteria เป็นแบคทีเรียที่ส่วนมากอยู่ใน Dark fermentation ซึ่งเป็นกระบวนการหมักของ Anaerobic bacteria และจุลินทรีย์สำหรับบางชนิดที่เติบโตในสภาวะที่ไร้แสง กระบวนการหมักจะเปลี่ยนสารที่มีปริมาณคาร์โบไฮเดรตสูงไปเป็นก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ กระบวนการหมักจะเกิดผ่านกลไกของปฏิกิริยาของ pyruvate เพื่อสร้าง acetyl-CoA และคาร์บอนไดออกไซด์ โดยมีเฟอร์รีดอกทำหน้าที่เป็นสารออกซิไดซ์ จากนั้นในขั้นตอนต่อไปเฟอร์รีดอก จะถูกออกซิไดซ์กลับมาอยู่ในรูปแบบเดิมพร้อมกับสร้างก๊าซไฮโดรเจนขึ้น มา แบคทีเรียกลุ่มนี้สามารถแยกได้จาก Anaerobically digested sewage sludge หรือจากดินที่หมักในที่ไม่ใช้ออกซิเจน

วิศวกรส่วนใหญ่จะใช้แบคทีเรียผสม (Mixed culture) ที่ได้จากกากตะกอน (digested sludge) จากบ่อบำบัดน้ำเสีย หรือจากระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ แทนแบคทีเรียบริสุทธิ์ (Pure culture) สำหรับบ่อบำบัดน้ำเสีย กระบวนการในทางปฏิบัติส่วนใหญ่ใช้แบคทีเรียผสมมากขึ้น เพราะ

ง่ายต่อการใช้งานและง่ายต่อการควบคุมซึ่งอาจจะเป็นทางเลือกที่หลากหลายมากขึ้น (Valdez-Vazquez *et al.*, 2005) แต่ในระบบการเลี้ยงแบคทีเรียผสมภายใต้สภาวะไม่ใช้ออกซิเจน ไฮโดรเจนที่ผลิตโดยแบคทีเรีย เช่น Clostridium หรือ Enterobacter มักจะถูกบริโภคโดยแบคทีเรียที่บริโภคไฮโดรเจนได้อย่างง่ายดาย ดังนั้นจำเป็นต้องมีการยับยั้งกิจกรรมของแบคทีเรียที่บริโภคไฮโดรเจนโดยการคัดกรองแบคทีเรีย (Pre-treatment) ในขณะที่ยังรักษากิจกรรมของแบคทีเรียชนิดที่ผลิตไฮโดรเจน เพื่อยังยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่สร้างมีเทนเป็นหลัก (methanogens) และทำให้แบคทีเรียชนิดที่สร้างไฮโดรเจน (spore-forming hydrogen producing bacteria) มีความโดดเด่นขึ้นมา ส่งผลให้ช่วยเพิ่มการเปลี่ยนของเสียอินทรีย์ต่างๆ ให้เป็นก๊าซไฮโดรเจน

การคัดกรองแบคทีเรียชนิดที่ผลิตไฮโดรเจน

การคัดกรองแบคทีเรียส่วนใหญ่สามารถทำได้โดยอาศัยลักษณะของ Spore – forming ของแบคทีเรียชนิดที่ผลิตไฮโดรเจน ซึ่งอยู่ในกาคตะกอนที่สภาวะไม่ใช้ออกซิเจน (Brock *et al.*, 1994) การบำบัดกาคตะกอนแบบไม่ใช้ออกซิเจนภายใต้สภาวะที่มีความแปรผันสูง แบคทีเรียชนิดที่ผลิตไฮโดรเจนจะมีโอกาสที่อยู่รอดได้มากกว่าจำพวกแบคทีเรียที่บริโภคไฮโดรเจน ซึ่งเป็นแบคทีเรียชนิดที่ไม่มีลักษณะเป็น Spore – forming (Lay, 2001; Oh *et al.*, 2003) ซึ่งกระบวนการคัดกรองแบคทีเรียชนิดที่ผลิตไฮโดรเจนที่มีประสิทธิภาพประกอบไปด้วยวิธีการต่างๆ ได้แก่

1. การคัดกรองแบคทีเรียชนิดที่ผลิตไฮโดรเจนโดยการปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment)

การคัดกรองแบคทีเรียชนิดที่ผลิตไฮโดรเจนด้วยวิธี Heat treatment เป็นวิธีที่ถูกรับชมมากที่สุดในการคัดกรองแบคทีเรียชนิดที่ผลิตไฮโดรเจน (Lay *et al.*, 1999) โดยมี 26 การศึกษาที่พบว่าวิธี Heat treatment ทำได้ง่าย ราคาไม่แพง และประสบความสำเร็จในการปฏิบัติโดยใช้ไอน้ำ โดยมีการใช้อุณหภูมิในช่วง 75 °C (Chang *et al.*, 2002) ถึง 121 °C (Wang *et al.*, 2003) และใช้เวลาในช่วง 15 นาที (Lay *et al.*, 1999) ถึง 2 ชั่วโมง (Fan *et al.*, 2004) แต่ไม่มีการศึกษาใดที่ตัดสินใจว่าจะใช้อุณหภูมิไหนและช่วงเวลาใดที่จะทำการคัดกรองแบคทีเรียได้ดีที่สุด แต่การศึกษาส่วนใหญ่จะใช้อุณหภูมิ 100 °C และใช้เวลา 15 นาที ในทางกลับกันบางการศึกษาพบว่า วิธี Heat treatment ไม่ได้ยับยั้งกิจกรรมของแบคทีเรียที่บริโภคไฮโดรเจนโดย Oh *et al.* (2003) รายงานว่าแบคทีเรีย homoacetogenic อาจยังอยู่รอดได้ และใช้ก๊าซไฮโดรเจนในการผลิต acetate ซึ่งส่งผลให้การผลิตไฮโดรเจนโดยรวมลดลง

2. การคัดกรองแบคทีเรียชนิดที่ผลิตไฮโดรเจนโดยการปรับสภาพด้วยกรด/ด่าง (Acid/Base treatment)

ในกระบวนการ methanogenic ทัวไปการบำบัดน้ำเสียหรือของเสียที่เป็นของแข็งจะมีการควบคุมที่ pH ให้เข้าใกล้ 7 ซึ่งถ้า pH ต่ำกว่า 6.3 หรือสูงกว่า 7.8 อัตราการผลิตก๊าซมีเทนจะลดลงอย่างมาก (van Haandel and Lettinga, 1994; Chen *et al.*, 2002) ดังนั้นการปรับ pH ของกากตะกอนแบบไม่ใช้ออกซิเจนให้มากกว่าหรือน้อยกว่า pH 7 จะช่วยยับยั้งกระบวนการทางชีวภาพของ methanogen ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในทางกลับกันจะไม่ส่งผลกระทบต่อ endospore - forming ของแบคทีเรีย (Brock *et al.*, 1994) ซึ่ง Chen *et al.* (2002) พบว่าผลการศึกษาไฮโดรเจนจากน้ำทิ้งของกากตะกอนเพิ่มขึ้น 333 เท่าหลังจากรักษาตะกอนที่พีเอช 3 เป็นเวลา 24 ชั่วโมงและ 200 เท่าที่ pH 10 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยมีการรายงานผลที่คล้ายกันของ Chang *et al.* (2002)

3. การยับยั้งแบคทีเรียชนิดที่ผลิตมีเทน (Methanogen Inhibitor)

Methanogen จะมีความไวต่อออกซิเจนและสารเคมี ดังนั้นกิจกรรมของ methanogen สามารถยับยั้งโดยการเติมอากาศอย่างง่ายหรือโดยการเติมสารเคมีที่เป็นพิษ Ueno *et al.* (1995, 1996) รายงานว่าปุ๋ยหมักกากตะกอนหลังจากการเติมอากาศสามารถที่จะผลิตไฮโดรเจนได้ 330-340 ml H₂/g hexose จากน้ำเสียที่ประกอบด้วยเซลลูโลสได้โดยไม่มีการผลิตมีเทน

2-Bromoethanesulfonate (BES), acetylene และ chloroform เป็นสารพื้นฐานที่ใช้กันทั่วไปในการยับยั้ง methanogen โดยที่ BES เป็นตัวที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของ coenzyme M ใน methanogen (DiMarco *et al.*, 1990) และมีความจำเพาะในการยับยั้ง methanogen (Sparling and Daniels, 1987; Sparling *et al.*, 1997) ซึ่ง Sparling *et al.* (1997) ใช้ BES 25 mM และ Wang *et al.* (2003) ใช้ BES 100 mM พบว่าการใช้ BES ทำให้เกิดประสิทธิภาพในการผลิตไฮโดรเจน อย่างไรก็ตามการคัดกรองแบคทีเรียโดยวิธีการเติม BES เป็นค่าใช้จ่ายสูงเกินไปสำหรับการดำเนินงานระดับใหญ่

Acetylene ที่ความดัน 50 Pa สามารถยับยั้งกิจกรรมของ methanogen ของแบคทีเรียบริสุทธิ์และน้ำเสียจากสิ่งแวดล้อม (Sprott *et al.*, 1982) โดย Sparling *et al.* (1997) พบว่า acetylene ให้ประสิทธิภาพเหมือนกับการเติม BES ในการผลิตไฮโดรเจนจากการหมักขยะที่เป็นกระดาษ ซึ่งผลการศึกษพบว่า acetylene ไม่มีผลต่อ H₂ yield และอัตราการผลิตของ *C. thermocellum*

ในทำนองเดียวกัน การใช้คลอโรฟอร์ม (Chloroform, CHCl_3) อาจยับยั้งกิจกรรมการบริโภคไฮโดรเจน ดังนั้นจึงสามารถเพิ่ม H_2 yield จาก peptone (Cheng *et al.*, 2003) และกลูโคส (Liang *et al.*, 2002) ได้

4. การคัดกรองแบคทีเรียชนิดที่ผลิตไฮโดรเจนโดยการปรับสภาพด้วยกระแสไฟฟ้า (Electric Current)

Roychowdhury (2000) พบว่าเชื้อแบคทีเรียชนิดที่ผลิตก๊าซไฮโดรเจนสามารถคัดกรองจากกากตะกอนแบบไม่ใช้ออกซิเจนด้วยกระแสไฟฟ้า หลังจากการคัดกรองแบคทีเรียด้วยกระแสไฟฟ้าแรงดันต่ำ (3.0-4.5 V) พบว่ากากตะกอนจากการฝังกบและ cellulosic จากกากตะกอนน้ำเสียชุมชนมีความสามารถในการผลิตไฮโดรเจนได้โดยไม่มีมีเทน

เมื่อเปรียบเทียบวิธีการคัดกรองแบคทีเรีย (Pre-treatment) Wang *et al.* (2010) ทำการศึกษาโดยใช้กลูโคสเป็น substrate ได้ทำการคัดกรองแบคทีเรีย 3 วิธี คือ Heat treatment, Acid treatment และ Base treatment พบว่า การคัดกรองที่แตกต่างกันจะทำให้ได้ผลผลิตที่แตกต่างกันโดย Heat treatment จะได้ ethanol และ butyric ซึ่งผลผลิตก๊าซไฮโดรเจนจะสูงขึ้น แต่วิธี Acid treatment และ Base treatment จะได้ propionate และ butyric จะเป็นผลผลิตก๊าซไฮโดรเจนที่ลดลง ส่วน Liu *et al.* (2009) ทำการศึกษาโดยใช้แบคทีเรียจากสิ่งแวดล้อมทางทะเล โดยทำการคัดกรองแบคทีเรีย 4 วิธี คือ Heat treatment, Acid treatment, Base treatment และ Freezing and thawing ซึ่งการศึกษาพบว่าวิธี Heat treatment จะให้ก๊าซไฮโดรเจนที่มากที่สุด นอกจากนี้ Wang และ Wan (2008) ได้ศึกษาวิธีการคัดกรองแบคทีเรีย 5 วิธีคือ วิธี Heat treatment, Acid treatment, Base treatment, Aeration และ Chloroform พบว่า วิธี Heat treatment จะให้อัตราการเกิดผลผลิตก๊าซไฮโดรเจนมากที่สุด โดยใช้แบคทีเรียจากการย่อยสลายตะกอน ซึ่ง วิธี Heat treatment เป็นวิธีที่ง่ายในทางปฏิบัติอีกด้วย รวมทั้งการศึกษาของ Ren และ Wang (1994) พบว่า การใช้น้ำเสียจากชุมชนการคัดกรองโดยวิธี Aeration ทำให้เกิดผลผลิตก๊าซไฮโดรเจนสูงสุด ซึ่งสูงกว่าวิธีการคัดกรองด้วยวิธี Heat treatment, Acid treatment, Base treatment และตัวควบคุม และจากการศึกษาพบว่ากิจกรรมของ methanogenic จะถูกยับยั้งด้วยการคัดกรองด้วย วิธี Heat treatment, Acid treatment และ Aeration ส่วนวิธีการคัดกรองวิธี Base treatment และตัวควบคุมจะไม่สามารถยับยั้งกิจกรรมของ methanogenic ได้

จากการศึกษาน้ำเสียจากโรงงานแปรงมันสำปะหลังโดยกระบวนการ Batch process ของ Zhang *et al.* (2003) ใช้แบคทีเรียจากกากตะกอน พบว่า pH ที่ดีที่สุดในการผลิตไฮโดรเจนคือ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 6 และมี H_2 yield 83 ml H_2/g hexose ขณะที่การศึกษาของ Khanal *et al.*

(2004) ใช้แบคทีเรียจากปุ๋ยหมัก กล่าวว่า pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 4.5 และมี H_2 yield 133 ml H_2/g hexose และการศึกษาของ Lin และ Shen (2004) ใช้แบคทีเรียจากขี้มูลสัตว์ รายงานผล pH เริ่มต้นของน้ำเสียที่ดีที่สุดคือ 7-8 และมี H_2 yield 175 ml H_2/g hexose จะเห็นได้ว่า เมื่อแบคทีเรียต่างกัน การศึกษาที่จะทำให้ได้ค่า pH เริ่มต้นของน้ำเสียที่ดีที่สุดและและมี H_2 yield ที่สูงต่างกันไปด้วย การเสนอโครงการวิจัยจึงเป็นการศึกษาเพื่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจนปริมาณสูงสำหรับน้ำเสียโรงงานแปรงมันสำปะหลังในกระบวนการหมักไร้แสง โดยใช้แบคทีเรียและน้ำเสียจากโรงงานแปรงมันสำปะหลัง บริษัท ซอไฮวัฒน์อุตสาหกรรม จำกัด ซึ่งใช้แบคทีเรียคัดกรอง 3 วิธีจาก 5 วิธี ได้แก่ การคัดกรองแบคทีเรียชนิดที่ผลิตไฮโดรเจนโดยการปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment), กรด (Acid treatment), ด่าง (Base treatment), คลอโรฟอร์ม (Chloroform) และ การแช่แข็งและละลาย (Freezing and thawing)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

ในการศึกษาการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพโดยการหมักแบบไร้แสงของน้ำเสียเป้งมันสำปะหลัง มีการจัดเตรียมอุปกรณ์ดังนี้

1. อุปกรณ์เครื่องแก้วพื้นฐานที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ เช่น beaker, flasks, erlenmeyer flasks, dropper และอื่นๆ
2. เครื่องมือพื้นฐานในห้องปฏิบัติการและเครื่องมือวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำ ได้แก่
 - 2.1 COD reflux apparatus Model Gerhardt รุ่น EV
 - 2.2 pH meter Model Cyber scan รุ่น 500
3. เครื่องมือที่มีความสลับซับซ้อนในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ Gas Chromatograph (GC/TCD) Model Shimadzu รุ่น GC-14B ที่มีตัวตรวจวัดเป็น Thermal conductivity detector ใช้ column Molecular Sieves 13X โดยใช้ก๊าซอาร์กอนเป็นก๊าซตัวพา (Carrier Gas) และใช้ Standard gas เป็นก๊าซผสม H_2 30%, CH_4 30% และ balance ด้วย CO_2 ซึ่งมี Condition ของอุณหภูมิดังต่อไปนี้

- Column oven	40 °C
- Injection port	60 °C
- Detector	70 °C
4. เครื่องมือที่ใช้ในการคัดกรองแบคทีเรีย
 - 4.1 Water bath
 - 4.2 Deep freezer Model Mirage รุ่น FZ-269
5. สารเคมีในการวิเคราะห์หาลักษณะสมบัติของน้ำเสีย ได้แก่ Chemical Oxygen Demand (COD) ตามวิธีมาตรฐาน Standard Methods for Examination of Water and Wastewater (APHA *et al.*, 1992)
6. อุปกรณ์สำหรับใช้ในการเพิ่มปริมาณตะกอนจุลินทรีย์โดยการ Acclimation
 - 6.1 ขวดพลาสติกขนาด 1.5 ลิตร
 - 6.2 จุกยาง
 - 6.3 สายยาง

6.4 หลอดแก้ว

6.5 กระจกอะลูมิเนียมฟอยล์

7. อุปกรณ์สำหรับสร้างระบบบำบัดน้ำเสียไม่ใช้ออกซิเจนแบบเติมครั้งเดียว (Batch process)

7.1 ขวดซีรัม (Serum bottle) ขนาดบรรจุใช้งาน 100 มิลลิลิตรและฝาอะลูมิเนียม

7.2 สายยาง

7.3 ขวดน้ำพลาสติกขนาด 500 มิลลิลิตร

7.4 จุกยาง

7.5 คลิปหนีบสายยาง

7.6 แท่งแก้ว

7.7 ลวดขนาดเล็ก

7.8 กระจกอะลูมิเนียมฟอยล์

8. แหล่งตะกอนจุลินทรีย์และสารตั้งต้น

8.1 ตะกอนจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานแป้งมันสำปะหลัง โดยการเก็บจากก้อนถึง Upflow anaerobic sludge blanket (UASB) ที่มีลักษณะสีดำขึ้น

8.2 น้ำเสียจากโรงงานแป้งมันสำปะหลัง (Starch wastewater) เป็นสารตั้งต้น โดยใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียจริงจากโรงงาน

วิธีการ

ในการศึกษาการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพโดยการหมักแบบไร้แสงของน้ำเสียแป้งมันสำปะหลัง แบ่งการศึกษาออกเป็น 4 ช่วงคือ

1. การคัดกรองแบคทีเรีย (Pre-treatment)

การคัดกรองแบคทีเรียด้วยวิธีต่างๆ ได้แก่ การคัดกรองแบคทีเรียชนิดที่ผลิตไฮโดรเจนโดยการปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment), กรด (Acid treatment), ด่าง (Base treatment), คลอโรฟอร์ม (Chloroform) และ การแช่แข็งและละลาย (Freezing and thawing) โดยจะเลือกผลการศึกษา 3 ใน 5 วิธี

1.1 การคัดกรองแบคทีเรียชนิดที่ผลิตไฮโดรเจนโดยการปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) ให้ความร้อนโดยการนำหลอดทดลองที่ภายในบรรจุตะกอนจุลินทรีย์ที่เตรียมไว้ใส่ในอ่างน้ำ (water bath) ที่มีการควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 85°C โดยให้ระดับน้ำในอ่างอยู่เหนือระดับตะกอนจุลินทรีย์ในหลอดเป็นระยะเวลา 15 นาที จากนั้นนำหลอดตะกอนจุลินทรีย์จากอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ มาทำให้เย็นทันที โดยแช่หลอดตะกอนจุลินทรีย์ลงในอ่างน้ำแข็งเป็นระยะเวลา 15 นาที ดังภาพที่ 3 นำตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองแล้วไปเพิ่มปริมาณตะกอนจุลินทรีย์โดยการเดินระบบแบบ semi-continuous



ภาพที่ 3 การคัดกรองแบคทีเรียชนิดที่ผลิตไฮโดรเจนโดยการปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment)

1.2 การคัดกรองแบคทีเรียชนิดที่ผลิตไฮโดรเจนโดยการปรับสภาพด้วยกรด (Acid treatment) ปรับ pH ของตะกอนจุลินทรีย์ให้มีค่า pH 3 โดยใช้ 10 N HCl แล้วคงสภาพนี้ไว้เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นปรับค่า pH ให้มีค่าเป็นกลาง (ประมาณ 7) โดยใช้ 10 N NaOH (Ren *et al.*, 2008) นำตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองแล้วไปเพิ่มปริมาณตะกอนจุลินทรีย์โดยการเดินระบบแบบ semi-continuous

1.3 การคัดกรองแบคทีเรียชนิดที่ผลิตไฮโดรเจนโดยการปรับสภาพด้วยด่าง (Base treatment) ปรับ pH ของตะกอนจุลินทรีย์ให้มีค่า pH 11 โดยใช้ 10 N NaOH แล้วคงสภาพนี้ไว้เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นปรับค่า pH ให้มีค่าเป็นกลาง (ประมาณ 7) โดยใช้ 10 N HCl (Ren *et*

al., 2008) นำตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองแล้วไปเพิ่มปริมาณตะกอนจุลินทรีย์โดยการเดินระบบแบบ semi-continuous

1.4 การคัดกรองแบคทีเรียชนิดที่ผลิตไฮโดรเจนโดยการปรับสภาพด้วยคลอโรฟอร์ม (Chloroform) ทำโดยการเติมคลอโรฟอร์ม 2% โดยปริมาตร นำตะกอนจุลินทรีย์ทั้งหมด 800 ml มาเติมคลอโรฟอร์ม 16 ml ตั้งทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง นำตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองแล้วไปเพิ่มปริมาณตะกอนจุลินทรีย์โดยการเดินระบบแบบ semi-continuous

1.5 การคัดกรองแบคทีเรียชนิดที่ผลิตไฮโดรเจนโดยการปรับสภาพด้วยการแช่แข็งและละลาย (Freezing and thawing) นำตะกอนจุลินทรีย์ไปแช่ในตู้ที่อุณหภูมิ -20°C แล้วคงสภาพไว้เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำออกมาตั้งไว้ให้ละลายในอุณหภูมิห้อง นำตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองแล้วไปเพิ่มปริมาณตะกอนจุลินทรีย์โดยการเดินระบบแบบ semi-continuous

2. การเพิ่มปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ โดยการ Acclimation

ในการศึกษานี้ทำการเดินระบบแบบการเติมกึ่งต่อเนื่อง (semi-continuous) โดยการนำตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีการมาปรับสภาพต่างๆแล้ว มาเลี้ยงเพื่อเพิ่มปริมาณและความแข็งแรงโดยใช้สารละลาย nutrient broth 1.3 % (w/v, nutrient broth 13 g ในน้ำกลั่น 1000 ml) และสารละลาย glucose 0.5 % (w/v, glucose 5 g ในน้ำกลั่น 1000 ml) เมื่อนำสารละลาย nutrient และสารละลาย glucose มาผสมรวมกันในปริมาตรที่เท่ากันเรียกว่า glucose-based substrate เป็นอาหารในช่วงเวลา 15 วันแรก และให้ในปริมาตรที่เท่ากันทุกวัน โดยถ่ายเทอาหารเก่าออกแล้วเติมอาหารใหม่เข้าไป ทั้งนี้ HRT ของการศึกษารั้งนี้ มีค่าเท่ากับ 2.6 วัน หลังจากครบ 15 วัน เปลี่ยนอาหารที่ให้ตะกอนจุลินทรีย์เป็นน้ำเสียจากโรงงานเป็งมันสำปะหลังที่มีค่า COD ประมาณ 29,300 mg/l โดยยังคงปริมาตรและระยะเวลาในการเติมอาหารเท่าเดิม เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 2 ชั่วโมง หลังจากการให้อาหารตะกอนจุลินทรีย์ ทำการเก็บตัวอย่างก๊าซที่เกิดขึ้นเพื่อนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซ

ในการศึกษานี้เป็นขั้นตอนเดียวกันกับการทำ bacterial acclimation มีขั้นตอนดังนี้

2.1 นำตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีการต่างๆแล้ว ใ้ลงในขวดน้ำดื่มพลาสติกใสที่หุ้มด้วยฟลอยด์รอบขวดปริมาตร 1.5 l ในปริมาตร 800 ml

2.2 ให้อาหารโดยใช้สารละลาย nutrient broth 1.3 % ปริมาตร 250 ml และสารละลาย glucose 0.5% ปริมาตร 250 ml ซึ่ง glucose-based substrate นี้มีค่า COD ของสารละลายสองชนิดเมื่อนำมาผสมกันประมาณ 6,800 mg/l ใช้จุกยางสีดำที่มีท่อต่อกับสายยางมาปิดที่ปากขวดให้แน่น แล้วนำปลายสายยางอีกด้านจุ่มลงในหลอดแก้วที่บรรจุน้ำเพื่อสังเกตก๊าซที่เกิดขึ้น โดยดูจากฟองก๊าซที่เกิดโดยการแทนที่น้ำในหลอดแก้ว

2.3 หลังจากให้อาหารแล้วเป็นระยะเวลาประมาณ 2 ชั่วโมง สังเกตการเกิดก๊าซโดยดูจากฟองก๊าซในหลอดแก้วที่บรรจุน้ำและทำการเก็บตัวอย่างก๊าซที่เกิดขึ้น (ภาพที่ 4) เพื่อนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบก๊าซที่ระบบผลิตได้ โดยใช้เครื่อง GC/TCD เป็นเครื่องมือในการตรวจวิเคราะห์

2.4 ให้อาหารตะกอนจุลินทรีย์ด้วย glucose-based substrate ในปริมาตรรวม 500 ml เท่ากัน เช่นนี้ ประมาณ 15 วัน จากนั้นลดปริมาณ glucose-based substrate ลง ทดแทนปริมาณอาหารที่ลดไปด้วยน้ำเสียจากโรงงานแป้งมันสำปะหลังที่มีค่า COD ประมาณ 29,300 mg/l โดยใช้ น้ำเสียจากโรงงานแป้งมันสำปะหลัง ต่อ glucose-based substrate ในอัตราส่วน 1:3 และตามด้วยน้ำเสียจากโรงงานแป้งมันสำปะหลัง ต่อ glucose-based substrate ในอัตราส่วน 1:2 จนกระทั่งอาหารที่ให้ตะกอนจุลินทรีย์เป็นน้ำเสียจากโรงงานแป้งมันสำปะหลังเพียงอย่างเดียว



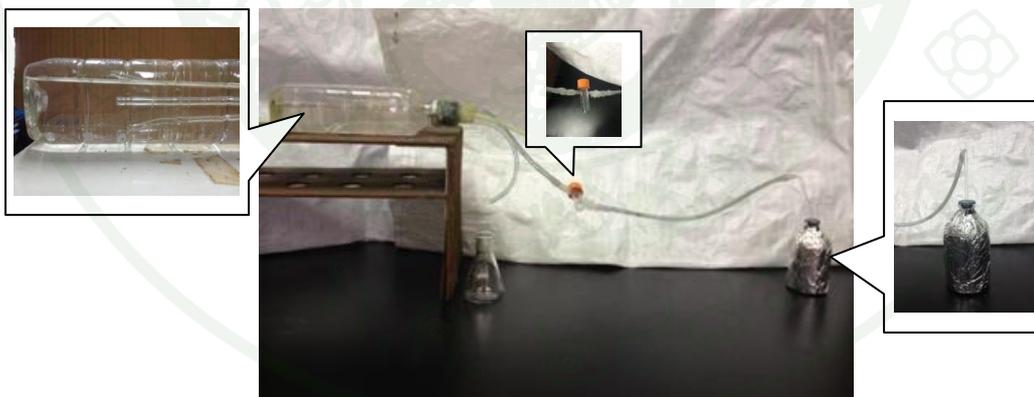
ภาพที่ 4 การเก็บตัวอย่างก๊าซในช่วง Acclimation ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gas chromatograp

3. การเริ่มต้นเดินระบบ (Start up)

ขวดซีรัม (serum bottle) เป็นขวดหมัก (bioreactor) แบบเดิมครั้งเดียว (batch process) และระบบเก็บก๊าซ (gas collection system) ซึ่งทำด้วยขวดพลาสติก จำนวน 15 ชุด มีวิธีการดังนี้

3.1 นำขวดซีรัมขนาด 100 ml เชื่อมต่อกับระบบเก็บก๊าซ โดยต่อท่อทางด้านบนของขวด ซีรัมเข้ากับระบบเก็บก๊าซ เพื่อเป็นทางออกของก๊าซที่เกิดขึ้นไปยังระบบเก็บก๊าซ

3.2 การเก็บตัวอย่างก๊าซทำโดยการแทนที่น้ำ (water displacement) โดยนำขวดน้ำดื่มพลาสติกขนาด 500 ml มาปิดปากขวดด้วยจุกยางสีดำที่เจาะรู 3 รูในแนวเดียวกัน จากนั้นต่อแท่งแก้วที่มีลักษณะปลายงอเข้ากับรูทางด้านริมทั้งสองด้านของจุกยาง โดยให้ปลายของแท่งแก้วอยู่ในลักษณะที่ปลายงอออกทางด้านบนและล่าง ในทิศทางตรงข้ามกันเมื่อวางขวดในแนวราบ ส่วนรูตรงกลางต่อเข้ากับแท่งแก้วที่มีลักษณะตรง นำสายยางมาต่อเข้ากับแท่งแก้วทั้งสามแท่ง โดยกำหนดให้แท่งแก้วที่มีทิศทางโค้งขึ้นทางด้านบนเป็นท่อที่ใช้สำหรับให้ก๊าซที่เกิดขึ้นไหลผ่านเข้ามาแทนที่น้ำในระบบ แท่งแก้วที่มีลักษณะตรงเป็นท่อที่ใช้สำหรับการเติมน้ำเข้าสู่ระบบ และแท่งแก้วที่มีลักษณะโค้งลงเป็นท่อสำหรับทางน้ำออกเมื่อถูกแทนที่ด้วยก๊าซ ทั้งนี้สายยางที่เชื่อมต่อระหว่างระบบเก็บก๊าซและขวดซีรัมจะถูกขึ้นด้วยหลอดแก้วรูปตัวทีและจุกยางสีส้มเพื่อใช้เก็บตัวอย่างก๊าซที่เกิดขึ้นที่ไหลไปยังระบบเก็บตัวอย่างก๊าซ เพื่อนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น จากนั้นเติมน้ำกรดซัลฟูริก (sulphuric acid, H_2SO_4) ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ เพื่อป้องกันไม่ให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายในน้ำ ลงในขวดน้ำดื่มพลาสติกโดยระวังไม่ให้น้ำกรดมีปริมาตรสูงกว่าปลายของแท่งแก้วทางด้านบน (ภาพที่ 5)



ภาพที่ 5 ลักษณะขวดเก็บก๊าซที่เป็นการเก็บตัวอย่างก๊าซทำโดยการแทนที่น้ำ (Water displacement)

4. การเดินระบบด้วยวิธี Batch process

การศึกษานี้ใช้ขวดซีรัม (serum bottle) เป็นขวดหมัก (bioreactor) เดินระบบแบบเดิมครั้งเดียว (batch process) ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน (dark fermentation) ไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic)

ที่อุณหภูมิ 35°C ความดัน 1 atm จะทำการศึกษา 2 ชั่วโมง แล้วใช้ค่าเฉลี่ยในการแสดงผลการศึกษา มีระบบเก็บก๊าซ (gas collection system) โดยการแทนที่น้ำ (water displacement) ดังภาพที่ 6 จะทำการศึกษาจนกว่าระบบจะหยุดผลิตก๊าซ หรือประมาณ 120 ชั่วโมง ใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรงมันสำปะหลังที่มีค่า COD ประมาณ 29,300 mg/l และ ใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีการปรับสภาพด้วยวิธีต่างๆ และจะทำการศึกษาที่ pH เริ่มต้นของตะกอนจุลินทรีย์หลังจากที่ผ่านการเพิ่มปริมาณตะกอนจุลินทรีย์โดยการ acclimation แล้ว โดยมีการทำชุดควบคุมด้วยตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยวิธีต่างๆ และใช้น้ำกลั่นแทนน้ำเสียโรงงานแปรงมันสำปะหลัง ทั้งนี้มีการศึกษาใน 2 หัวข้อใหญ่โดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองโดยการปรับสภาพด้วยความร้อนเป็นตัวแทนในการศึกษา ได้แก่ การศึกษาถึงความเหมาะสมของสัดส่วนมวลตะกอนจุลินทรีย์ต่อความสกปรกอินทรีย์ในรูป Cell: COD และศึกษาถึง Activity ของตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตไฮโดรเจน จากนั้นศึกษาถึง pH เริ่มต้นของน้ำเสียที่ส่งผลต่อการผลิตไฮโดรเจนด้วยตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองโดยการปรับสภาพวิธีต่างๆ

4.1 การศึกษาถึงความเหมาะสมของสัดส่วนมวลตะกอนจุลินทรีย์ต่อความสกปรกอินทรีย์ในรูป Cell: COD

เป็นการศึกษาที่มีการเปรียบเทียบสัดส่วนของ Cell: COD 2 ค่า คือ Cell: COD = 4 และ Cell: COD = 0.26 ที่มีผลต่อปริมาณไฮโดรเจนสะสม, ผลผลิตไฮโดรเจน (H_2 yield) และ อัตราการผลิตไฮโดรเจนจำเพาะ (Specific hydrogen production rate, SHPR) โดยมีวิธีการดังนี้

4.1.1 นำตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธี Heat treatment และผ่านการ acclimation มาแล้ว ใส่ลงในขวดซีรัม 80 ml จากนั้นนำน้ำเสียโรงงานแปรงมันสำปะหลัง 20 ml ที่ปรับ pH ด้วย 10 N HCl หรือ 10 N NaOH ให้มี pH เท่ากับ 4, 4.5, 5, 5.5, 6, 6.5 และ 7 มารวมกับ ตะกอนจุลินทรีย์และทำการปิดฝาให้สนิท โดยที่ MLVSS มีค่า 19,540 mg/l และ COD เริ่มต้นที่ 23,848 mg/l เป็นผลให้ได้มวลของเซลล์และมวลของ COD ประมาณ 1,954 g และ 477 g ตามลำดับ (การคำนวณในภาคผนวก ข) จึงมีผลให้ Cell: COD = 4 g cell/g COD หมักภายใต้สภาวะไร้แสง โดยการหมักขวดหมักด้วยกระดาษอลูมิเนียมฟอยล์ และควบคุมอุณหภูมิที่ 35°C ตลอดการทำการศึกษาใน Water bath

4.1.2 ทำการเก็บข้อมูลก๊าซชีวภาพที่เกิดตลอดการศึกษาประมาณทุก 3 ชั่วโมง โดยบันทึกปริมาณน้ำที่ออกมาจาก Gas collection system ที่ถูกแทนที่ด้วยก๊าซ และเก็บตัวอย่างก๊าซในระบบเพื่อวิเคราะห์ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนด้วยเครื่อง GC/TCD ทำการศึกษาจนไม่เกิดปริมาณก๊าซ

4.1.3 ใช้ Syringe เอาตัวอย่างน้ำเสียระหว่างการหมักออกมาจากระบบ 5 ml เพื่อนำมาวิเคราะห์หาค่า COD และวัด pH

4.1.4 นำผลจากข้อ 4.1.2 ที่ได้ปริมาตรไฮโดรเจน และ 4.1.3 ที่ได้ COD degraded มาคำนวณหา H_2 Yield ($ml H_2/g COD degraded$)

4.1.5 นำผลจากข้อ 4.1.2 มาคำนวณหาอัตราการผลิตไฮโดรเจนจำเพาะ (Specific hydrogen production rate, SHPR, $ml H_2/g cell-hr$) โดยใช้ข้อมูลจากปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมที่สภาวะมาตรฐานกับค่า MLVSS ในการคำนวณ (การคำนวณในภาคผนวก ข)

4.1.6 ทำการศึกษาตามข้อ 4.1.1 ถึง 4.1.5 โดยเปลี่ยนสัดส่วนของ Cell: COD = 0.26 คือใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธี Heat treatment และผ่านการ Acclimation 20 ml และน้ำเสียโรงงานแป่งมันสำปะหลัง 80 ml ที่ปรับ pH ด้วย 10 N HCl หรือ 10 N NaOH ให้มี pH เท่ากับ 4, 4.5, 5, 5.5, 6, 6.5 และ 7 โดยที่ MLVSS มีค่า 4,863 mg/l และ COD เริ่มต้นที่ 23,666 mg/l เป็นผลให้ได้มวลของเซลล์และมวลของ COD ประมาณ 486 g และ 1,893 g ตามลำดับ (การคำนวณในภาคผนวก ข) จึงมีผลให้ Cell: COD = 0.26 g cell/g COD

4.1.7 เปรียบเทียบปริมาตรไฮโดรเจน H_2 yield และ SHPR ของการศึกษาที่มี Cell: COD = 4 และ Cell: COD = 0.26 เพื่อหาสัดส่วน Cell: COD ที่เหมาะสมในการศึกษาการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพโดยการหมักแบบไร้แสงของน้ำเสียแป่งมันสำปะหลัง



ภาพที่ 6 การเดินระบบแบบ Batch process

4.2 การศึกษาถึง Activity ของตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตไฮโดรเจน เป็นการศึกษา ระหว่างตะกอนจุลินทรีย์ที่มี Activity ต่ำ ($\%H_2$ ในการเริ่มต้นการหมักต่ำกว่า 50%) และตะกอนจุลินทรีย์ที่มี Activity สูง ($\%H_2$ ในการเริ่มต้นการหมักประมาณ 50%) โดยมีวิธีการดังนี้

4.2.1 ทำการศึกษาตามข้อ 4.1.1 ถึง 4.1.5 โดยใช้สัดส่วน Cell: COD ที่เหมาะสมจากการศึกษาข้อ 4.1 และนำตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธี Heat treatment ที่มีปริมาณไฮโดรเจนน้อยกว่า 50% นับเป็นตะกอนจุลินทรีย์ที่มี Activity ต่ำ และตะกอนจุลินทรีย์ที่มีปริมาณไฮโดรเจนประมาณ 50% นับเป็นตะกอนจุลินทรีย์ที่มี Activity สูง มาทำการศึกษาเปรียบเทียบ Activity ของตะกอนจุลินทรีย์

4.2.2 เปรียบเทียบปริมาณไฮโดรเจน H_2 yield และ SHPR ของการศึกษาที่ตะกอนจุลินทรีย์มี Activity ที่แตกต่างกัน เพื่อหา Activity ที่เหมาะสมในการศึกษาการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพโดยการหมักแบบไร้แสงของน้ำเสียแป้งมันสำปะหลัง

4.3 การศึกษา pH เริ่มต้นของน้ำเสียที่ส่งผลต่อการผลิตไฮโดรเจน โดยมีวิธีการดังนี้

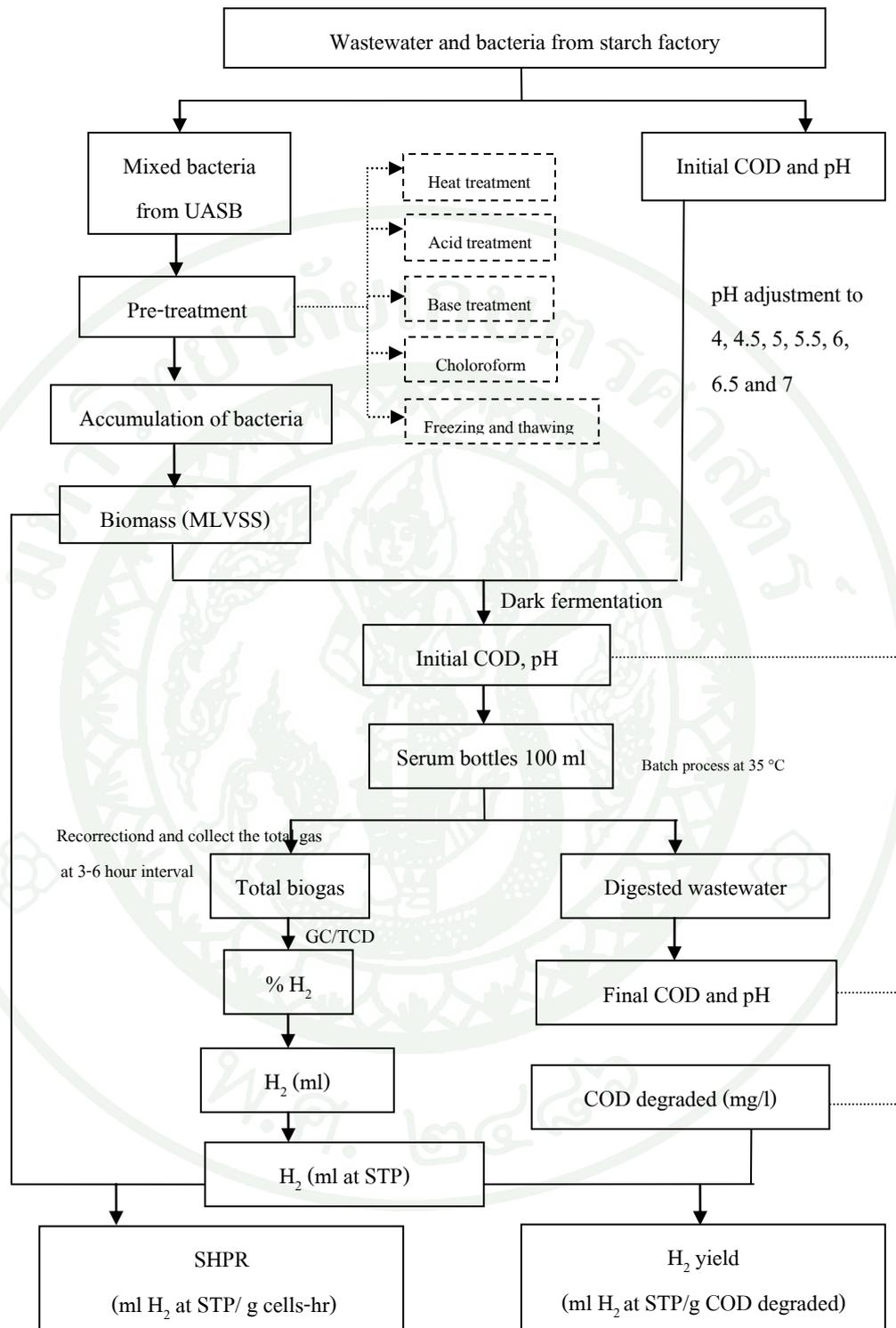
4.3.1 ทำการศึกษาตามข้อ 4.1.1 ถึง 4.1.6 โดยใช้สัดส่วน Cell: COD ที่เหมาะสม (จากข้อ 4.1) และใช้ Activity ที่เหมาะสม (จากข้อ 4.2) มาเป็นเงื่อนไขในการศึกษาการหมักน้ำเสียโรงงานแป้งมันสำปะหลัง โดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธี Heat treatment

4.3.2 เปรียบเทียบปริมาณไฮโดรเจน H_2 Yield และ SHPR ของแต่ละ pH เริ่มต้นของน้ำเสีย เพื่อหา pH เริ่มต้นของน้ำเสียที่เหมาะสมในการศึกษาการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพโดยการหมักแบบไร้แสงของน้ำเสียแป้งมันสำปะหลัง

4.3.3 ทำการศึกษาตามข้อ 4.3.1 และ 4.3.2 โดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีอื่นๆ ซึ่งขั้นตอนในการศึกษาสามารถสรุปได้ดังแผนภูมิการศึกษาแสดงดังภาพที่ 7

สถานที่ทำการศึกษา

ในการดำเนินการทำวิจัยครั้งนี้ใช้สถานที่ คือ ฝ่ายเครื่องมือและวิจัยทางวิทยาศาสตร์ สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน โดยจะใช้ระยะเวลาในการดำเนินการทั้งหมดนับตั้งแต่เริ่มเสนอโครงการวิจัยไปจนถึงการพิมพ์วิทยานิพนธ์และจัดทำรูปเล่มสมบูรณ์ เป็นระยะเวลารวมทั้งสิ้น 2 ปี



ภาพที่ 7 แผนภูมิการดำเนินงานตลอดระยะเวลาการทำงาน

ผลและวิจารณ์

การศึกษา เรื่อง การผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพโดยการหมักแบบไร้แสงของน้ำเสียแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งน้ำเสียโรงงานแป้งมันสำปะหลังเริ่มต้นมีคุณลักษณะต่างๆ ดังตามตารางที่ 1 โดยที่ผลการศึกษาจะแบ่งออกเป็น

ตารางที่ 1 ลักษณะเริ่มต้นของน้ำเสียโรงงานแป้งมันสำปะหลัง

Parameters	Characteristic of starch wastewater
pH	3.81
COD	29,294 mg/l
Metals	
Ca	5.65 mg/l
Fe	1.67 mg/l
Mn	3.10 mg/l
Mg	96.5 mg/l
Na	46.6 mg/l
Cu	0.164 mg/l
Zn	1.63 mg/l
Cd	-
Pb	0.394 mg/l
Ni	0.139 mg/l
Cr	0.02 mg/l

หมายเหตุ – คือ ตรวจวัดไม่พบ

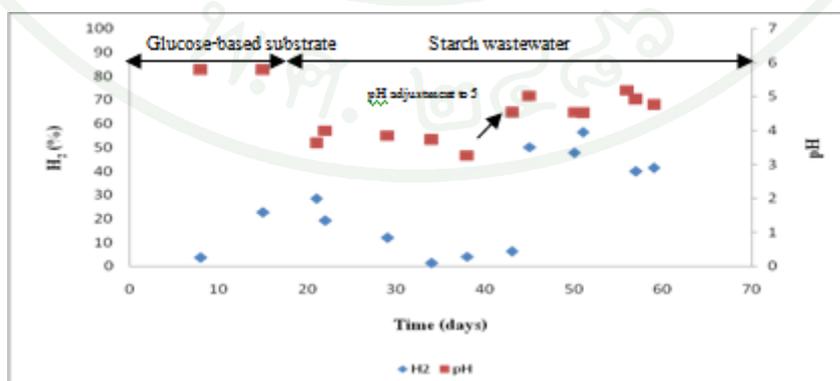
1. การผลิตไฮโดรเจนจากการคัดกรองตะกอนจุลินทรีย์โดยการปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment)

การศึกษาโดยการคัดกรองตะกอนจุลินทรีย์ด้วยวิธี Heat treatment แบ่งออกเป็น 2 ส่วน การศึกษาคือ การเพิ่มปริมาณตะกอนจุลินทรีย์โดยการ Acclimation และการผลิตไฮโดรเจนโดยระบบ Batch process

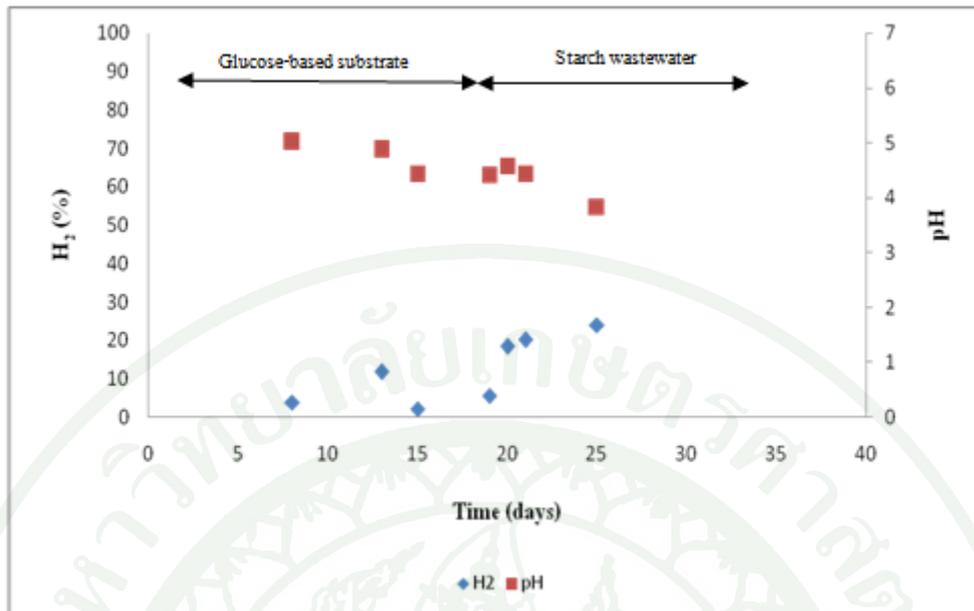
1.1 การเพิ่มปริมาณตะกอนจุลินทรีย์โดยการ Acclimation ของการคัดกรองตะกอนจุลินทรีย์โดยการปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment)

การศึกษา Acclimation ของตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธี Heat treatment เริ่มต้นให้อาหารแก่ตะกอนจุลินทรีย์เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกลูโคส (Glucose-based substrate) ที่มี COD 6,800 mg/l และเปลี่ยนเป็นน้ำเสียโรงงานแป้งมันสำปะหลังที่มี COD 29,294 mg/l ได้ ทำการศึกษาปริมาณไฮโดรเจน (%H₂) 4 ครั้งพบว่าในแต่ละครั้ง %H₂ เพิ่มขึ้นตามระยะเวลา ขณะที่ค่า pH ลดลง จากภาพที่ 8 แสดงผลการศึกษาคัดกรองตะกอนจุลินทรีย์ด้วยวิธี Heat treatment เป็นผลการศึกษาถึงแนวโน้มของการเพิ่มปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ พบว่าเมื่อ pH ภายในระบบของการ Acclimation มีค่าต่ำกว่า 4 %H₂ ลดลง จากนั้นมีการปรับค่า pH เพิ่มขึ้นเป็น 5 พบว่า %H₂ เพิ่มขึ้นอีกครั้ง (ภาพที่ 8) จากการสังเกตสีของตะกอนจุลินทรีย์ที่เริ่มต้นเป็นสีดำ หลังจากผ่านการ Acclimation เป็นระยะเวลาประมาณ 30 วันพบว่า สีของตะกอนจุลินทรีย์เปลี่ยนเป็นสีเทา และพบว่า %H₂ ลดลง นับเป็นการลดลงของ Activity ของตะกอนจุลินทรีย์ชนิดที่ผลิตไฮโดรเจน

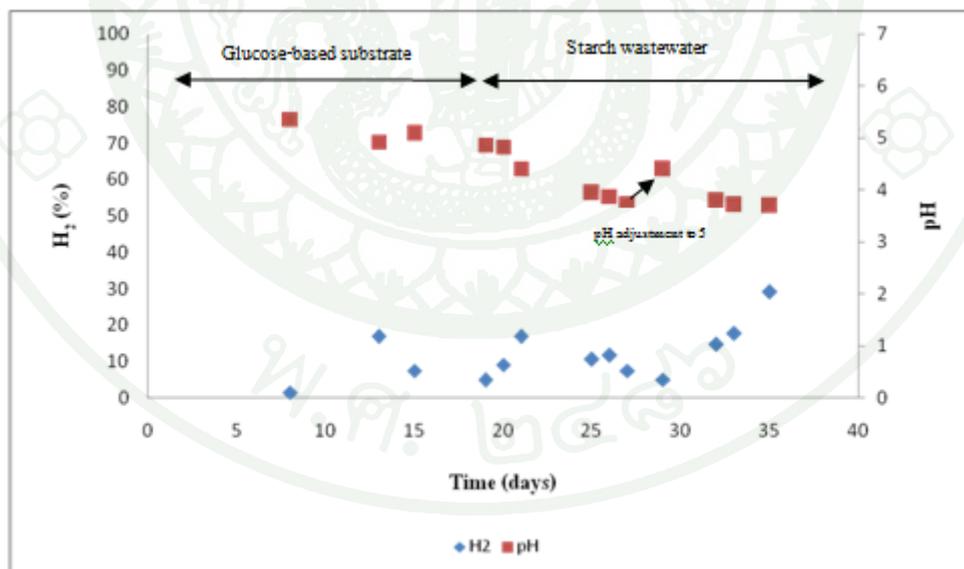
จากภาพที่ 9-11 เป็นการแสดงผล %H₂ ที่เกิดจากการเพิ่มปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธี Heat treatment %H₂ สุดท้าย (หลังจากตะกอนจุลินทรีย์ผ่านการ Acclimation) ก่อนนำตะกอนจุลินทรีย์ไปทำการหมักเพื่อผลิตไฮโดรเจนขั้นต่อไปคือ 25% 30% และ 50% ตามลำดับภาพ โดยถือว่าตะกอนจุลินทรีย์ที่มี %H₂ ในการเริ่มต้นการหมักน้อยกว่า 50% เป็นตะกอนจุลินทรีย์ที่มี Activity ต่ำ และตะกอนจุลินทรีย์ที่มี %H₂ ในการเริ่มต้นการหมักประมาณ 50% เป็นตะกอนจุลินทรีย์ที่มี Activity สูง และในทุกๆ การศึกษา พบว่ามีการตรวจพบมีเทน (CH₄) ไม่เกิน 3%



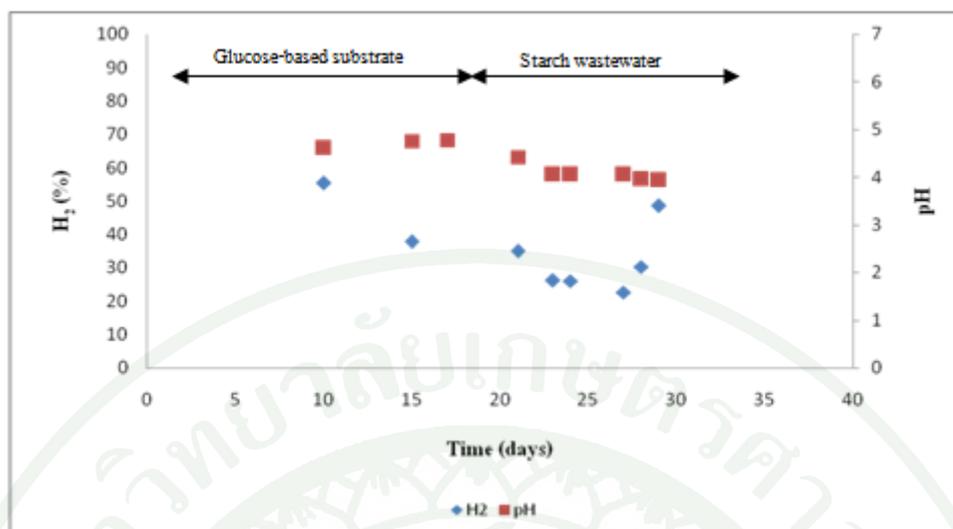
ภาพที่ 8 %H₂ ที่เกิดจากการเพิ่มปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธี Heat treatment (ไม่ได้้นำตะกอนจุลินทรีย์ไปใช้ในการศึกษาขั้นต่อไป)



ภาพที่ 9 %H₂ ที่เกิดจากการเพิ่มปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธี Heat treatment (นำตะกอนจุลินทรีย์ไปใช้ในการศึกษาความเหมาะสมของ Cell: COD)



ภาพที่ 10 %H₂ ที่เกิดจากการเพิ่มปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธี Heat treatment (นำตะกอนจุลินทรีย์ไปใช้ในการศึกษาความเหมาะสมของ Cell: COD และใช้ในการศึกษาถึง Activity ของตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตไฮโดรเจน)



ภาพที่ 11 %H₂ ที่เกิดจากการเพิ่มปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธี Heat treatment (นำตะกอนจุลินทรีย์ไปใช้ในการศึกษาถึง Activity ของตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตไฮโดรเจน และใช้ในการศึกษา pH เริ่มต้นของน้ำเสียในการผลิตไฮโดรเจน)

1.2 การผลิตไฮโดรเจนโดยระบบ Batch process ของตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยการปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment)

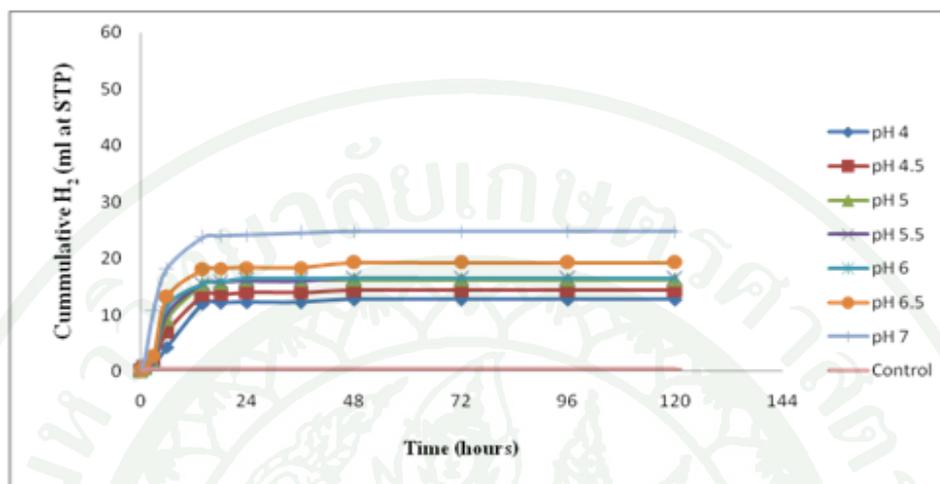
การศึกษาการผลิตไฮโดรเจนโดยระบบ Batch process โดยการคัดกรองตะกอนจุลินทรีย์ด้วยวิธี Heat treatment มีการศึกษาใน 3 หัวข้อใหญ่คือ

1.2.1 การศึกษาถึงความเหมาะสมของสัดส่วนมวลตะกอนจุลินทรีย์ต่อความสกปรกอินทรีย์ในรูป Cell: COD โดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธี Heat treatment เป็นตัวแทน

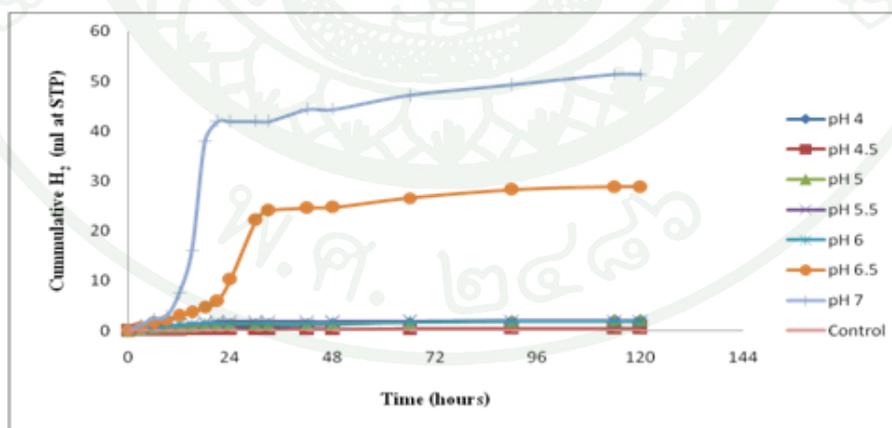
การศึกษาถึงความเหมาะสมของสัดส่วน Cell: COD โดยเปรียบเทียบ Cell: COD = 4 และ Cell: COD = 0.26 (วิธีการเตรียมการศึกษาในหัวข้อ 4.1.1 และ 4.1.6) โดยผลการศึกษาดังนี้

จากภาพที่ 12 และ 13 แสดงผลของ Cell: COD ต่อปริมาณไฮโดรเจนสะสมพบว่าปริมาณไฮโดรเจนสะสมค่อยๆเพิ่มขึ้น โดยปริมาณไฮโดรเจนสะสมสูงสุดภายใน 24 ชั่วโมง เมื่อ Cell: COD = 4 (ภาพที่ 12) และปริมาณไฮโดรเจนสะสมสูงสุดภายใน 120 ชั่วโมง เมื่อ Cell: COD = 0.26 ซึ่งปริมาณไฮโดรเจนกว่า 80% เกิดใน 24 ชั่วโมง (ภาพที่ 13) เมื่อพิจารณาผล

ของ Cell: COD ทั้ง 2 ค่า พบว่าปริมาณไฮโดรเจนสะสมสูงสุดเมื่อ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 7 แต่ที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 4, 4.5 และ 5 พบว่าปริมาณไฮโดรเจนเกิดน้อยมาก



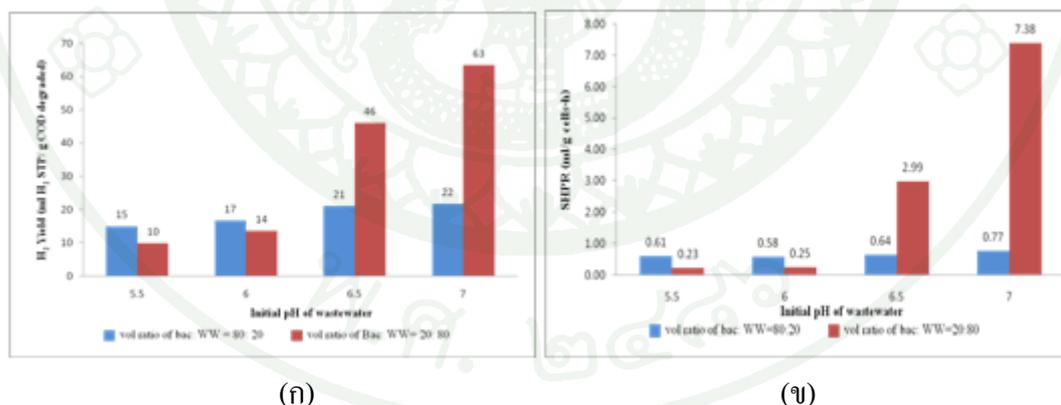
ภาพที่ 12 ปริมาณไฮโดรเจนสะสมที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียที่แตกต่างกัน หมักด้วยตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธี Heat treatment ของ Cell: COD = 4 โดยในช่วงเริ่มต้นการหมักตะกอนจุลินทรีย์มี Activity ต่ำ (%H₂ ในการเริ่มต้นการหมักประมาณ 25%)



ภาพที่ 13 ปริมาณไฮโดรเจนสะสมที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียที่แตกต่างกัน หมักด้วยตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธี Heat treatment ของ Cell: COD = 0.26 โดยในช่วงเริ่มต้นการหมักตะกอนจุลินทรีย์มี Activity ต่ำ (%H₂ ในการเริ่มต้นการหมักประมาณ 30%)

ผลผลิตไฮโดรเจน (H_2 yield, ml H_2 /g COD degraded) และอัตราการผลิตไฮโดรเจนจำเพาะ (Specific hydrogen production rate, SHPR, ml H_2 /g cells-hr) เป็นตัวชี้วัดสำคัญที่การศึกษานี้ใช้เปรียบเทียบผลการศึกษาค่า Cell: COD ที่เหมาะสม โดยที่ H_2 yield คือปริมาณไฮโดรเจนที่เกิดต่อของเสียที่ถูกกำจัด (ml H_2 /g COD degraded) จากการศึกษานี้เมื่อ Cell: COD = 4 H_2 yield มีค่าเป็น 15, 17, 21 และ 22 ml ที่ STP/g COD degraded เมื่อ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 5.5, 6, 6.5 และ 7 ตามลำดับ และผลการศึกษาค่า Cell: COD = 0.26 H_2 yield มีค่าเป็น 10, 14, 46 และ 63 ml ที่ STP/g COD degraded เมื่อ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 5.5, 6, 6.5 และ 7 ตามลำดับ (ภาพที่ 14(ก))

อัตราการผลิตไฮโดรเจนจำเพาะ (SHPR, ml H_2 /g cells-hr) คือ อัตราการผลิตไฮโดรเจนสูงสุดที่ได้จากความชันกราฟของการเกิดไฮโดรเจนสะสมใน 24 ชั่วโมงแรก (ml/hr) ต่อความเข้มข้นของเซลล์เริ่มต้น (การคำนวณในภาคผนวก ข) จากผลการศึกษานี้เมื่อ Cell: COD = 4 พบว่า SHPR มีค่าเป็น 0.61, 0.58, 0.64 และ 0.77 ml ที่ STP/g cells-hr ที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสีย 5.5, 6, 6.5 และ 7 ตามลำดับ และจากผลการศึกษานี้เมื่อ Cell: COD = 0.26 พบว่า SHPR มีค่าเป็น 0.14, 0.13, 2.99 และ 7.38 ml ที่ STP/g cells-hr ที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสีย 5.5, 6, 6.5 และ 7 ตามลำดับ (ภาพที่ 14(ข))



ภาพที่ 14 การเปรียบเทียบ (ก) H_2 yield และ (ข) SHPR ที่ได้จากการเดินระบบบำบัดที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียแตกต่างกัน หมักด้วยตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธี Heat treatment ของ Cell: COD = 4 และ Cell: COD = 0.26 โดยแสดงผล pH เริ่มต้นของน้ำเสียที่ 5.5-7 (ไม่รายงานผลที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสีย 4-5 เพราะปริมาณไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นน้อยมาก)

เมื่อเดินระบบการหมักแบบ Batch process ในสภาวะไร้แสง (Dark fermentation) โดยใช้ น้ำเสียโรงงานแป้งมันสำปะหลังที่มี pH เริ่มต้นของน้ำเสียที่แตกต่างกัน พบว่าที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเท่ากับ 7 จะให้ H_2 yield สูงสุด คือ 63 ml ที่ STP/g COD degraded และ SHPR สูงสุดคือ 7.38 ml ที่ STP/g cells-hr จากการเดินระบบด้วยอัตราส่วน Cell: COD = 0.26 เมื่อเปรียบเทียบผลการศึกษานี้กับการศึกษาของ Argun *et al.* (2009) ซึ่งทดลองโดยใช้ผงข้าวสาลีเป็น Substrate พบว่าการศึกษาที่มีความสอดคล้องกันโดย Argun *et al.* (2009) รายงานว่า % H_2 สะสมและ H_2 yield สูงสุดที่อัตราส่วนของ Cell: COD = 0.22 กรัมเซลล์ต่อกรัมผงข้าวสาลี ดังนั้นในการหมักเพื่อผลิตไฮโดรเจนขั้นต่อไป จึงใช้อัตราส่วนของ Cell: COD = 0.26 (ใช้น้ำเสียโรงงานแป้งมันสำปะหลัง 80 มิลลิลิตรต่อตะกอนจุลินทรีย์ 20 มิลลิลิตร)

จากทฤษฎี (Sung *et al.*, 2002) พบว่าถ้า substrate ถูกเปลี่ยนเป็นกรดอะซิติกทั้งหมด H_2 yield จะมีค่าสูงสุดที่ 467 ml H_2 /g-COD แต่จากผลการศึกษาพบว่า H_2 yield มีค่า 63 ml ที่ STP/g COD degraded ซึ่งน้อยมากเมื่อเทียบกับค่า H_2 yield ตามทฤษฎี H_2 yield ที่เกิดขึ้นจริงจะต่ำกว่าค่าทางทฤษฎีเหล่านี้ โดยมีเหตุผล 3 ประการ ประการแรกคือ กลูโคสอาจเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์อื่นที่ไม่ใช่ไฮโดรเจน ประการที่สองการย่อยสลายกลูโคสไม่ได้เปลี่ยนไปเป็นไฮโดรเจน แต่เปลี่ยนไปเป็นมวลแบคทีเรีย (Woodward *et al.*, 2000; Hallenbeck and Benemann, 2002) ประการสุดท้ายไฮโดรเจนบางส่วนถูกเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์อื่นๆ เช่น propionate (Vavilin *et al.*, 1995) และจากการศึกษานี้พบว่าอาจเป็นผลมาจากการใช้ Acclimated bacteria ที่ Activity ต่ำมาทำการหมัก ดังนั้นเพื่อเพิ่ม H_2 yield จึงมีการศึกษาถึง Activity ของตะกอนจุลินทรีย์ ในการศึกษา ขั้นต่อไป

1.2.2 การศึกษา Activity ของตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตไฮโดรเจน โดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธี Heat treatment เป็นตัวแทน

การศึกษา Activity ของตะกอนจุลินทรีย์ในระบบการหมักที่มีต่อปริมาณไฮโดรเจนสะสม เป็นการศึกษาเปรียบเทียบ % H_2 ของตะกอนจุลินทรีย์ในช่วงเริ่มต้นการหมัก (หลังจากตะกอนจุลินทรีย์ผ่านการ Acclimation) โดยแบ่งเป็นตะกอนจุลินทรีย์ที่มี Activity ต่ำ (% H_2 ในการเริ่มต้นการหมักต่ำกว่า 50%) และตะกอนจุลินทรีย์ที่มี Activity สูง (% H_2 ในการเริ่มต้นการหมักประมาณ 50%) การหมักใช้สัดส่วนของ Cell: COD = 0.26 (จากผลการศึกษาข้อ 1.2.1)

โดยศึกษาผลของ Activity ของตะกอนจุลินทรีย์ที่มีผลต่อปริมาณไฮโดรเจนสะสม H_2 yield และ SHPR จากภาพที่ 13 และ 15 พบว่าการผลิตไฮโดรเจนโดยระบบ Batch

process ด้วยตะกอนจุลินทรีย์ที่มี Activity สูง (ภาพที่ 15) จะได้ปริมาณไฮโดรเจนสะสมที่สูงกว่า ตะกอนจุลินทรีย์ที่มี Activity ต่ำ (ภาพที่ 13) โดยตะกอนจุลินทรีย์ที่มี Activity ต่ำ (%H₂ ในการ เริ่มต้นการหมักต่ำกว่า 50%) จะให้ปริมาณ H₂ สะสมสูงสุดประมาณ 45 ml ที่ STP ภายใน 24 ชั่วโมงเมื่อ pH เริ่มต้นน้ำเสียเป็น 7 แต่ตะกอนจุลินทรีย์ที่มี Activity สูง (%H₂ ในการ เริ่มต้นการ หมักประมาณ 50%) จะให้ปริมาณ H₂ สะสมสูงสุดประมาณ 70 ml ที่ STP ภายใน 24 ชั่วโมงของ pH เริ่มต้นน้ำเสียเป็น 4

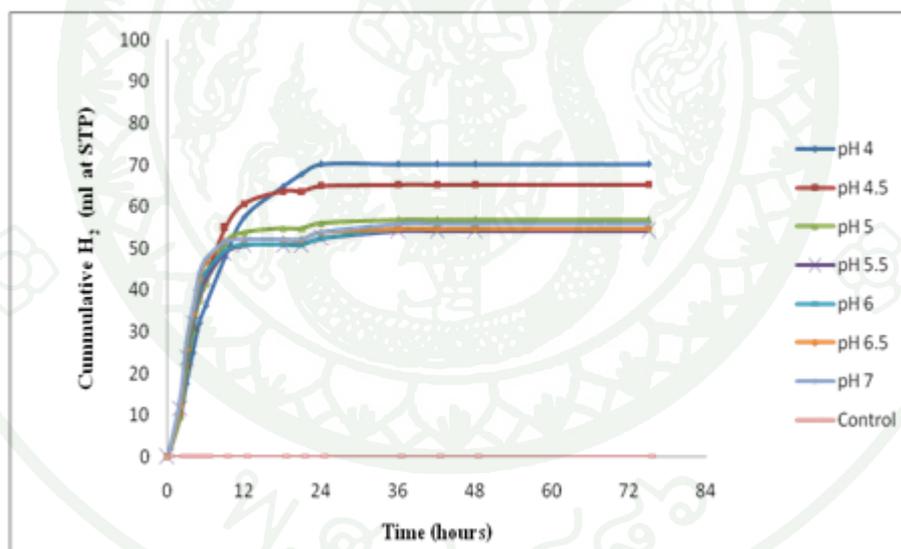
การผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ Acclimated bacteria ที่มี Activity สูง (%H₂ ในการ เริ่มต้นการหมักประมาณ 50%) ระบบหมักสามารถผลิตไฮโดรเจน และได้ H₂ yield และ SHPR สูงสุดเมื่อ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 4 โดย H₂ yield ที่ได้มีค่า 255 ml H₂/g COD degraded และ SHPR ที่ได้มีค่า 13.94 ml H₂/g cells-hr ส่วนตะกอนจุลินทรีย์ที่มี Activity ต่ำ (%H₂ ในการ เริ่มต้น การหมักต่ำกว่า 50%) ระบบหมักสามารถผลิตไฮโดรเจน และได้ H₂ yield และ SHPR สูงสุดเมื่อ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 7 โดย H₂ yield ที่ได้มีค่า 63 ml H₂/g COD degraded และ SHPR ที่ได้มีค่า 7.38 ml H₂/g cells-hr (ภาพที่ 16(ก) และ ภาพที่ 16(ข))

ผลการศึกษานี้พบว่า pH เริ่มต้นที่เหมาะสมของน้ำเสียในระบบที่ให้ปริมาณ ไฮโดรเจนสูงจะเปลี่ยนแปลงได้ ขึ้นกับ Activity ของตะกอนจุลินทรีย์ เมื่อตะกอนจุลินทรีย์มี Activity ต่ำ pH เริ่มต้นที่เหมาะสมควรมีค่ากลางๆ แต่เมื่อตะกอนจุลินทรีย์มี Activity สูง pH เริ่มต้นที่เหมาะสมในการหมักเพื่อให้ได้ไฮโดรเจนสูงจะมีค่าประมาณ 4-4.5

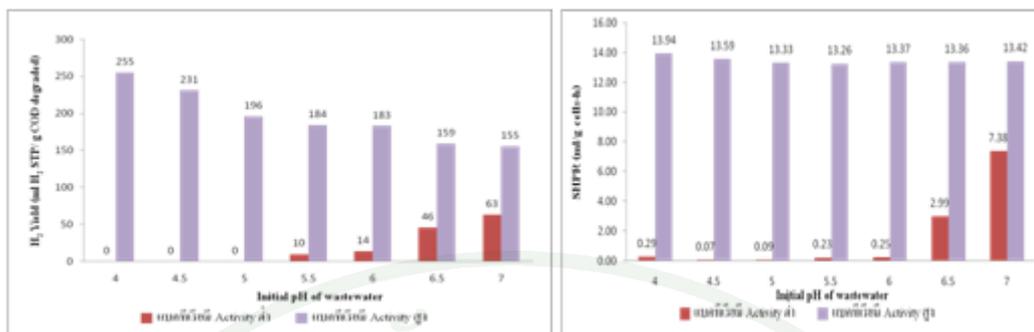
เมื่อเปรียบเทียบผลการศึกษการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้น้ำแป้งมันสำปะหลังเป็น Substrate ของ Khanal *et al* (2004) พบว่า pH เริ่มต้นของน้ำเสียที่เหมาะสมในการผลิตไฮโดรเจน คือ 4.5 การศึกษาของ Zhang *et al* (2003) พบว่า pH เริ่มต้นที่เหมาะสมคือ 6 การศึกษาของ Chen *et al* (2008) พบว่า pH เริ่มต้นที่เหมาะสมคือ 7.5 การศึกษาของ Lin and Shen (2004) พบว่า pH เริ่มต้น ที่เหมาะสมคือ 7-8 และจากการศึกษานี้พบว่า pH เริ่มต้นของน้ำเสียที่เหมาะสมมีทั้งช่วงที่เป็นกรด และช่วงที่เป็นกลาง โดยตะกอนจุลินทรีย์มี Activity ที่แตกต่างกัน ดังนั้น Activity ของตะกอน จุลินทรีย์ในช่วงเริ่มต้นการหมักมีผลต่อ pH เริ่มต้นที่เหมาะสมในการหมักเพื่อให้ได้ไฮโดรเจน สูงสุด และ pH สุดท้ายของทุกการศึกษาพบว่า pH อยู่ในช่วงกรด หรือช่วง Acidogenesis ซึ่งเป็น ช่วงที่มีการผลิตไฮโดรเจน และพบมีเทน (CH₄) ไม่เกิน 3%

1.2.3 การศึกษา pH เริ่มต้นของน้ำเสียที่ส่งผลต่อการผลิตไฮโดรเจน

การศึกษาเพื่อให้ได้ปริมาณไฮโดรเจนสูงสุด H_2 yield สูงสุด และ SHPR สูงสุด จะต้องทำการศึกษาโดยใช้ Acclimated bacteria ที่มี Activity สูง กล่าวคือ ในระหว่างการ Acclimation จะต้องติดตามตรวจสอบปริมาณไฮโดรเจน ($\%H_2$) ที่ผลิตได้ และนำตะกอนจุลินทรีย์ที่ผลิต $\%H_2$ สูงกว่า 50% มาเริ่มต้นการหมัก (การ Acclimation ตะกอนจุลินทรีย์ให้ที่มี Activity สูงทำได้ดังข้อ 1.1) ควรใช้ Acclimated bacteria มีค่า pH ประมาณ 4 และทำการหมักที่มี pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 4 เมื่อใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธี Heat treatment เมื่อพิจารณาอัตราการเกิดปริมาณไฮโดรเจน(ภาพที่ 15)พบว่า อัตราการเกิดปริมาณไฮโดรเจนสูงสุดภายใน 12 ชั่วโมงแรก ซึ่ง pH ในระบบการหมักมีค่าเป็นกรดประมาณ 4.4-4.7 (ตารางผนวกที่ ก11) ดังนั้นควรควบคุม pH ให้มีค่าประมาณ 4.4-4.7 เพื่อให้ระบบมีอัตราการเกิดไฮโดรเจนในปริมาณสูงสุด การศึกษานี้พบว่า $\%COD$ degraded ประมาณ 13% (ตารางผนวกที่ ก61)



ภาพที่ 15 ปริมาณไฮโดรเจนสะสมที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียที่แตกต่างกัน หมักด้วยด้วยตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธี Heat treatment ของ Cell: COD = 0.26 โดยในช่วงเริ่มต้นการหมัก ตะกอนจุลินทรีย์มี Activity สูง ($\%H_2$ ในการเริ่มต้นการหมักประมาณ 50%)



(ก)

(ข)

ภาพที่ 16 การเปรียบเทียบ (ก) H₂ yield และ (ข) SHPR ที่ได้จากการเดินระบบบำบัดที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียแตกต่างกันด้วยตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธี Heat treatment ของตะกอนจุลินทรีย์ที่มี Activity ต่ำ (%H₂ ในการเริ่มต้นการหมักต่ำกว่า 50%) และตะกอนจุลินทรีย์ที่มี Activity สูง (%H₂ ในการเริ่มต้นการหมักประมาณ 50%)

2. การผลิตไฮโดรเจนจากการคัดกรองตะกอนจุลินทรีย์โดยการปรับสภาพด้วยกรด (Acid treatment)

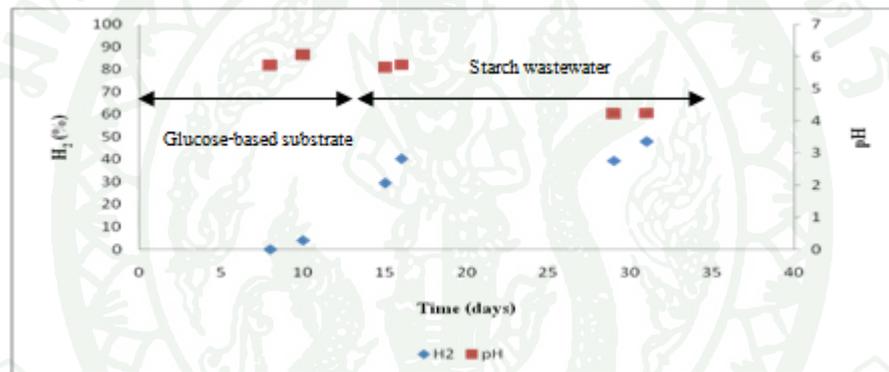
การคัดกรองตะกอนจุลินทรีย์ด้วยวิธี Acid treatment ใช้ Cell: COD = 0.26 และตะกอนจุลินทรีย์ที่มี Activity สูง (%H₂ ในการเริ่มต้นการหมักประมาณ 50%) (ผลจากการศึกษาข้อ 1.2.1 ถึง 1.2.2) โดยที่ Acclimated bacteria มีค่า pH ประมาณ 4 ผลการศึกษาแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ การเพิ่มปริมาณตะกอนจุลินทรีย์โดยการ Acclimation และการผลิตไฮโดรเจนโดยระบบ Batch process

2.1 การเพิ่มปริมาณตะกอนจุลินทรีย์โดยการ Acclimation ของการคัดกรองตะกอนจุลินทรีย์โดยการปรับสภาพด้วยกรด (Acid treatment)

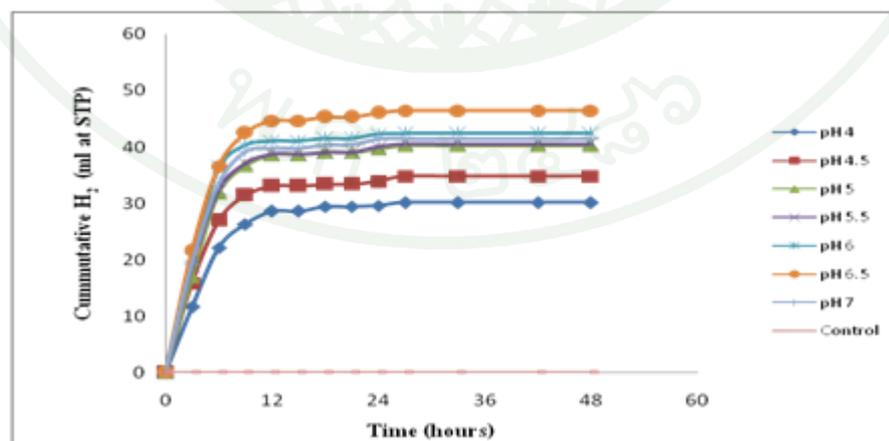
การศึกษา Acclimation ของการคัดกรองตะกอนจุลินทรีย์ด้วยวิธี Acid treatment ที่เริ่มต้นให้อาหารแก่ตะกอนจุลินทรีย์เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกลูโคส (Glucose-based substrate) ที่มี COD 6,800 mg/l และเปลี่ยนเป็นน้ำเสียโรงงานแปงมันสำปะหลังที่มี COD 29,294 mg/l ผลการศึกษาพบว่า %H₂ เพิ่มขึ้นตามระยะเวลา ขณะที่ค่า pH ลดลง (ภาพที่ 17) เมื่อ %H₂ ในการเริ่มต้นระบบประมาณ 50% ถือว่าเป็นตะกอนจุลินทรีย์ที่มี Activity สูง จึงนำตะกอนจุลินทรีย์ไปทำการหมักเพื่อผลิตไฮโดรเจนในขั้นต่อไป

2.2 การผลิตไฮโดรเจนโดยระบบ Batch process ของตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยการปรับสภาพด้วยกรด (Acid treatment)

การศึกษาถึงการผลิตไฮโดรเจนโดยระบบ Batch process โดยการคัดกรองตะกอนจุลินทรีย์ด้วยวิธี Acid treatment เมื่อตะกอนจุลินทรีย์เริ่มต้นมีค่า MLVSS 5,143 mg/l ผลการศึกษาพบว่า การหมักแบบไร้แสงด้วยน้ำเสียโรงงานแปงมันสำปะหลังที่มีค่า pH เริ่มต้นน้ำเสียเป็น 6.5 มีปริมาณไฮโดรเจนสะสมสูงสุดมีค่าประมาณ 46 ml ที่ STP (ภาพที่ 16) เมื่อพิจารณาอัตราการเกิดปริมาณไฮโดรเจน (ภาพที่ 16) พบว่า อัตราการเกิดปริมาณไฮโดรเจนสูงสุดภายใน 12 ชั่วโมงแรก ซึ่ง pH ในระบบการหมักมีค่าเป็นกรดประมาณ 4.7 (ตารางผนวกที่ ก12) ดังนั้นควรควบคุม pH ให้มีค่าประมาณ 4.7 เพื่อให้ระบบมีอัตราการเกิดไฮโดรเจนในปริมาณสูงสุด

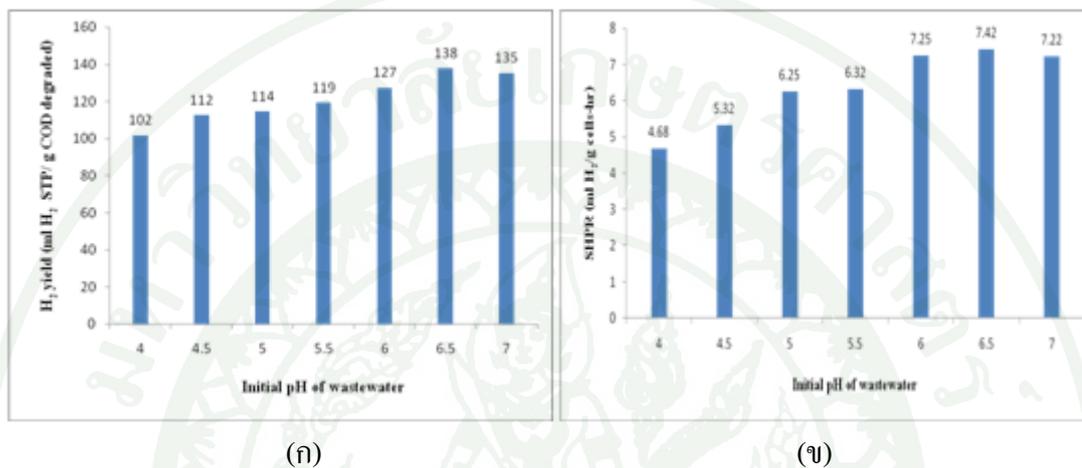


ภาพที่ 17 %H₂ ที่เกิดจากการเพิ่มปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธี Acid treatment



ภาพที่ 18 ปริมาณไฮโดรเจนสะสมที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียที่แตกต่างกันด้วยตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธี Acid treatment

ผลการศึกษา H_2 yield และ SHPR ของการศึกษา Acid treatment พบว่า H_2 yield สูงสุด มีค่า 138 ml H_2 / g COD ที่ถูกกำจัด (ภาพที่ 19(ก)) และ พบว่า SHPR สูงสุดที่ 7.42 ml H_2 / g cells-hr (ภาพที่ 19(ข)) เมื่อ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 6.5 และพบว่าการศึกษา มี %COD degraded ประมาณ 16% (ตารางผนวกที่ ก62)



ภาพที่ 19 การเปรียบเทียบ (ก) H_2 yield และ (ข) SHPR ที่ได้จากการเดินระบบบำบัดที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียแตกต่างกันด้วยตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธี Acid treatment ของตะกอนจุลินทรีย์ที่มี Activity สูง (% H_2 ในการเริ่มต้นการหมักประมาณ 50%)

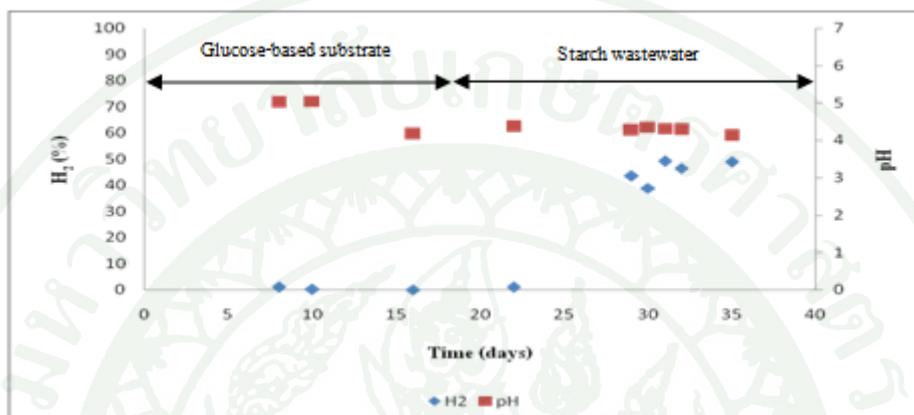
3. การผลิตไฮโดรเจนจากการคัดกรองตะกอนจุลินทรีย์โดยการปรับสภาพด้วยด่าง (Base treatment)

การคัดกรองตะกอนจุลินทรีย์ด้วยวิธี Base treatment ใช้ Cell: COD = 0.26 และตะกอนจุลินทรีย์มี Activity สูง (% H_2 ในการเริ่มต้นการหมักประมาณ 50%) (ผลจากการศึกษาข้อ 1.2.1 ถึง 1.2.2) โดยที่ Acclimated bacteria มีค่า pH ประมาณ 4 ผลการศึกษาแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ การเพิ่มปริมาณตะกอนจุลินทรีย์โดยการ Acclimation และการผลิตไฮโดรเจนโดยระบบ Batch process

3.1 การเพิ่มปริมาณตะกอนจุลินทรีย์โดยการ Acclimation ของการคัดกรองตะกอนจุลินทรีย์โดยการปรับสภาพด้วยด่าง (Base treatment)

การศึกษา Acclimation ของการคัดกรองตะกอนจุลินทรีย์ด้วยวิธี Base treatment ที่เริ่มต้นให้อาหารแก่ตะกอนจุลินทรีย์เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกลูโคส (Glucose-based substrate) ที่

มี COD 6,800 mg/l และเปลี่ยนเป็นน้ำเสียโรงงานแป้งมันสำปะหลังที่มี COD 29,294 mg/l ผลการศึกษาพบว่า %H₂ เพิ่มขึ้นตามระยะเวลา ขณะที่ค่า pH ลดลง (ภาพที่ 20) เมื่อ %H₂ ประมาณ 50% ถือว่าเป็นตะกอนจุลินทรีย์ที่มี Activity สูง จึงนำตะกอนจุลินทรีย์ไปทำการหมักเพื่อผลิตไฮโดรเจนในขั้นต่อไป

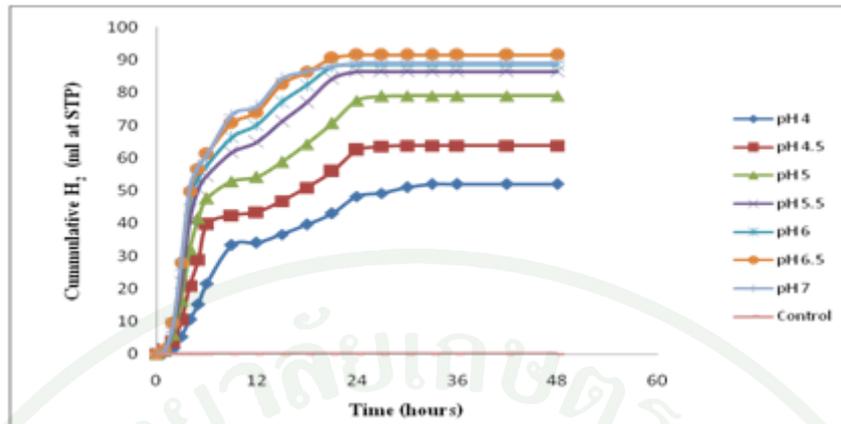


ภาพที่ 20 %H₂ ที่เกิดจากการเพิ่มปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธี Base treatment

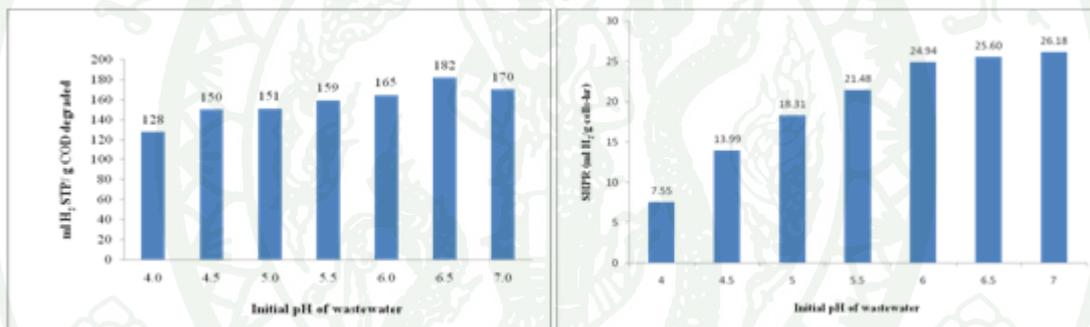
3.2 การผลิตไฮโดรเจนโดยระบบ Batch process ของตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยการปรับสภาพด้วยด่าง (Base treatment)

การศึกษถึงการผลิตไฮโดรเจนโดยระบบ Batch process โดยการคัดกรองตะกอนจุลินทรีย์ด้วยวิธี Base treatment เมื่อตะกอนจุลินทรีย์เริ่มต้นมีค่า MLVSS 5,329 mg/l พบว่า การหมักแบบไร้แสงด้วยน้ำเสียโรงงานแป้งมันสำปะหลังที่มีค่า pH เริ่มต้นน้ำเสียเป็น 6.5 จะให้ปริมาตร H₂ สะสมสูงสุดมีค่าประมาณ 90 ml ที่ STP (ภาพที่ 21) เมื่อพิจารณาอัตราการเกิดปริมาตรไฮโดรเจน(ภาพที่ 21)พบว่า อัตราการเกิดปริมาตรไฮโดรเจนสูงสุดภายใน 12 ชั่วโมงแรก ซึ่ง pH ในระบบการหมักมีค่าเป็นกรดประมาณ 4.7 (ตารางผนวกที่ ก13) ดังนั้นควรควบคุม pH ให้มีค่าประมาณ 4.7 เพื่อให้ระบบมีอัตราการเกิดไฮโดรเจนในปริมาณสูงสุด

ผลการศึกษา H₂ yield และ SHPR ของการศึกษา Base treatment พบว่า H₂ yield สูงสุดมีค่า 182 ml H₂/ g COD ที่ถูกกำจัด (ภาพที่ 22(ก)) ของ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 6.5 และ พบว่า SHPR มีค่า 25.60 ml H₂/ g cells-hr (ภาพที่ 22(ข)) โดยที่ค่า H₂ yield และ SHPR ที่ pH 6.5 และ 7 มีค่าไม่ต่างกันมากนัก (ภาพที่ 22(ก) และ (ข)) และพบว่าการศึกษามี %COD degraded สูงสุดประมาณ 20% (ตารางผนวกที่ ก63)



ภาพที่ 21 ปริมาณไฮโดรเจนสะสมที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียที่แตกต่างกันด้วยตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธี Base treatment



(ก)

(ข)

ภาพที่ 22 การเปรียบเทียบ (ก) H₂ yield และ (ข) SHPR ที่ได้จากการเดินระบบบำบัดที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียแตกต่างกันด้วยตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธี Base treatment ของตะกอนจุลินทรีย์ที่มี Activity สูง (%H₂ ในการเริ่มต้นการหมักประมาณ 50%)

4. การผลิตไฮโดรเจนจากการคัดกรองตะกอนจุลินทรีย์โดยการปรับสภาพด้วยคลอโรฟอร์ม (Chloroform) และการแช่แข็งและละลาย (Freezing and thawing)

การศึกษา Acclimation ของการคัดกรองตะกอนจุลินทรีย์ด้วย Chloroform และ Freezing and thawing ที่เริ่มต้นให้อาหารแก่ตะกอนจุลินทรีย์เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกลูโคส (Glucose-based substrate) ที่มี COD 6,800 mg/l และเปลี่ยนเป็นน้ำเสียโรงงานแปงมันสำปะหลังที่มี COD

29,294 mg/l ผลการศึกษาพบว่า %H₂ สูงสุดมีค่าไม่เกิน 5% ดังนั้นจึงไม่น่าจะกอนจุลินทรีย์ไปทำการหมักเพื่อผลิตไฮโดรเจนในขั้นต่อไป (ภาพผนวกที่ ก1 และภาพผนวกที่ ก2)

ผลการศึกษาพบว่าการคัดกรองแบคทีเรียด้วยวิธี Heat treatment, Acid treatment และ Base treatment เป็นการคัดกรองแบคทีเรียที่สามารถเพิ่มปริมาณในการผลิตไฮโดรเจน โดยกำจัดแบคทีเรียที่ผลิตมีเทน เนื่องจากแบคทีเรียผลิตมีเทนสามารถบริโภคไฮโดรเจนได้ (Li and Fang, 2007) ในการคัดกรองตะกอนจุลินทรีย์ด้วยวิธีต่างๆ จะมีการกำจัดแบคทีเรียชนิดที่ผลิตไฮโดรเจนด้วย ทำให้ในช่วงแรกของการ Acclimation ปริมาณไฮโดรเจน (%H₂) มีค่าต่ำ แต่เมื่อเวลาผ่านไปแบคทีเรียมีการเจริญเติบโตและเพิ่มจำนวนขึ้น จึงทำให้ %H₂ สูงขึ้น และเมื่อเปลี่ยนจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกลูโคส (Glucose-based substrate) มาเป็นน้ำเสียโรงงานแปรงมันสำปะหลัง (Starch wastewater) พบว่า %H₂ มีมากขึ้น เพราะน้ำเสียโรงงานแปรงมันสำปะหลังมีค่า COD ที่สูงกว่าน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกลูโคส ดังนั้นน้ำเสียโรงงานแปรงมันสำปะหลังจึงสามารถนำมาใช้เป็น Substrate ในการผลิต ไฮโดรเจนได้ แต่ถ้า pH ของตะกอนจุลินทรีย์ในช่วง Acclimation มีค่าต่ำกว่า 4 ผลคือ %H₂ ลดลง ซึ่งมีการศึกษาของ Wei *et al.* (2009) พบว่า Activity ของแบคทีเรียชนิดที่ผลิตไฮโดรเจนจะถูกยับยั้งด้วย pH ที่ต่ำ และการศึกษาของ Zhang *et al.* (2003) พบว่า เมื่อ pH ต่ำกว่า 4 การผลิตไฮโดรเจนจะถูกยับยั้ง ส่วนการคัดกรองตะกอนจุลินทรีย์ด้วยวิธี Chloroform และ Freezing and thawing (ภาพผนวกที่ ก1 และ ภาพผนวกที่ ก2) ไม่สามารถเพิ่มปริมาณแบคทีเรียชนิดที่ผลิตไฮโดรเจนได้ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Wang *et al.*(2010) ทำการศึกษาโดยใช้กลูโคสเป็น Substrate พบว่า Heat treatment, Acid treatment และ Base treatment เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการคัดกรองแบคทีเรียชนิดที่ผลิตไฮโดรเจนได้มากกว่า Chloroform และการใช้สารเคมีอื่นๆ ในการคัดกรองแบคทีเรีย

ตารางที่ 2 สรุปผลการศึกษาในการเดินระบบด้วย Batch process ของการคัดกรองตะกอนจุลินทรีย์ด้วยวิธีต่างๆ โดยใช้สัดส่วน Cell: COD = 0.26 ตะกอนจุลินทรีย์เริ่มต้นการหมักด้วย Activity สูง (%H₂ ในการเริ่มต้นการหมักประมาณ 50%)

Pre-treatment	Optimum initial pH of wastewater	H ₂ yield (ml/g COD degraded)	SHPR (ml/g cells-hr)
Heat treatment	4	255	13.94
Acid treatment	6.5	138	7.42
Base treatment	6.5	182	25.60

จากผลศึกษาในช่วงเดินระบบ Batch process สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2 โดยที่ใช้สัดส่วนมวลตะกอนจุลินทรีย์ต่อความสกปรกอินทรีย์ (Cell: COD) มีค่า 0.26 g cell/g COD ตะกอนจุลินทรีย์มี Activity สูง (%H₂ ก่อนเริ่มต้นการหมักประมาณ 50%) และในช่วงเริ่มต้นการหมักตะกอนจุลินทรีย์มี pH ไม่ต่ำกว่า 4 พบว่า H₂ yield สูงสุดเกิดจากการใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธี Heat treatment รองลงมาเป็น Base treatment และ Acid treatment ตามลำดับ ซึ่งมีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Ren *et al.* (2007) พบว่า การศึกษาน้ำเสียชุมชนโดยใช้แบคทีเรียที่มีการคัดกรองด้วยวิธีต่างๆ H₂ yield จะมีค่าสูงโดยการคัดกรองแบคทีเรียด้วยวิธี Heat treatment, Base treatment และ Acid treatment ตามลำดับ จากตารางที่ 2 พบว่าในการศึกษาด้วยตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธี Heat treatment ซึ่งมี H₂ yield ที่สูงสุดมีค่า 255 ml H₂/g COD degraded และ pH เริ่มต้นของน้ำเสียที่มี H₂ yield สูงสุดคือ pH 4 เมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาของ Chen *et al.* (2008) ที่ศึกษาถึงการผลิตไฮโดรเจนด้วยน้ำเสียโรงงานแป่งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการคัดกรองแบคทีเรีย พบว่าค่า H₂ yield ของการศึกษามีค่า 2.81 mmol H₂/g COD (62.94 ml H₂/g COD) ซึ่งมีค่าน้อยกว่าการศึกษานี้ที่มีการคัดกรองตะกอนจุลินทรีย์ ซึ่งจะเห็นได้ว่าวิธีการคัดกรองแบคทีเรียของแต่ละการศึกษานั้นให้ผลที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นผลมาจากปัจจัยอื่นๆ เช่น แหล่งแบคทีเรีย หรือ Substrate ก็จะมีผลต่อการผลิตไฮโดรเจนได้ นอกจากนี้วิธีการคัดกรองแบคทีเรียด้วยวิธี Heat treatment เป็นวิธีที่นิยมใช้ในการผลิตไฮโดรเจนเป็นอย่างมาก เพราะเป็นวิธีที่ง่ายและประหยัดต้นทุน ถึงแม้ว่าวิธีนี้จะสามารถกำจัดแบคทีเรียที่สร้างมีเทนได้ แต่ก็อาจจะเป็นการลดจำนวนของแบคทีเรียชนิดที่ผลิตไฮโดรเจนที่ไม่ได้อยู่ในรูปสปอร์ จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการผลิตไฮโดรเจนลดต่ำลงได้ และจากค่า Specific hydrogen production rate (SHPR) พบว่า ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธี Base treatment มีอัตราการเกิดไฮโดรเจนเร็วที่สุดที่ 25.60 ml/g cells-hr ซึ่งมีอัตราการเกิดไฮโดรเจนที่เร็วกว่า แต่เกิดผลผลิตไฮโดรเจนที่น้อยกว่าตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธี Heat treatment

การกำจัดความสกปรกอินทรีย์ พบว่าทุกการศึกษามี %COD degraded ประมาณ 20% ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Wei และคณะ (2009) พบว่าการผลิตไฮโดรเจนจากน้ำเสียโรงงานแป่งมันสำปะหลังมี %COD degraded ต่ำกว่า 20%

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการศึกษาการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากน้ำเสียและตะกอนจุลินทรีย์ผสมจากโรงงานแปรงมันสำปะหลังที่มีค่า pH ของน้ำเสียจริงเป็น 3.79 ค่า COD ของน้ำเสียเป็น 29,294 mg/l และ pH ของตะกอนจุลินทรีย์ที่มาจากโรงงานเป็น 3.81 และมีมวลตะกอนจุลินทรีย์ (MLVSS) ประมาณ 5,000 mg/l โดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ภายใต้สภาวะไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic process) และสภาวะไร้แสง (Dark fermentation) ซึ่งนำตะกอนจุลินทรีย์ผ่านการคัดกรองโดยการปรับสภาพด้วยความร้อน กรดต่าง คลอโรฟอร์ม และการแช่แข็งและละลายมาใช้ศึกษาด้วยกระบวนการ Batch process ที่อุณหภูมิ 35°C ในขวดซีรัมขนาดใช้งาน 100 ml วิเคราะห์ผลการศึกษาโดยวัดปริมาณก๊าซไฮโดรเจนด้วยการวัดปริมาณน้ำจากระบบการแทนที่น้ำและนำตัวอย่างก๊าซที่เก็บจากการเดินระบบมาวิเคราะห์ก๊าซไฮโดรเจน สามารถสรุปผลการศึกษาดังนี้

1. น้ำเสียโรงงานแปรงมันสำปะหลังเป็นสารตั้งต้นที่ดีในการผลิตไฮโดรเจน และเมื่อปรับค่า pH เริ่มต้นของน้ำเสียให้มีความแตกต่างกัน พบว่า pH เริ่มต้นของน้ำเสียมีผลต่อการผลิตไฮโดรเจน
2. ตะกอนจุลินทรีย์ผสมโรงงานแปรงมันสำปะหลังสามารถผลิตไฮโดรเจนได้ โดยต้องผ่านกระบวนการคัดกรองตะกอนจุลินทรีย์ด้วยวิธีการปรับสภาพด้วยความร้อน หรือกรด หรือด่าง และวิธีการคัดกรองตะกอนจุลินทรีย์โดยการปรับสภาพด้วยคลอโรฟอร์มและการแช่แข็งและละลาย ไม่สามารถสร้างแบคทีเรียที่ผลิตไฮโดรเจนได้
3. สัดส่วนมวลตะกอนจุลินทรีย์ต่อความสกปรกอินทรีย์ในรูป Cell: COD ที่เหมาะสมของการศึกษา คือ 0.26 g cell/g COD
4. การผลิตไฮโดรเจนเพื่อให้ได้ปริมาณสูง ตะกอนจุลินทรีย์เริ่มต้นการหมักต้องมีความสามารถ (Activity) สูง ปริมาณไฮโดรเจนจากการ Acclimation ประมาณ 50% และ pH ของตะกอนจุลินทรีย์เริ่มต้นการหมักจะอยู่ในช่วง pH ที่เป็นกรด แต่ต้องไม่ต่ำกว่า 4
5. เมื่อใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีการปรับสภาพด้วยความร้อน pH น้ำเสียเริ่มต้นที่เหมาะสมต่อการผลิตไฮโดรเจนเป็น 4 และได้ผลผลิตไฮโดรเจน 255 ml H₂/g COD degraded และอัตราการผลิตไฮโดรเจนจำเพาะ คือ 13.94 ml/g cells-hr เมื่อใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่

ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีการปรับสภาพด้วยกรด pH น้ำเสียเริ่มต้นที่เหมาะสมต่อการผลิตไฮโดรเจน เป็น 6.5 และได้ผลผลิตไฮโดรเจน 138 ml H₂/g COD degraded และอัตราการผลิตไฮโดรเจน จำเพาะ คือ 7.42 ml/g cells-hr เมื่อใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีการปรับสภาพด้วย ค่า pH น้ำเสียเริ่มต้นที่เหมาะสมต่อการผลิตไฮโดรเจนเป็น 6.5 และได้ผลผลิตไฮโดรเจน 182 ml H₂/g COD degraded และอัตราการผลิตไฮโดรเจนจำเพาะ คือ 25.60 ml/g cells-hr และเมื่อใช้ ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีการปรับสภาพด้วยคลอโรฟอร์ม และการแช่แข็งและ ละลายพบว่าไม่ได้ไฮโดรเจน

6. ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์เมื่อใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธี การปรับสภาพด้วยความร้อน กรด และด่าง มีประสิทธิภาพในการกำจัดประมาณ 20%

7. ในการหมักให้ได้ไฮโดรเจนปริมาณสูง ควรควบคุม pH ของระบบการหมักให้มี ค่าประมาณ 4.4-4.7

ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาชนิดของตะกอนจุลินทรีย์ในระบบ เนื่องจากตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัด กรองด้วยวิธีต่างๆ และการใช้ pH เริ่มต้นของน้ำเสียที่แตกต่างกัน ทำให้ชนิดของตะกอนจุลินทรีย์ แตกต่างกัน

2. ในการคัดกรองตะกอนจุลินทรีย์โดยการปรับสภาพด้วยคลอโรฟอร์มและการแช่แข็ง และละลาย อาจจะต้องใช้เวลาในการเพิ่มปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ในช่วง Acclimation ที่มากขึ้นจาก การทดลองนี้ และควรมีการควบคุมค่า pH ให้อยู่ในช่วงกรดแต่ต้องไม่ต่ำกว่า 4 อาจเป็นการทำให้ ได้แบคทีเรียที่ผลิตไฮโดรเจน

3. ควรศึกษาการผลิตไฮโดรเจนร่วมกับมีเทนโดยใช้ระบบ Two-stage anaerobic digestion แยกเป็นขั้นสร้างกรด (Acidogenesis) และขั้นสร้างมีเทน (Methanogenesis)

4. ควรศึกษาค่า Volatile Fatty Acids เพิ่มเติม

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร. 2553. แก๊ซไฮโดรเจน. พลังงานอนาคต. แหล่งที่มา: http://www.eng.mut.ac.th/article_detail.asp?ArticleID=462, มกราคม 2553
- วรินทร์ สงคศิริ. 2553. มลพิษ/ของเสีย และการจัดการสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง. แหล่งที่มา: <http://www.thailandtapiocastarch.net/technology-detail/>, ธันวาคม 2553
- APHA. 2005. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 21st ed., Washington DC, USA.
- Argun, H., Kargi, F. and Kapdan I.K. 2009. Effects of the Substrate and Cell Concentration on Biohydrogen Production from Ground Wheat by Combined Dark and Photo-Fermentation. **Int. J. Hydrogen Energy** (34): 6181-6188.
- Brock, T.D., Madigan, M.T., Martinko, J.M. and Parker, J. 1994. **Biology of Microorganisms**. Prentice Hall, New York.
- Chang, J.S., Lee, K.S. and Lin, P.J. 2002. Biohydrogen Production with Fixed-bed Bioreactors. **Int. J. Hydrogen Energy** 27(11/12): 1167–1174.
- Chen, C.C., Lin, C.Y. and Lin, M.C. 2002. Acid-base Enrichment Enhances Anaerobic Hydrogen Production Process. **Appl. Microbiol. Biotechnol** 58(2): 224–228.
- Chen, S.D., Leeb, K.S., Loa, Y.C., Chenc, W.M., Wua, J.F., Lind, C.Y. and Chang, J.S. 2008. Batch and Continuous Biohydrogen Production from Starch Hydrolysate by Clostridium species. **Int. J. Hydrogen Energy** 33: 1803–1812.

- Cheng, S.S., Lin, C.Y., Tseng, I.C., Lee, C.M., Lin, H.I., Lin, M.R., Chen, S.T., Chen, S.D. and Liu, P.W. 2003. Biohydrogen Production Mechanisms and Processes Application on Multiple Substrates. **NRL Int. Workshop on Innovative Anaerobic Technology 1**: 33–39.
- Dabrock, B., Bahl, H. and Gottschalk, G. 1992. Parameters affecting solvent production by, *Clostridium pasteurianum*. **Appl. Environ. Microbiol** 58(4): 1233–1239.
- Das, D. and Veziroglu, T.N. 2001. Hydrogen Production by Biological Processes: A Survey of Literature. **Int. J. Hydrogen Energy** 26(1): 13–28.
- de Vrije, T. and Claassen, P.A.M. 2003. **Dark Hydrogen Fermentations. In Bio-methane and Bio-hydrogen**, Reith, J.H., Wijffels, R.H., and Barten, H., eds. Dutch Biological Hydrogen Foundation, Smiet Offset, The Hague, the Netherlands, 103–123.
- Deublein, D. and Steinhauser, A. 2008. **Biogas from Waste and Renewable Resources**. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. Weinheim: 93-99.
- Dincer, I. 2002. Technical Environmental and Exergetic Aspects of Hydrogen Energy Systems. **Int. J. Hydrogen Energy** 27(3): 265–285.
- Dunn, S. 2002. Hydrogen Futures: Toward a Sustainable Energy System. **Int. J. Hydrogen Energy** 27: 235–264.
- Fan, Y.T., Li, C.L., Lay, J.J., Hou, H.W. and Zhang, G.S. 2004. Optimization of Initial Substrate and pH Levels for Germination of Sporing Hydrogen-producing Anaerobes in Cow Dung Compost. **Bioresource Technol** 91(2): 189–193.
- _____, Zhang, G. S., Guo, X. Y., Xing, Y. and Fan, M. H. 2006. Biohydrogen Production from Beer Lees Biomass by Cow Dung Compost. **Biomass Bioenergy** 30: 493–496.

- Fang, HHP. and Liu, H. 2002. Effect of pH on Hydrogen Production from Glucose by a Mixed Culture. **Bioresour Technol** 82: 87–93.
- _____, Li, C., and Zhang, T. 2006. Acidophilic Biohydrogen Production from Rice Slurry. **Int. J. Hydrogen Energy** 31: 683–692.
- Gray, C.T. and Gest, H. 1965. Biological Formation of Molecular Hydrogen. **Science** 148: 186- 192.
- Hallenbeck, P.C. and Benemann, J.R. 2002. Biological Hydrogen Production; Fundamentals and Limiting Processes. **Int. J. Hydrogen Energy** 27(11/12): 1185–1193.
- Hart, D. 1997. **Hydrogen Power: The Commercial Future of the Ultimate Fuel**. Financial Times Energy Publishing, London.
- Hoffmann, P. 2001. **Tomorrow's Energy—Hydrogen**. Fuel Cells and the Prospects for a Cleaner Planet. MIT Press, Cambridge, MA.
- Hu, B. and Chen, S.L. 2007. Pretreatment of Methanogenic Granules for Immobilized Hydrogen Fermentation. **Int. J. Hydrogen Energy** 32: 3266-73.
- IPCC. 1996. **Climate Change 1995: The Science of Climate Change. In: Intergovernmental Panel on Climate Change**, Houghton, J.T., Meira Filho, L.G. Callander, B.A., Harris, N., Kattenberg, A. and Maskell, K., eds., Cambridge University Press, Cambridge, U.K.
- Iwasaki, W. 2003. A Consideration of the Economic Efficiency of Hydrogen Production from Biomass. **Int. J. Hydrogen Energy** 28(9): 939–944.
- Kawagoshi, Y., Hino, N., Fujimoto, A., Nakao, M., Fujita, Y., Sugimura, S. and Furukawa, K. 2005. Effect of Inoculum Conditioning on Hydrogen Production and pH Effect on Bacterial Community Relevant to Hydrogen Production. **J. Biosci Bioeng** 100(5): 524–530.

- Khanal, S.K., Chen, W.H., Li, L. and Sung, S.W. 2004. Biological Hydrogen Production: Effects of pH and Intermediate Products. **Int. J. Hydrogen Energy** 29(11): 1123–1131.
- Kondratieva, E.N. 1983. **Production of Molecular Hydrogen in Microorganisms. In: Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology**, Fiechter, A., ed., Springer-Verlag, New York: 139–191.
- Lay, J.J. 2000. Modeling and Optimization of Anaerobic Digested Sludge Converting Starch to Hydrogen. **Biotechnol Bioeng** 68(3): 269–278.
- _____. 2001. Biohydrogen Generation by Mesophilic Anaerobic Fermentation of Microcrystalline Cellulose. **Biotechnol Bioeng** 74(4): 280–287.
- _____, Lee Y.J. and Noike T. 1999. Feasibility of Biological Hydrogen Production from Organic Fraction of Municipal Solid Waste. **Water Res.** 33: 2579–86.
- Li, C. and Fang HHP. 2007. Fermentative Hydrogen Production from Wastewater and Solid Wastes by Mixed Cultures. **Crit. Rev. in Environmental Science and Technology** 37: 1-39
- Liang, T.M., Cheng, S.S. and Wu, K.L. 2002. Behavioral Study on Hydrogen Fermentation Reactor Installed with Silicone Rubber Membrane, **Int. J. Hydrogen Energy** 27: 1157–1165.
- Liu, H., Wang, G., Zhu, D. and Pan, G. 2009. Enrichment of the Hydrogen-producing Microbial Community from Marine Intertidal Sludge by Different Pretreatment Methods. **Int. J. Hydrogen Energy** 34: 9696–9701.
- Liu, G. and Shen, J. 2004. Effects of Culture Medium and Medium Conditions on Hydrogen Production from Starch Using Anaerobic Bacteria. **J. Biosci. Bioeng.** 98: 251–256.

May, P.S., Blanchard, G.C. and Foley, R.T. 1964. **Biochemical Hydrogen Generators**, 18th Annual Proc. Power Sources Conference: 19–21.

Nandi, R. and Sengupta, S. 1998. Microbial Production of Hydrogen—An Overview, **Crit. Rev. Microbiol** 24(1): 61–84.

Oh, S.E., Van Ginkel, S.W. and Logan, B.E. 2003. The Relative Effectiveness of pH Control and Heat Treatment for Enhancing Biohydrogen Gas Production. **Environ. Sci. Technol.** 37(22): 5186–5190.

Rajeshwar, K., Ibanez, J.G. and Swain, G.M. 1994. Electrochemistry and the Environment. **J. Appl. Electrochem** 24(11): 1077–1091.

Ren, N.Q., Chua, H. and Chan, S.Y. 2007. Assessing Optimal Fermentation Type for Biohydrogen Production in Continuous-flow Acidogenic Reactors. **Bioresource Technol** 98: 1774–80

_____, Guo W.Q., Wang, X.J., Xiang, W.S., Liu, B.F., Wang, X.Z., Ding, J. and Chen, Z.B. 2008. Effects of Different Pretreatment Methods on Fermentation Types and Dominant Bacteria for Hydrogen Production. **Int. J. Hydrogen Energy** 33: 4318 – 4324

_____, and Wang, B.Z. 1994. **Hydrogen Production by Organic Wastewater Fermentation: Principle and Methods**. Heilongjiang Science and Technology Publishing, Harbin, China.

Rifkin, J. 2002. **The Hydrogen Economy**. Penguin Putnam, New York.

Rocha, J.S., Barbosa, M.J. and Wijffels, R.H. 2001. **Hydrogen Production by Photosynthetic Bacteria: Culture Media, Yields and Efficiencies**. In: **Biohydrogen II, An Approach to Environmentally Acceptable Technology**, Miyake, J., Matsunaga, T., and Pietro, A.S., eds., Pergamon/Elsevier, Oxford, UK, 3–32.

- Roychowdhury, S. 2000. **Process for Production of Hydrogen from Anaerobically Decomposed Organic Materials.** U.S. Patent. US 006090266A.
- Sparling, R. and Daniels, L. 1987. The Specificity of Growth Inhibition of Methanogenic Bacteria by Bromoethanesulfonate, Can. **J. Microbio.** 33(12): 1132–1136.
- _____, Risbey, D. and Poggi-Varaldo, H.M. 1997. Hydrogen Production from Inhibited Anaerobic Composters. **Int. J. Hydrogen Energy** 22(6): 563–566.
- Sprott, G.D., Jarrel, K.F., Shaw, K.M. and Knowles, R.K. 1982. Acetylene as an Inhibitor of Methanogenic Bacteria. **J. Gen. Microbiol.** 128: 2453–2462.
- Sung, S., Raskin, L., Duangmanee, T., Padmasiri, S. and Simmons JJ. 2002. **Hydrogen Production by Anaerobic Microbial Communities Exposed to Repeated Heat Treatments.** Proceedings of the 2002 U.S. DOE Hydrogen Program Review NREL/CP-610-32405
- Tang, G.L., Huang, J., Sun, Z.J., Tang, Q.Q., Yan, C.H. and Liu, G.Q. 2008. Biohydrogen Production from Cattle Wastewater by Enriched Anaerobic Mixed Consortia. **J. of Biosci. and Bioeng.** The Society for Biotechnology, Japan 106(1): 80–87.
- The Waste-to-Energy Research and Technology Council. 2009. **Anaerobic Digestion Process.** Available Source: <http://www.wtert.eu/default.asp?Menu=13&ShowDok=12>, January 2011
- Ueno, Y., Kawai, T., Sato, S., Otsuka, S. and Morimoto, M. 1995. Biological Production of Hydrogen from Cellulose by Mixed Anaerobic Microflora. **J. Ferment. Bioeng.** 79(4): 395–397.
- _____, Otsuka, S. and Morimoto, M. 1996. Hydrogen Production from Industrial Wastewater by Anaerobic Microflora in Chemostat Culture. **J. Ferment. Bioeng.** 82(2): 194–197.

- United States Department of Energy. 2005. An Integrated Research, Development and Demonstration Plan. **Int. J. Hydrogen Energy** 28: 1179-86.
- Valdez-Vazquez, I., Rios-Leal, E., Esparza-Garcia, F., Cecchi, F. and Poggi-Varaldo, H.M. 2005. Semi-continuous Solid Substrate Anaerobic Reactors for Hydrogen Production from Organic Waste: Mesophilic Versus Thermophilic Regime. **Int. J. Hydrogen Energy** 30(13/14): 1383–1391.
- van Haandel, A.C. and Lettinga, G. 1994. **Anaerobic Sewage Treatment— A Practical Guide for Regions With a Hot Climate**. Wiley, New York.
- Vavilin, V.A., Rytow, S.V. and Lokshina, L.Y. 1995. Modelling Hydrogen Partial Pressure Change as a Result of Competition Between the Butyric and Propionic Groups of Acidogenic Bacteria. **Bioresource Technol.** 54(2): 171–177.
- Venkata, S., Lalit, V. and Sarma, P.N. 2008. Effect of Various Pretreatment Methods on Anaerobic Mixed Microflora to Enhance Biohydrogen Production Utilizing Dairy Wastewater as Substrate. **Bioresource Technol** 99: 59-67.
- Wang, C.C., Chang, C.W., Chu, C.P., Lee, D.J., Chang, B.V., Liao, C.S. and Tay, J.H. 2003. Using Filtrate of Waste Biosolids to Effectively Produce Bio-hydrogen by Anaerobic Fermentation. **Water Res.** 37(11): 2789-2793.
- Wang, J. and Wan, W. 2008. Comparison of Different Pretreatment Methods for Enriching Hydrogen-producing Bacteria from Digested Sludge. **Int. J. Hydrogen Energy** 33: 2934-41.
- Wang, Y.Y., Ai, P., Hu, C.X. and Zhang, Y.L. 2010. Effects of Various Pretreatment Methods of Anaerobic Mixed Microflora on Biohydrogen Production and the Fermentation Pathway of Glucose. **Int. J. Hydrogen Energy**.

- Wei, J., Liu, Z.T. and Zhang, X. 2009. Biohydrogen Production from Starch Wastewater and Application in Fuel Cell. **Int. J. Hydrogen Energy**.
- Winter, C.J. 2004. The Hydrogen Energy Economy: An Address to the World Economic forum 2004. **Int. J. Hydrogen Energy** 29(11): 1095–1097
- Woodward, J., Orr, M., Correctiondray, K. and Greenbaum, E. 2000. Enzymatic Production of Biohydrogen. **Nature** 405(6790): 1014–1015.
- Wu, J.H. and Lin, C.Y. 2004. Biohydrogen Production by Mesophilic Fermentation of Food Wastewater. **Water Sci. Technol** 49: 223–228.
- Zajic, J.E., Kosaric, N. and Brosseau, J.D. 1978. Microbial Production of Hydrogen. **Adv. Biochem. Eng.** 9: 57–109.
- Zhang T., Liu H. and Fang HHP. 2003. Biohydrogen Production From Starch in Wastewater under Thermophilic Conditions. **J. Environ Mang** 69: 149–156.
- Zhu, H.G. and Be, M. 2006. Evaluation of Alternative Methods of Preparing Hydrogen Producing Seeds from Digested Wastewater Sludge. **Int. J. Hydrogen Energy** 31: 1980-1988.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก
ข้อมูลดิบจากการศึกษา

ตารางผนวกที่ ก1 ผลการ Acclimation ของตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองโดยการปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (ไม่ได้นำตะกอนจุลินทรีย์ไปใช้ในการศึกษาขั้นต่อไป)

Date	Day	pH	%H ₂	Substrate (ml)
08-09-10	1	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
09-09-10	2	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
10-09-10	3	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
11-09-10	4	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
12-09-10	5	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
13-09-10	6	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
14-09-10	7	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
15-09-10	8	5.78	3.6	Glucose 260 + Nutrient 260
16-09-10	9	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
17-09-10	10	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
18-09-10	11	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
19-09-10	12	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
20-09-10	13	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
21-09-10	14	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
22-09-10	15	5.78	22.66	Glucose 260 + Nutrient 260
23-09-10	16	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
24-09-10	17	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
25-09-10	18	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
26-09-10	19	-	-	Glucose 175 + Nutrient 175 + SWW 175
27-09-10	20	-	-	Glucose 175 + Nutrient 175 + SWW 175
28-09-10	21	3.62	28.35	Glucose 175 + Nutrient 175 + SWW 175
29-09-10	22	3.99	19.21	Glucose 130 + Nutrient 130 + SWW 260
30-09-10	23	-	-	Glucose 130 + Nutrient 130 + SWW 260
01-10-10	24	-	-	Glucose 130 + Nutrient 130 + SWW 260
02-10-10	25	-	-	SWW 500

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Date	Day	pH	%H ₂	Substrate (ml)
03-10-10	26	-	-	SWW 500
04-10-10	27	-	-	SWW 500
05-10-10	28	-	-	SWW 500
06-10-10	29	3.85	12.02	SWW 500
07-10-10	30	-	-	SWW 500
08-10-10	31	-	-	SWW 500
09-10-10	32	-	-	SWW 500
10-10-10	33	-	-	SWW 500
11-10-10	34	3.72	1.34	SWW 500
12-10-10	35	-	-	SWW 500
13-10-10	36	-	-	SWW 500
14-10-10	37	-	-	SWW 500
15-10-10	38	3.27	4.09	SWW 500
16-10-10	39	-	-	SWW 500
17-10-10	40	-	-	SWW 500
18-10-10	41	-	-	SWW 500
19-10-10	42	-	-	SWW 500
20-10-10	43	4.53	6.27	SWW 500
21-10-10	44	-	-	SWW 500
22-10-10	45	5.02	50.12	SWW 500
23-10-10	46	-	-	SWW 500
24-10-10	47	-	-	SWW 500
25-10-10	48	-	-	SWW 500
26-10-10	49	-	-	SWW 500
27-10-10	50	4.54	47.64	SWW 500
28-10-10	51	4.51	56.35	SWW 500
29-10-10	52	-	-	SWW 500

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Date	Day	pH	%H ₂	Substrate (ml)
30-10-10	53	-	-	SWW 500
31-10-10	54	-	-	SWW 500
01-11-10	55	-	-	SWW 500
02-11-10	56	-	-	SWW 500
03-11-10	57	4.91	39.89	SWW 500
04-11-10	58	-	-	SWW 500
05-11-10	59	4.75	41.39	SWW 500

หมายเหตุ – หมายถึง ไม่ได้ทำการตรวจวิเคราะห์

ข้อมูลในตารางผนวกที่ ก1 เมื่อนำไปสร้างกราฟจะได้กราฟดังภาพที่ 6 %H₂ ที่เกิดจากการเพิ่มปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธี Heat treatment (ไม่ได้นำตะกอนจุลินทรีย์ไปใช้ในการศึกษาขั้นต่อไป)

ตารางผนวกที่ ก2 ผลการ Acclimation ของตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองโดยการปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (นำตะกอนจุลินทรีย์ไปใช้ในการศึกษาความเหมาะสมของ Cell: COD)

Date	Day	pH	%H ₂	Substrate (ml)
08-10-10	1	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
09-10-10	2	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
10-10-10	3	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
11-10-10	4	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
12-10-10	5	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
13-10-10	6	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
14-10-10	7	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
15-10-10	8	5.02	3.88	Glucose 260 + Nutrient 260
16-10-10	9	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
17-10-10	10	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
18-10-10	11	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
19-10-10	12	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
20-10-10	13	4.87	11.78	Glucose 260 + Nutrient 260
21-10-10	14	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
22-10-10	15	4.44	2.13	Glucose 260 + Nutrient 260
23-10-10	16	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
24-10-10	17	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
25-10-10	18	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
26-10-10	19	4.42	5.58	Glucose 175 + Nutrient 175 + SWW 175
27-10-10	20	4.58	18.45	Glucose 175 + Nutrient 175 + SWW 175
28-10-10	21	4.44	20.15	Glucose 175 + Nutrient 175 + SWW 175
29-10-10	22	-	-	Glucose 130 + Nutrient 130 + SWW 260
30-10-10	23	-	-	Glucose 130 + Nutrient 130 + SWW 260

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

Date	Day	pH	%H ₂	Substrate (ml)
31-10-10	24	-	-	Glucose 130 + Nutrient 130 + SWW 260
01-11-10	25	3.84	24.09	SWW 500

หมายเหตุ – หมายถึง ไม่ได้ทำการตรวจวิเคราะห์

ข้อมูลในตารางผนวกที่ ก2 เมื่อนำไปสร้างกราฟจะได้กราฟดังภาพที่ 7 %H₂ ที่เกิดจากการเพิ่มปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธี Heat treatment (นำตะกอนจุลินทรีย์ไปใช้ในการศึกษาความเหมาะสมของ Cell: COD)

ตารางผนวกที่ ก3 ผลการ Acclimation ของตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองโดยการปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (นำตะกอนจุลินทรีย์ไปใช้ในการศึกษาความเหมาะสมของ Cell: COD และศึกษาถึง Activity ของตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตไฮโดรเจน)

Date	Day	pH	%H ₂	Substrate (ml)
08-10-10	1	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
09-10-10	2	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
10-10-10	3	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
11-10-10	4	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
12-10-10	5	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
13-10-10	6	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
14-10-10	7	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
15-10-10	8	5.36	1.55	Glucose 260 + Nutrient 260
16-10-10	9	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
17-10-10	10	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
18-10-10	11	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
19-10-10	12	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
20-10-10	13	4.92	16.89	Glucose 260 + Nutrient 260
21-10-10	14	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
22-10-10	15	5.08	7.49	Glucose 260 + Nutrient 260
23-10-10	16	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
24-10-10	17	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
25-10-10	18	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
26-10-10	19	4.87	4.92	Glucose 175 + Nutrient 175 + SWW 175
27-10-10	20	4.83	9.14	Glucose 175 + Nutrient 175 + SWW 175
28-10-10	21	4.41	16.87	Glucose 175 + Nutrient 175 + SWW 175
29-10-10	22	-	-	Glucose 130 + Nutrient 130 + SWW 260

ตารางผนวกที่ ก3 (ต่อ)

Date	Day	pH	%H ₂	Substrate (ml)
30-10-10	23	-	-	Glucose 130 + Nutrient 130 + SWW 260
31-10-10	24	-	-	Glucose 130 + Nutrient 130 + SWW 260
01-11-10	25	3.94	10.61	SWW 500
02-11-10	26	3.88	11.70	SWW 500
03-11-10	27	3.74	7.53	SWW 500
04-11-10	28	-	-	SWW 500
05-11-10	29	4.4	5.02	SWW 500
06-11-10	30	-	-	SWW 500
07-11-10	31	-	-	SWW 500
08-11-10	32	3.79	14.72	SWW 500
09-11-10	33	3.72	17.73	SWW 500
10-11-10	34	-	-	SWW 500
11-11-10	35	3.69	29.11	SWW 500

หมายเหตุ – หมายถึง ไม่ได้ทำการตรวจวิเคราะห์

ข้อมูลในตารางผนวกที่ ก3 เมื่อนำไปสร้างกราฟจะได้กราฟดังภาพที่ 8 %H₂ ที่เกิดจากการเพิ่มปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธี Heat treatment (นำตะกอนจุลินทรีย์ไปใช้ในการศึกษาความเหมาะสมของ Cell: COD และศึกษาถึง Activity ของตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตไฮโดรเจน)

ตารางผนวกที่ 4 ผลการ Acclimation ของตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองโดยการปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (นำตะกอนจุลินทรีย์ไปใช้ในการศึกษาถึง Activity ของตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตไฮโดรเจนและใช้ในการศึกษาผลของ pH เริ่มต้นของน้ำเสียที่ส่งผลต่อการผลิตไฮโดรเจน)

Date	Day	pH	%H ₂	Substrate (ml)
23-02-11	1	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
24-02-11	2	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
25-02-11	3	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
26-02-11	4	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
27-02-11	5	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
28-02-11	6	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
01-03-11	7	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
02-03-11	8	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
03-03-11	9	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
04-03-11	10	4.61	55.42	Glucose 260 + Nutrient 260
05-03-11	11	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
06-03-11	12	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
07-03-11	13	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
08-03-11	14	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
09-03-11	15	4.76	37.84	Glucose 260 + Nutrient 260
10-03-11	16	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
11-03-11	17	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
12-03-11	18	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
13-03-11	19	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
14-03-11	20	-	-	Glucose 175 + Nutrient 175 + SWW 175
15-03-11	21	4.42	35.01	Glucose 175 + Nutrient 175 + SWW 175
16-03-11	22	-	-	Glucose 175 + Nutrient 175 + SWW 175

ตารางผนวกที่ ก4 (ต่อ)

Date	Day	pH	%H ₂	Substrate (ml)
17-03-11	23	4.05	26.25	Glucose 130 + Nutrient 130 + SWW 260
18-03-11	24	4.05	26.05	Glucose 130 + Nutrient 130 + SWW 260
19-03-11	25	-	-	Glucose 130 + Nutrient 130 + SWW 260
20-03-11	26	-	-	SWW 500
21-03-11	27	4.06	22.71	SWW 500
22-03-11	28	3.96	30.33	SWW 500
23-03-11	29	3.94	48.52	SWW 500

หมายเหตุ – หมายถึง ไม่ได้ทำการตรวจวิเคราะห์

ข้อมูลในตารางผนวกที่ ก4 เมื่อนำไปสร้างกราฟจะได้กราฟดังภาพที่ 9 %H₂ ที่เกิดจากการเพิ่มปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธี Heat treatment (นำตะกอนจุลินทรีย์ไปใช้ในการศึกษาถึง Activity ของตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตไฮโดรเจนและใช้ในการศึกษาผลของ pH เริ่มต้นของน้ำเสียที่ส่งผลต่อการผลิตไฮโดรเจน)

ตารางผนวกที่ 5 ผลการ Acclimation ของตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองโดยการปรับสภาพด้วยกรด (Acid treatment)

Date	Day	pH	%H ₂	Substrate (ml)
11-01-11	1	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
12-01-11	2	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
13-01-11	3	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
14-01-11	4	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
15-01-11	5	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
16-01-11	6	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
17-01-11	7	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
18-01-11	8	5.72	0.12	Glucose 260 + Nutrient 260
19-01-11	9	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
20-01-11	10	6.04	4.09	Glucose 260 + Nutrient 260
21-01-11	11	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
22-01-11	12	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
23-01-11	13	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
24-01-11	14	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
25-01-11	15	5.65	29.45	Glucose 260 + Nutrient 260
26-01-11	16	5.75	40.16	Glucose 260 + Nutrient 260
27-01-11	17	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
28-01-11	18	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
29-01-11	19	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
30-01-11	20	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
31-01-11	21	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
01-02-11	22	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
01-02-11	22	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
02-02-11	23	-	-	Glucose 130 + Nutrient 130 + SWW 260

ตารางผนวกที่ ก5 (ต่อ)

Date	Day	pH	%H ₂	Substrate (ml)
03-02-11	24	-	-	Glucose 130 + Nutrient 130 + SWW 260
04-02-11	25	-	-	Glucose 130 + Nutrient 130 + SWW 260
05-02-11	26	-	-	Glucose 130 + Nutrient 130 + SWW 260
06-02-11	27	-	-	Glucose 130 + Nutrient 130 + SWW 260
07-02-11	28	-	-	SWW 500
08-02-11	29	4.21	39.39	SWW 500
09-02-11	30	-	-	SWW 500
10-02-11	31	4.24	47.89	SWW 500

หมายเหตุ – หมายถึง ไม่ได้ทำการตรวจวิเคราะห์

ข้อมูลในตารางผนวกที่ ก5 เมื่อนำไปสร้างกราฟจะได้กราฟดังภาพที่ 15 %H₂ ที่เกิดจากการเพิ่มปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธี Acid treatment

ตารางผนวกที่ 6 ผลการ Acclimation ของตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองโดยการปรับสภาพด้วยด่าง (Base treatment)

Date	Day	pH	%H ₂	Substrate (ml)
11-01-11	1	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
12-01-11	2	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
13-01-11	3	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
14-01-11	4	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
15-01-11	5	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
16-01-11	6	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
17-01-11	7	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
18-01-11	8	5.02	0.95	Glucose 260 + Nutrient 260
19-01-11	9	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
20-01-11	10	5.05	0.11	Glucose 260 + Nutrient 260
21-01-11	11	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
22-01-11	12	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
23-01-11	13	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
24-01-11	14	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
25-01-11	15	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
26-01-11	16	4.17	0.03	Glucose 260 + Nutrient 260
27-01-11	17	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
28-01-11	18	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
29-01-11	19	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
30-01-11	20	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
31-01-11	21	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
01-02-11	22	4.37	0.96	Glucose 260 + Nutrient 260
02-02-11	23	-	-	Glucose 130 + Nutrient 130 + SWW 260
03-02-11	24	-	-	Glucose 130 + Nutrient 130 + SWW 260

ตารางผนวกที่ 6 (ต่อ)

Date	Day	pH	%H ₂	Substrate (ml)
04-02-11	25	-	-	Glucose 130 + Nutrient 130 + SWW 260
05-02-11	26	-	-	Glucose 130 + Nutrient 130 + SWW 260
06-02-11	27	-	-	Glucose 130 + Nutrient 130 + SWW 260
07-02-11	28	-	-	SWW 500
08-02-11	29	4.27	43.54	SWW 500
09-02-11	30	4.36	38.89	SWW 500
10-02-11	31	4.32	49.11	SWW 500
11-02-11	32	4.29	46.47	SWW 500
12-02-11	33	-	-	SWW 500
13-02-11	34	-	-	SWW 500
14-02-11	35	4.13	48.80	SWW 500

หมายเหตุ – หมายถึง ไม่ได้ทำการตรวจวิเคราะห์

ข้อมูลในตารางผนวกที่ 6 เมื่อนำไปสร้างกราฟจะได้กราฟดังภาพที่ 18 %H₂ ที่เกิดจากการเพิ่มปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธี Base treatment

ตารางผนวกที่ ๗ ผลการ Acclimation ของตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองโดยการปรับสภาพด้วยคลอโรฟอร์ม (Chloroform)

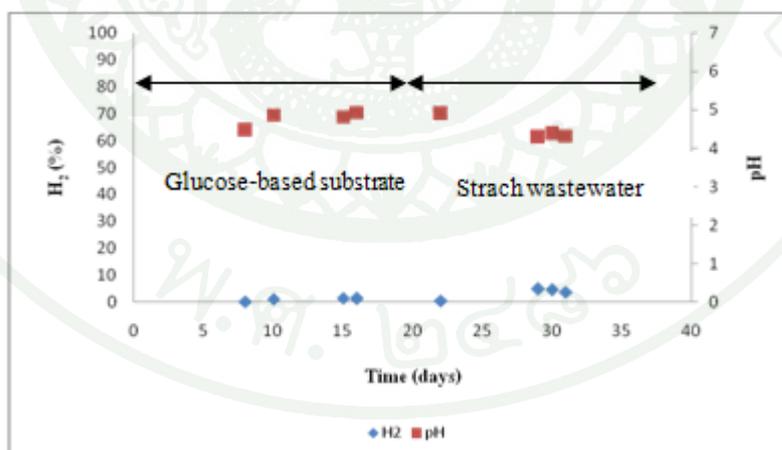
Date	Day	pH	%H ₂	Substrate (ml)
11-01-11	1	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
12-01-11	2	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
13-01-11	3	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
14-01-11	4	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
15-01-11	5	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
16-01-11	6	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
17-01-11	7	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
18-01-11	8	4.47	0.12	Glucose 260 + Nutrient 260
19-01-11	9	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
20-01-11	10	4.87	1.14	Glucose 260 + Nutrient 260
21-01-11	11	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
22-01-11	12	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
23-01-11	13	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
24-01-11	14	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
25-01-11	15	4.82	1.49	Glucose 260 + Nutrient 260
26-01-11	16	4.93	1.34	Glucose 260 + Nutrient 260
27-01-11	17	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
28-01-11	18	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
29-01-11	19	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
30-01-11	20	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
31-01-11	21	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
01-02-11	22	4.90	0.56	Glucose 260 + Nutrient 260
02-02-11	23	-	-	Glucose 130 + Nutrient 130 + SWW 260
03-02-11	24	-	-	Glucose 130 + Nutrient 130 + SWW 260

ตารางผนวกที่ ก7 (ต่อ)

Date	Day	pH	%H ₂	Substrate (ml)
04-02-11	25	-	-	Glucose 130 + Nutrient 130 + SWW 260
05-02-11	26	-	-	Glucose 130 + Nutrient 130 + SWW 260
06-02-11	27	-	-	Glucose 130 + Nutrient 130 + SWW 260
07-02-11	28	-	-	SWW 500
08-02-11	29	4.29	4.94	SWW 500
09-02-11	30	4.38	4.48	SWW 500
10-02-11	31	4.32	3.74	SWW 500

หมายเหตุ – หมายถึง ไม่ได้ทำการตรวจวิเคราะห์

ข้อมูลในตารางผนวกที่ ก7 เมื่อนำไปสร้างกราฟจะได้กราฟดังภาพผนวกที่ ก1 %H₂ ที่เกิดจากการเพิ่มปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีคลอโรฟอร์ม (Chloroform)



ภาพผนวกที่ ก1 %H₂ ที่เกิดจากการเพิ่มปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีคลอโรฟอร์ม (Chloroform)

ตารางผนวกที่ 8 ผลการ Acclimation ของตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองโดยการปรับสภาพด้วยการแช่แข็งและละลาย (Freezing and thawing)

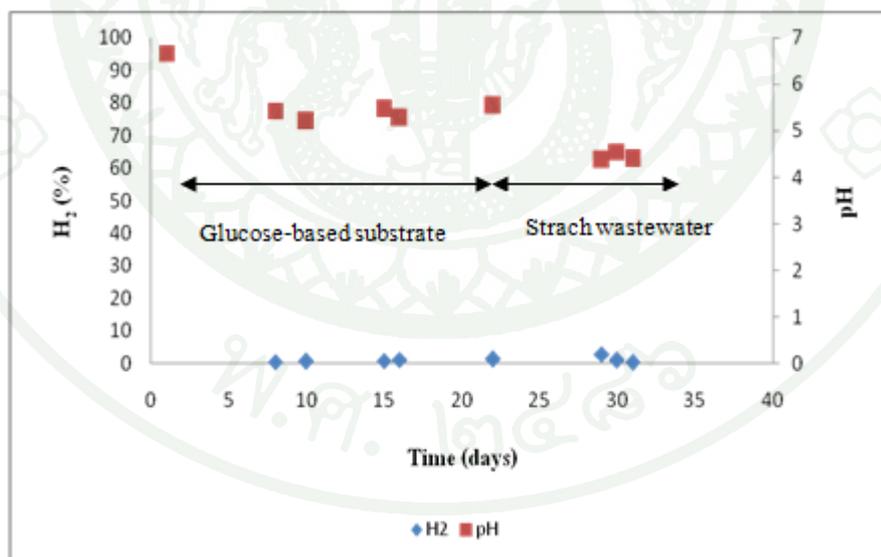
Date	Day	pH	%H ₂	Substrate (ml)
11-01-11	1	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
12-01-11	2	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
13-01-11	3	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
14-01-11	4	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
15-01-11	5	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
16-01-11	6	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
17-01-11	7	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
18-01-11	8	5.43	0.44	Glucose 260 + Nutrient 260
19-01-11	9	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
20-01-11	10	5.20	0.59	Glucose 260 + Nutrient 260
21-01-11	11	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
22-01-11	12	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
23-01-11	13	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
24-01-11	14	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
25-01-11	15	5.46	0.80	Glucose 260 + Nutrient 260
26-01-11	16	5.27	1.16	Glucose 260 + Nutrient 260
27-01-11	17	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
28-01-11	18	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
29-01-11	19	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
30-01-11	20	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
31-01-11	21	-	-	Glucose 260 + Nutrient 260
01-02-11	22	5.54	1.41	Glucose 260 + Nutrient 260
02-02-11	23	-	-	Glucose 130 + Nutrient 130 + SWW 260
03-02-11	24	-	-	Glucose 130 + Nutrient 130 + SWW 260
04-02-11	25	-	-	Glucose 130 + Nutrient 130 + SWW 260
05-02-11	26	-	-	Glucose 130 + Nutrient 130 + SWW 260

ตารางผนวกที่ ก8 (ต่อ)

Date	Day	pH	%H ₂	Substrate (ml)
06-02-11	27	-	-	Glucose 130 + Nutrient 130 + SWW 260
07-02-11	28	-	-	SWW 500
08-02-11	29	4.37	2.81	SWW 500
09-02-11	30	4.55	0.95	SWW 500
10-02-11	31	4.39	0.42	SWW 500

หมายเหตุ – หมายถึง ไม่ได้ทำการตรวจวิเคราะห์

ข้อมูลในตารางผนวกที่ ก8 เมื่อนำไปสร้างกราฟจะได้กราฟดังภาพผนวกที่ 2 %H₂ ที่เกิดจากการเพิ่มปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีการแช่แข็งและละลาย (Freezing and thawing)



ภาพผนวกที่ ก2 %H₂ ที่เกิดจากการเพิ่มปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีการแช่แข็งและละลาย (Freezing and thawing)

ตารางผนวกที่ 9 pH เฉลี่ยที่เกิดขึ้นหลังจากการเดินระบบ Batch process โดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาความเหมาะสมของ Cell: COD)

Time (hr)	Initial pH							Control
	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	
0	4.34	4.41	4.45	4.49	4.50	4.53	4.56	4.48
1	4.30	4.36	4.39	4.43	4.46	4.50	4.54	4.45
18	4.44	4.50	4.54	4.58	4.60	4.63	4.67	4.46
48	4.46	4.51	4.56	4.60	4.63	4.66	4.72	4.49
72	4.51	4.58	4.61	4.65	4.67	4.71	4.76	4.55
120	4.51	4.56	4.59	4.62	4.66	4.68	4.74	4.52

ตารางผนวกที่ 10 pH เฉลี่ยที่เกิดขึ้นหลังจากการเดินระบบ Batch process โดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาความเหมาะสมของ Cell: COD และศึกษาถึง Activity ของตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตไฮโดรเจน)

Time (hr)	Initial pH							Control
	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	
0	4.11	4.45	4.72	4.92	5.13	5.4	5.6	4.28
6	3.85	4.04	4.12	4.15	4.22	4.34	4.34	4.25
12	3.63	3.72	3.83	3.94	4.00	4.18	4.34	4.26
18	3.50	3.64	3.72	3.79	3.84	4.16	4.60	4.28
30	3.42	3.54	3.59	3.76	3.81	4.49	4.60	4.27
48	3.43	3.53	3.60	3.77	3.84	4.49	4.59	4.24

ตารางผนวกที่ ก11 pH เฉลี่ยที่เกิดขึ้นหลังจากการเดินระบบ Batch process โดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาถึง Activity ของตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตไฮโดรเจนและใช้ในการศึกษาผลของ pH เริ่มต้นของน้ำเสียที่ส่งผลต่อการผลิตไฮโดรเจน)

Time (hr)	Initial pH							Control
	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	
0	4.07	4.35	4.64	4.84	5.01	5.13	5.32	4.1
6	4.48	4.59	4.64	4.65	4.71	4.73	4.72	4.02
12	4.39	4.49	4.55	4.57	4.68	4.71	4.70	4.05
24	4.34	4.47	4.56	4.60	4.70	4.73	4.73	4.05
48	4.31	4.45	4.57	4.60	4.73	4.74	4.75	4.06

ตารางผนวกที่ ก12 pH เฉลี่ยที่เกิดขึ้นหลังจากการเดินระบบ Batch process โดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยกรด (Acid treatment)

Time (hr)	Initial pH							Control
	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	
0	4.11	4.45	4.72	4.92	5.13	5.4	5.6	4.28
6	4.32	4.46	4.64	4.60	4.65	4.72	4.68	4.20
12	4.25	4.40	4.57	4.58	4.64	4.71	4.73	4.16
24	4.25	4.36	4.54	4.47	4.52	4.60	4.56	4.15
48	4.24	4.35	4.54	4.47	4.52	4.61	4.55	4.15

ตารางผนวกที่ ก13 pH เฉลี่ยที่เกิดขึ้นหลังจากการเดินระบบ Batch process โดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์
ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยด่าง(Base treatment)

Time (hr)	Initial pH							Control
	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	
0	4.08	4.4	4.69	4.86	5.04	5.19	5.32	4.14
6	4.00	4.30	4.52	4.58	4.69	4.73	4.76	4.07
12	4.18	4.38	4.58	4.62	4.69	4.71	4.73	4.06
24	4.17	4.37	4.54	4.56	4.64	4.67	4.68	4.07
48	4.15	4.36	4.52	4.56	4.63	4.65	4.66	4.08

ตารางผนวกที่ ก14 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 4 ของการผลิตไฮโดรเจน โดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาความเหมาะสมของ Cell: COD)

Time (hr)	Total gas (ml at STP)	Initial pH 4		Accumulate H ₂ (ml at STP)
		%H ₂	H ₂ (ml at STP)	
0	0.00	0.00	0.00	0.00
1	9.28	4.73	0.44	0.44
3	5.89	13.15	0.77	1.16
6	8.36	43.07	3.60	4.28
14	12.71	60.74	7.72	11.99
18	0.33	39.08	0.13	12.12
24	0.44	27.71	0.12	12.24
36	0.00	0.00	0.00	12.24
48	1.48	31.55	0.47	12.72
72	0.00	0.00	0.00	12.72
96	0.00	0.00	0.00	12.72
120	0.00	0.00	0.00	12.72

หมายเหตุ ศูนย์ คือ ปริมาตรก๊าซเป็นศูนย์

ตารางผนวกที่ ก15 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 4.5 ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาความเหมาะสมของ Cell: COD)

Initial pH 4.5				
Time (hr)	Total gas (ml at STP)	%H ₂	H ₂ (ml at STP)	Accumulate H ₂ (ml at STP)
0	0.00	0.00	0.00	0.00
1	6.61	8.05	0.53	0.54
3	4.53	18.67	0.85	1.43
6	12.06	46.30	5.58	7.00
14	13.13	48.92	6.42	13.44
18	0.37	45.96	0.17	13.61
24	1.21	26.39	0.32	13.96
36	0.00	0.00	0.00	13.96
48	1.38	15.33	0.21	14.38
72	0.00	0.00	0.00	14.38
96	0.00	0.00	0.00	14.38
120	0.00	0.00	0.00	14.38

หมายเหตุ ศูนย์ คือ ปริมาตรก๊าซเป็นศูนย์

ตารางผนวกที่ 16 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 5 ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาความเหมาะสมของ Cell: COD)

Initial pH 5				
Time (hr)	Total gas (ml at STP)	%H ₂	H ₂ (ml at STP)	Accumulate H ₂ (ml at STP)
0	0.00	0.00	0.00	0.00
1	7.28	7.30	0.53	0.53
3	5.19	20.09	1.04	1.56
6	11.92	64.55	7.69	9.26
14	10.09	60.12	6.07	15.37
18	0.63	41.68	0.26	15.65
24	1.28	41.69	0.53	16.19
36	0.00	0.00	0.00	16.19
48	0.15	12.16	0.02	16.23
72	0.00	0.00	0.00	16.23
96	0.00	0.00	0.00	16.23
120	0.00	0.00	0.00	16.23

หมายเหตุ ศูนย์ คือ ปริมาตรก๊าซเป็นศูนย์

ตารางผนวกที่ ก17 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 5.5 ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาความเหมาะสมของ Cell: COD)

Initial pH 5.5				
Time (hr)	Total gas (ml at STP)	%H ₂	H ₂ (ml at STP)	Accumulate H ₂ (ml at STP)
0	0.00	0.00	0.00	0.00
1	9.10	8.71	0.79	0.71
3	11.45	10.89	1.25	1.52
6	13.36	65.37	8.74	10.26
14	11.07	47.06	5.21	15.48
18	0.75	47.00	0.35	15.84
24	0.56	30.90	0.17	16.01
36	0.00	0.00	0.00	16.01
48	1.92	28.98	0.56	16.56
72	0.00	0.00	0.00	16.56
96	0.00	0.00	0.00	16.56
120	0.44	0.00	0.00	16.56

หมายเหตุ ศูนย์ คือ ปริมาตรก๊าซเป็นศูนย์

ตารางผนวกที่ ก18 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 6 ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาความเหมาะสมของ Cell: COD)

Initial pH 6				
Time (hr)	Total gas (ml at STP)	%H ₂	H ₂ (ml at STP)	Accumulate H ₂ (ml at STP)
0	0.00	0.00	0.00	0.00
1	10.25	7.07	0.72	0.73
3	7.24	19.23	1.39	2.11
6	14.91	62.67	9.34	11.44
14	10.56	39.12	4.13	15.57
18	0.79	36.87	0.29	15.88
24	1.91	25.79	0.49	16.43
36	0.00	0.00	0.00	16.43
48	0.15	4.47	0.01	16.44
72	0.00	0.00	0.00	16.44
96	0.00	0.00	0.00	16.44
120	0.00	0.00	0.00	16.44

หมายเหตุ ศูนย์ คือ ปริมาตรก๊าซเป็นศูนย์

ตารางผนวกที่ ก19 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 6.5 ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาความเหมาะสมของ Cell: COD)

Initial pH 6.5				
Time (hr)	Total gas (ml at STP)	%H ₂	H ₂ (ml at STP)	Accumulate H ₂ (ml at STP)
0	0.00	0.00	0.00	0.00
1	8.39	8.21	0.69	0.68
3	6.87	28.67	1.97	2.64
6	16.12	65.37	10.54	13.18
14	9.16	52.26	4.79	17.95
18	0.56	48.89	0.27	18.22
24	0.47	27.70	0.13	18.35
36	0.00	0.00	0.00	18.35
48	3.75	23.97	0.90	19.25
72	0.00	0.00	0.00	19.25
96	0.00	0.00	0.00	19.25
120	0.00	0.00	0.00	19.25

หมายเหตุ ศูนย์ คือ ปริมาตรก๊าซเป็นศูนย์

ตารางผนวกที่ ก20 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 7 ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาความเหมาะสมของ Cell: COD)

Time (hr)	Total gas (ml at STP)	Initial pH 7		Accumulate H ₂ (ml at STP)
		%H ₂	H ₂ (ml at STP)	
0	0.00	0.00	0.00	0
1	26.79	8.14	2.18	2.18
3	26.80	31.86	8.54	10.72
6	10.75	69.37	7.46	18.18
14	9.34	59.50	5.56	23.74
18	0.49	49.09	0.24	23.98
24	0.57	31.78	0.18	24.16
36	1.42	25.98	0.37	24.53
48	1.05	24.66	0.26	24.79
72	0.00	0.00	0.00	24.79
96	0.00	0.00	0.00	24.79
120	0.00	0.00	0.00	24.79

หมายเหตุ ศูนย์ คือ ปริมาตรก๊าซเป็นศูนย์

ตารางผนวกที่ ก21 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมที่ใช้น้ำกลั่นเป็น substrate (Control) ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาความเหมาะสมของ Cell: COD)

Control				
Time (hr)	Total gas (ml at STP)	%H ₂	H ₂ (ml at STP)	Accumulate H ₂ (ml at STP)
0	0.00	0.00	0.00	0.00
1	4.53	7.70	0.35	0.35
3	1.78	2.95	0.05	0.40
6	0.28	3.39	0.01	0.41
14	0.00	1.84	0.00	0.41
18	0.09	2.26	0.00	0.41
24	0.00	2.26	0.00	0.41
36	0.00	0.00	0.00	0.41
48	2.17	1.49	0.03	0.45
72	0.00	0.00	0.00	0.45
96	0.00	0.00	0.00	0.45
120	0.00	0.00	0.00	0.45

หมายเหตุ ศูนย์ คือ ปริมาตรก๊าซเป็นศูนย์

ตารางผนวกที่ ก22 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 4 ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาความเหมาะสมของ Cell: COD และศึกษาถึง Activity ของตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตไฮโดรเจน)

Initial pH 4				
Time (hr)	Total gas (ml at STP)	%H ₂	H ₂ (ml at STP)	Accumulate H ₂ (ml at STP)
0	0.00	0.00	0.00	0
3	5.73	8.37	0.48	0.44
6	0.18	9.07	0.02	0.45
9	0.23	3.76	0.01	0.47
12	0.21	10.60	0.02	0.49
15	1.18	4.49	0.05	0.60
18	3.01	6.64	0.20	0.79
21	1.46	8.89	0.13	0.93
24	0.00	0.00	0.00	0.93
30	0.00	0.00	0.00	0.93
33	0.00	0.00	0.00	0.93
42	2.44	4.17	0.10	1.13
48	1.05	4.80	0.05	1.24
66	4.62	9.52	0.44	1.66
90	4.73	7.97	0.38	2.00
114	3.08	6.08	0.19	2.06
120	0.00	0.00	0.00	2.06

หมายเหตุ ศูนย์ คือ ปริมาตรก๊าซเป็นศูนย์

ตารางผนวกที่ ก23 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 4.5 ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาความเหมาะสมของ Cell: COD และศึกษาถึง Activity ของตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตไฮโดรเจน)

Initial pH 4.5				
Time (hr)	Total gas (ml at STP)	%H ₂	H ₂ (ml at STP)	Accumulate H ₂ (ml at STP)
0	0.00	0.00	0.00	0.00
3	4.17	3.97	0.17	0.16
6	0.98	4.45	0.04	0.19
9	0.61	1.53	0.01	0.21
12	0.84	4.78	0.04	0.25
15	0.12	5.87	0.01	0.26
18	0.20	5.26	0.01	0.27
21	0.29	2.77	0.01	0.29
24	0.57	1.76	0.01	0.31
30	0.00	0.00	0.00	0.31
33	0.00	0.00	0.00	0.31
42	0.00	0.00	0.00	0.31
48	0.67	2.22	0.01	0.33
66	1.30	3.72	0.05	0.37
90	3.14	3.12	0.10	0.46
114	2.01	2.59	0.05	0.47
120	0.00	0.00	0.00	0.47

หมายเหตุ ศูนย์ คือ ปริมาตรก๊าซเป็นศูนย์

ตารางผนวกที่ ก24 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 5 ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาความเหมาะสมของ Cell: COD และศึกษาถึง Activity ของตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตไฮโดรเจน)

Initial pH 5				
Time (hr)	Total gas (ml at STP)	%H ₂	H ₂ (ml at STP)	Accumulate H ₂ (ml at STP)
0	0.00	0.00	0.00	0.00
3	4.84	7.21	0.35	0.36
6	3.06	7.42	0.23	0.59
9	2.01	6.94	0.14	0.75
12	0.23	7.92	0.02	0.77
15	1.04	7.84	0.08	0.85
18	1.92	7.89	0.15	0.99
21	1.80	6.78	0.12	1.11
24	2.61	6.73	0.18	1.30
30	0.00	0.00	0.00	1.30
33	0.00	0.00	0.00	1.30
42	0.61	3.20	0.02	1.34
48	0.11	0.00	0.00	1.34
66	6.10	4.93	0.30	1.64
90	5.39	4.73	0.25	1.89
114	3.26	4.19	0.14	2.03
120	0.00	0.00	0.00	2.03

หมายเหตุ ศูนย์ คือ ปริมาตรก๊าซเป็นศูนย์

ตารางผนวกที่ ก25 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 5.5 ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาความเหมาะสมของ Cell: COD และศึกษาถึง Activity ของตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตไฮโดรเจน)

Initial pH 5.5				
Time (hr)	Total gas (ml at STP)	%H ₂	H ₂ (ml at STP)	Accumulate H ₂ (ml at STP)
0	0.00	0.00	0.00	0.00
3	6.21	6.28	0.39	0.39
6	2.89	8.33	0.24	0.63
9	4.30	8.44	0.36	0.99
12	1.31	9.98	0.13	1.12
15	2.66	9.60	0.26	1.37
18	2.02	8.81	0.18	1.55
21	3.06	8.13	0.25	1.79
24	0.00	0.00	0.00	1.79
30	0.00	0.00	0.00	1.79
33	0.00	0.00	0.00	1.79
42	0.00	0.00	0.00	1.79
48	0.00	0.00	0.00	1.79
66	3.37	3.58	0.12	1.90
90	2.19	2.66	0.06	1.96
114	2.37	2.55	0.06	2.02
120	0.00	0.00	0.00	2.02

หมายเหตุ ศูนย์ คือ ปริมาตรก๊าซเป็นศูนย์

ตารางผนวกที่ ก26 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 6 ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาความเหมาะสมของ Cell: COD และศึกษาถึง Activity ของตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตไฮโดรเจน)

Initial pH 6				
Time (hr)	Total gas (ml at STP)	%H ₂	H ₂ (ml at STP)	Accumulate H ₂ (ml at STP)
0	0.00	0.00	0.00	0.00
3	9.10	4.78	0.44	0.44
6	3.64	7.92	0.29	0.72
9	2.52	6.77	0.17	0.89
12	3.08	6.15	0.19	1.10
15	3.43	6.79	0.23	1.34
18	4.54	3.99	0.18	1.49
21	0.84	4.03	0.03	1.51
24	0.10	2.34	0.00	1.52
30	0.00	0.00	0.00	1.52
33	0.00	0.00	0.00	1.52
42	0.00	0.00	0.00	1.52
48	1.28	2.44	0.03	1.55
66	6.45	2.66	0.17	1.76
90	3.97	2.18	0.09	1.83
114	3.31	2.17	0.07	1.83
120	0.00	0.00	0.00	1.83

หมายเหตุ ศูนย์ คือ ปริมาตรก๊าซเป็นศูนย์

ตารางผนวกที่ ก27 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 6.5 ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาความเหมาะสมของ Cell: COD และศึกษาถึง Activity ของตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตไฮโดรเจน)

Initial pH 6.5				
Time (hr)	Total gas (ml at STP)	%H ₂	H ₂ (ml at STP)	Accumulate H ₂ (ml at STP)
0	0.00	0.00	0.00	0.00
3	10.25	6.33	0.65	0.65
6	7.50	13.12	0.98	1.62
9	4.16	12.89	0.54	2.16
12	6.35	13.61	0.87	3.03
15	5.03	13.17	0.66	3.69
18	7.20	13.42	0.97	4.66
21	9.35	13.25	1.24	5.90
24	16.03	25.47	4.08	10.28
30	27.10	43.60	11.82	22.11
33	5.66	34.99	1.98	24.09
42	1.53	35.34	0.54	24.58
48	0.42	13.69	0.06	24.69
66	7.69	29.60	2.28	26.58
90	7.87	22.70	1.79	28.27
114	5.03	18.85	0.95	28.78
120	0.00	0.00	0.00	28.78

หมายเหตุ ศูนย์ คือ ปริมาตรก๊าซเป็นศูนย์

ตารางผนวกที่ ก28 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 7 ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาความเหมาะสมของ Cell: COD และศึกษาถึง Activity ของตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตไฮโดรเจน)

Initial pH 7				
Time (hr)	Total gas (ml at STP)	%H ₂	H ₂ (ml at STP)	Accumulate H ₂ (ml at STP)
0	0.00	0.00	0.00	0.00
3	9.81	11.22	1.10	1.10
6	7.10	18.94	1.35	2.46
9	2.34	17.16	0.40	2.86
12	17.24	26.62	4.59	7.49
15	19.90	42.90	8.54	16.09
18	38.13	57.17	21.80	37.90
21	9.56	41.73	3.99	41.89
24	0.10	17.11	0.02	41.93
30	0.00	0.00	0.00	41.93
33	0.00	0.00	0.00	41.93
42	5.49	43.37	2.38	44.32
48	0.08	0.00	0.00	44.32
66	8.40	33.07	2.78	47.10
90	7.75	27.99	2.17	49.27
114	7.52	27.49	2.07	51.34
120	0.00	0.00	0.00	51.34

หมายเหตุ ศูนย์ คือ ปริมาตรก๊าซเป็นศูนย์

ตารางผนวกที่ ก29 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมที่ใช้น้ำกลั่นเป็น substrate (Control) ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาความเหมาะสมของ Cell: COD และศึกษาถึง Activity ของตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตไฮโดรเจน)

Control				
Time (hr)	Total gas (ml at STP)	%H ₂	H ₂ (ml at STP)	Accumulate H ₂ (ml at STP)
0	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.27	1.11	0.00	0.00
6	0.09	0.98	0.00	0.00
9	0.00	0.00	0.00	0.00
12	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.00	0.00	0.00	0.00
18	0.00	0.00	0.00	0.00
21	0.42	0.00	0.00	0.00
24	0.63	1.07	0.01	0.01
30	0.00	0.00	0.00	0.01
33	0.00	0.00	0.00	0.01
42	0.44	0.00	0.00	0.01
48	1.22	1.04	0.01	0.02
66	0.77	1.00	0.01	0.03
90	1.30	0.80	0.01	0.04
114	2.60	0.49	0.01	0.05
120	0.00	0.00	0.00	0.05

หมายเหตุ ศูนย์ คือ ปริมาตรก๊าซเป็นศูนย์

ตารางผนวกที่ ก30 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 4 ของการผลิตไฮโดรเจน โดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาถึง Activity ของตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตไฮโดรเจนและใช้ในการศึกษาผลของ pH เริ่มต้นของน้ำเสียที่ส่งผลต่อการผลิตไฮโดรเจน)

Initial pH 4				
Time (hr)	Total gas (ml at STP)	%H ₂	H ₂ (ml at STP)	Accumulate H ₂ (ml at STP)
0	0.00	0.00	0.00	0
2	27.17	33.58	9.12	9.12
3	18.20	37.75	6.87	16.00
4	17.89	41.92	7.50	23.50
5	17.89	39.42	7.05	30.55
6	11.32	36.92	4.18	34.73
9	30.19	38.50	11.62	46.34
12	24.06	40.08	9.64	56.00
18	19.53	36.71	7.17	63.20
21	8.63	35.81	3.09	66.32
24	6.66	34.90	2.32	68.62
36	0.00	0.00	0.00	68.62
42	0.00	0.00	0.00	68.62
48	0.00	0.00	0.00	68.62

หมายเหตุ ศูนย์ คือ ปริมาตรก๊าซเป็นศูนย์

ตารางผนวกที่ ก31 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 4.5 ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาถึง Activity ของตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตไฮโดรเจนและใช้ในการศึกษาผลของ pH เริ่มต้นของน้ำเสียที่ส่งผลต่อการผลิตไฮโดรเจน)

Initial pH 4.5				
Time (hr)	Total gas (ml at STP)	%H ₂	H ₂ (ml at STP)	Accumulate H ₂ (ml at STP)
0	0.00	0.00	0.00	0.00
2	27.92	36.51	10.19	10.19
3	28.54	41.19	11.76	21.95
4	19.31	45.87	8.86	30.80
5	20.15	40.07	8.08	38.88
6	11.59	34.27	3.97	42.84
9	32.76	36.64	12.00	54.84
12	15.09	39.00	5.89	60.73
18	8.83	34.50	3.05	63.69
21	0.00	0.00	0.00	63.69
24	4.09	32.32	1.32	65.03
36	0.73	31.60	0.23	65.26
42	0.00	0.00	0.00	65.26
48	0.00	0.00	0.00	65.26

หมายเหตุ ศูนย์ คือ ปริมาตรก๊าซเป็นศูนย์

ตารางผนวกที่ ก32 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 5 ของการผลิตไฮโดรเจน โดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาถึง Activity ของตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตไฮโดรเจนและใช้ในการศึกษาผลของ pH เริ่มต้นของน้ำเสียที่ส่งผลต่อการผลิตไฮโดรเจน)

Initial pH 5				
Time (hr)	Total gas (ml at STP)	%H ₂	H ₂ (ml at STP)	Accumulate H ₂ (ml at STP)
0	0.00	0.00	0.00	0.00
2	27.92	34.31	9.58	9.58
3	28.94	39.32	11.38	20.95
4	20.82	44.34	9.23	30.20
5	19.27	37.93	7.31	37.50
6	12.70	31.53	4.00	41.50
9	30.19	32.55	9.83	51.33
12	7.29	33.58	2.45	53.77
18	3.06	31.43	0.96	54.73
21	0.00	0.00	0.00	54.73
24	4.34	29.86	1.30	56.04
36	2.72	28.80	0.78	56.82
42	0.00	0.00	0.00	56.82
48	0.00	0.00	0.00	56.82

หมายเหตุ ศูนย์ คือ ปริมาตรก๊าซเป็นศูนย์

ตารางผนวกที่ ก33 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 5.5 ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาถึง Activity ของตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตไฮโดรเจนและใช้ในการศึกษาผลของ pH เริ่มต้นของน้ำเสียที่ส่งผลต่อการผลิตไฮโดรเจน)

Initial pH 5.5				
Time (hr)	Total gas (ml at STP)	%H ₂	H ₂ (ml at STP)	Accumulate H ₂ (ml at STP)
0	0.00	0.00	0.00	0.00
2	30.10	38.78	11.67	11.69
3	29.65	40.20	11.92	23.61
4	19.58	41.62	8.15	31.76
5	18.51	36.78	6.81	38.57
6	12.03	31.93	3.84	42.41
9	18.60	34.88	6.49	48.89
12	4.77	37.83	1.80	50.69
18	0.44	36.61	0.16	50.85
21	0.00	0.00	0.00	50.85
24	4.44	35.08	1.56	52.40
36	5.22	33.84	1.77	54.16
42	0.00	0.00	0.00	54.16
48	0.00	0.00	0.00	54.16

หมายเหตุ ศูนย์ คือ ปริมาตรก๊าซเป็นศูนย์

ตารางผนวกที่ ก34 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 6 ของการผลิตไฮโดรเจน โดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาถึง Activity ของตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตไฮโดรเจนและใช้ในการศึกษาผลของ pH เริ่มต้นของน้ำเสียที่ส่งผลต่อการผลิตไฮโดรเจน)

Initial pH 6				
Time (hr)	Total gas (ml at STP)	%H ₂	H ₂ (ml at STP)	Accumulate H ₂ (ml at STP)
0	0.00	0.00	0.00	0.00
2	31.12	38.29	11.91	11.89
3	32.01	38.98	12.47	24.37
4	20.77	39.67	8.24	32.58
5	21.04	35.57	7.48	40.06
6	13.23	31.47	4.16	44.22
9	15.61	33.19	5.18	49.40
12	3.83	34.91	1.34	50.76
18	0.30	30.65	0.09	50.85
21	0.00	0.00	0.00	50.85
24	4.34	32.31	1.40	52.26
36	6.63	34.64	2.30	54.56
42	0.00	0.00	0.00	54.56
48	0.00	0.00	0.00	54.56

หมายเหตุ ศูนย์ คือ ปริมาตรก๊าซเป็นศูนย์

ตารางผนวกที่ ก35 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 6.5 ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาถึง Activity ของตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตไฮโดรเจนและใช้ในการศึกษาผลของ pH เริ่มต้นของน้ำเสียที่ส่งผลต่อการผลิตไฮโดรเจน)

Initial pH 6.5				
Time (hr)	Total gas (ml at STP)	%H ₂	H ₂ (ml at STP)	Accumulate H ₂ (ml at STP)
0	0.00	0.00	0.00	0.00
2	30.01	40.02	12.01	12.01
3	33.83	40.29	13.63	25.64
4	21.35	40.57	8.66	34.32
5	23.04	35.78	8.24	42.56
6	13.32	31.00	4.13	46.68
9	16.59	30.21	5.01	51.60
12	1.54	29.42	0.45	51.99
18	0.00	0.00	0.00	51.99
21	0.00	0.00	0.00	51.99
24	6.46	28.26	1.83	53.80
36	3.19	26.77	0.85	54.66
42	0.00	0.00	0.00	54.66
48	0.00	0.00	0.00	54.66

หมายเหตุ ศูนย์ คือ ปริมาตรก๊าซเป็นศูนย์

ตารางผนวกที่ ก36 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 7 ของการผลิตไฮโดรเจน โดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาถึง Activity ของตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตไฮโดรเจนและใช้ในการศึกษาผลของ pH เริ่มต้นของน้ำเสียที่ส่งผลต่อการผลิตไฮโดรเจน)

Initial pH 7				
Time (hr)	Total gas (ml at STP)	%H ₂	H ₂ (ml at STP)	Accumulate H ₂ (ml at STP)
0	0.00	0.00	0.00	0.00
2	32.76	40.91	13.40	13.40
3	35.16	39.49	13.88	27.27
4	22.02	38.07	8.38	35.66
5	24.68	32.91	8.12	43.77
6	13.14	27.75	3.65	47.41
9	15.33	28.27	4.33	51.68
12	1.64	28.80	0.47	52.12
18	0.00	0.00	0.00	52.12
21	0.00	0.00	0.00	52.12
24	6.76	27.11	1.83	53.95
36	5.22	37.04	1.93	55.88
42	0.00	0.00	0.00	55.88
48	0.00	0.00	0.00	55.88

หมายเหตุ ศูนย์ คือ ปริมาตรก๊าซเป็นศูนย์

ตารางผนวกที่ ก37 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมที่ใช้ น้ำกลั่นเป็น substrate (Control) ของการผลิตไฮโดรเจน โดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาถึง Activity ของตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตไฮโดรเจนและใช้ในการศึกษาผลของ pH เริ่มต้นของน้ำเสียที่ส่งผลต่อการผลิตไฮโดรเจน)

Control				
Time (hr)	Total gas (ml at STP)	%H ₂	H ₂ (ml at STP)	Accumulate H ₂ (ml at STP)
0	0.00	0.00	0	0.00
2	1.86	0.36	0.01	0.01
3	0.00	0.00	0.00	0.01
4	0.00	0.00	0.00	0.01
5	0.00	0.00	0.00	0.01
6	0.00	0.00	0.00	0.01
9	0.00	0.00	0.00	0.01
12	0.00	0.00	0.00	0.01
18	0.00	0.00	0.00	0.01
21	0.00	0.00	0.00	0.01
24	0.00	0.00	0.00	0.01
36	1.04	0.64	0.01	0.01
42	0.00	0.00	0.00	0.01
48	0.00	0.00	0.00	0.01

หมายเหตุ ศูนย์ คือ ปริมาตรก๊าซเป็นศูนย์

ตารางผนวกที่ ก38 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 4 ของการผลิตไฮโดรเจน โดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยกรด (Acid treatment)

Initial pH 4				
Time (hr)	Total gas (ml at STP)	%H ₂	H ₂ (ml at STP)	Accumulate H ₂ (ml at STP)
0	0.00	0.00	0.00	0.00
3	29.45	39.53	11.64	11.65
6	27.88	37.73	10.52	22.17
9	16.17	25.83	4.18	26.35
12	9.30	24.33	2.26	28.61
15	0.00	0.00	0.00	28.61
18	4.00	20.62	0.82	29.44
21	0.00	0.00	0.00	29.44
24	0.89	19.06	0.17	29.61
27	3.50	16.27	0.57	30.16
33	0.00	0.00	0.00	30.16
42	0.00	0.00	0.00	30.16
48	0.00	0.00	0.00	30.16

หมายเหตุ ศูนย์ คือ ปริมาตรก๊าซเป็นศูนย์

ตารางผนวกที่ ก39 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 4.5 ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยกรด (Acid treatment)

Initial pH 4.5				
Time (hr)	Total gas (ml at STP)	%H ₂	H ₂ (ml at STP)	Accumulate H ₂ (ml at STP)
0	0.00	0.00	0.00	0.00
3	35.33	44.95	15.88	15.88
6	29.16	37.99	11.08	27.00
9	14.34	31.06	4.46	31.43
12	5.65	30.71	1.74	33.09
15	0.00	0.00	0.00	33.09
18	1.18	26.29	0.31	33.39
21	0.00	0.00	0.00	33.39
24	2.17	25.59	0.56	33.95
27	3.68	22.50	0.83	34.80
33	0.00	0.00	0.00	34.80
42	0.00	0.00	0.00	34.80
48	0.00	0.00	0.00	34.80

หมายเหตุ ศูนย์ คือ ปริมาตรก๊าซเป็นศูนย์

ตารางผนวกที่ ก40 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 5 ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยกรด (Acid treatment)

Initial pH 5				
Time (hr)	Total gas (ml at STP)	%H ₂	H ₂ (ml at STP)	Accumulate H ₂ (ml at STP)
0	0.00	0.00	0.00	0.00
3	40.62	41.79	16.97	16.97
6	43.77	33.96	14.86	31.83
9	17.80	27.04	4.81	36.65
12	7.52	26.50	1.99	38.64
15	0.00	0.00	0.00	38.64
18	1.53	28.24	0.43	39.07
21	0.00	0.00	0.00	39.07
24	2.12	25.89	0.55	39.62
27	3.24	19.37	0.63	40.25
33	0.00	0.00	0.00	40.25
42	0.00	0.00	0.00	40.25
48	0.00	0.00	0.00	40.25

หมายเหตุ ศูนย์ คือ ปริมาตรก๊าซเป็นศูนย์

ตารางผนวกที่ ก41 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 5.5 ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยกรด (Acid treatment)

Initial pH 5.5				
Time (hr)	Total gas (ml at STP)	%H ₂	H ₂ (ml at STP)	Accumulate H ₂ (ml at STP)
0	0.00	0.00	0.00	0.00
3	40.11	46.78	18.76	18.69
6	40.22	34.52	13.88	32.42
9	13.27	35.66	4.73	37.15
12	4.91	30.82	1.51	38.74
15	0.00	0.00	0.00	38.74
18	1.09	28.75	0.31	39.08
21	0.00	0.00	0.00	39.08
24	3.55	28.79	1.02	40.03
27	2.14	24.19	0.52	40.56
33	0.00	0.00	0.00	40.56
42	0.00	0.00	0.00	40.56
48	0.00	0.00	0.00	40.56

หมายเหตุ ศูนย์ คือ ปริมาตรก๊าซเป็นศูนย์

ตารางผนวกที่ ก42 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 6 ของการผลิตไฮโดรเจน โดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยกรด (Acid treatment)

Initial pH 6				
Time (hr)	Total gas (ml at STP)	%H ₂	H ₂ (ml at STP)	Accumulate H ₂ (ml at STP)
0	0.00	0.00	0.00	0.00
3	41.46	48.79	20.23	20.23
6	42.79	37.83	16.19	36.41
9	11.31	34.65	3.92	40.32
12	2.38	34.88	0.83	41.07
15	0.00	0.00	0.00	41.07
18	1.38	30.43	0.42	41.49
21	0.00	0.00	0.00	41.49
24	3.06	26.04	0.80	42.28
27	0.42	24.93	0.10	42.39
33	0.00	0.00	0.00	42.39
42	0.00	0.00	0.00	42.39
48	0.00	0.00	0.00	42.39

หมายเหตุ ศูนย์ คือ ปริมาตรก๊าซเป็นศูนย์

ตารางผนวกที่ ก43 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 6.5 ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยกรด (Acid treatment)

Initial pH 6.5				
Time (hr)	Total gas (ml at STP)	%H ₂	H ₂ (ml at STP)	Accumulate H ₂ (ml at STP)
0	0.00	0.00	0.00	0.00
3	45.63	47.64	21.74	21.64
6	45.63	32.70	14.92	36.59
9	18.36	32.14	5.90	42.49
12	6.49	33.40	2.17	44.68
15	0.00	0.00	0.00	44.68
18	2.32	27.35	0.63	45.30
21	0.00	0.00	0.00	45.30
24	3.11	24.99	0.78	46.04
27	1.72	23.20	0.40	46.45
33	0.00	0.00	0.00	46.45
42	0.00	0.00	0.00	46.45
48	0.00	0.00	0.00	46.45

หมายเหตุ ศูนย์ คือ ปริมาตรก๊าซเป็นศูนย์

ตารางผนวกที่ ก44 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 7 ของการผลิตไฮโดรเจน โดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยกรด (Acid treatment)

Initial pH 7				
Time (hr)	Total gas (ml at STP)	%H ₂	H ₂ (ml at STP)	Accumulate H ₂ (ml at STP)
0	0.00	0.00	0.00	0.00
3	47.05	41.01	19.30	19.33
6	40.22	35.51	14.28	33.58
9	18.64	30.15	5.62	39.22
12	1.96	28.62	0.56	39.78
15	0.00	0.00	0.00	39.78
18	2.52	24.96	0.63	40.41
21	0.00	0.00	0.00	40.41
24	4.93	20.14	0.99	41.36
27	0.42	19.39	0.08	41.44
33	0.00	0.00	0.00	41.44
42	0.00	0.00	0.00	41.44
48	0.00	0.00	0.00	41.44

หมายเหตุ ศูนย์ คือ ปริมาตรก๊าซเป็นศูนย์

ตารางผนวกที่ ก45 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมที่ใช้น้ำกลั่นเป็น substrate (Control) ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยกรด (Acid treatment)

Control				
Time (hr)	Total gas (ml at STP)	%H ₂	H ₂ (ml at STP)	Accumulate H ₂ (ml at STP)
0	0.00	0.00	0.00	0
3	1.91	0.00	0.00	0.00
6	0.18	0.02	0.00	0.00
9	0.00	0.00	0.00	0.00
12	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.00	0.00	0.00	0.00
18	0.00	0.00	0.00	0.00
21	0.00	0.00	0.00	0.00
24	0.69	0.04	0.00	0.00
27	0.00	0.00	0.00	0.00
33	0.00	0.00	0.00	0.00
42	0.00	0.00	0.00	0.00
48	0.00	0.00	0.00	0.00

หมายเหตุ ศูนย์ คือ ปริมาตรก๊าซเป็นศูนย์

ตารางผนวกที่ ก46 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 4 ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยด่าง (Base treatment)

Initial pH 4				
Time (hr)	Total gas (ml at STP)	%H ₂	H ₂ (ml at STP)	Accumulate H ₂ (ml at STP)
0	0.00	0.00	0.00	0.00
1	6.53	8.25	0.54	0.54
2	5.06	22.13	1.12	1.66
3	10.52	34.72	3.65	5.31
4	14.65	35.54	5.21	10.50
5	12.23	38.57	4.72	15.22
6	17.84	35.90	6.41	21.63
9	31.03	37.89	11.76	33.39
12	2.15	33.47	0.72	34.10
15	7.79	32.45	2.53	36.62
18	9.52	31.42	2.99	39.63
21	9.86	34.44	3.40	43.02
24	14.01	37.46	5.25	48.27
27	2.66	37.09	0.99	49.26
30	4.70	36.71	1.73	50.99
33	2.66	37.17	0.99	51.98
36	0.00	0.00	0.00	51.98
42	0.00	0.00	0.00	51.98
48	0.00	0.00	0.00	51.98

หมายเหตุ ศูนย์ คือ ปริมาตรก๊าซเป็นศูนย์

ตารางผนวกที่ ก47 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 4.5 ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านกักกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยด่าง (Base treatment)

Initial pH 4.5				
Time (hr)	Total gas (ml at STP)	%H ₂	H ₂ (ml at STP)	Accumulate H ₂ (ml at STP)
0	0.00	0.00	0.00	0.00
1	7.37	11.03	0.81	0.81
2	9.54	28.64	2.73	3.54
3	16.42	41.07	6.75	10.30
4	26.55	39.62	10.52	20.82
5	19.53	41.09	8.02	28.84
6	26.37	40.75	10.75	39.58
9	8.36	33.54	2.81	42.39
12	3.41	28.79	0.98	43.37
15	11.05	31.19	3.45	46.82
18	12.33	33.58	4.14	50.98
21	12.73	38.64	4.92	55.89
24	14.90	43.70	6.51	62.40
27	2.66	42.02	1.12	63.51
30	0.63	40.34	0.25	63.76
33	0.00	0.00	0.00	63.76
36	0.00	0.00	0.00	63.76
42	0.00	0.00	0.00	63.76
48	0.00	0.00	0.00	63.76

หมายเหตุ ศูนย์ คือ ปริมาตรก๊าซเป็นศูนย์

ตารางผนวกที่ ก48 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 5 ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยด่าง (Base treatment)

Initial pH 5				
Time (hr)	Total gas (ml at STP)	%H ₂	H ₂ (ml at STP)	Accumulate H ₂ (ml at STP)
0	0.00	0.00	0.00	0.00
1	7.32	14.82	1.09	1.08
2	12.47	38.56	4.81	5.89
3	23.84	44.26	10.55	16.40
4	37.64	41.83	15.75	32.14
5	22.26	42.27	9.41	41.55
6	15.80	38.46	6.08	47.63
9	16.21	32.35	5.25	52.87
12	4.25	32.12	1.37	54.24
15	12.08	37.27	4.50	58.75
18	12.92	42.42	5.48	64.23
21	14.11	45.99	6.49	70.73
24	13.81	49.56	6.84	77.57
27	2.72	46.60	1.27	78.91
30	0.29	43.64	0.13	79.04
33	0.00	0.00	0.00	79.04
36	0.00	0.00	0.00	79.04
42	0.00	0.00	0.00	79.04
48	0.00	0.00	0.00	79.04

หมายเหตุ ศูนย์ คือ ปริมาตรก๊าซเป็นศูนย์

ตารางผนวกที่ ก49 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 5.5 ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยด่าง (Base treatment)

Initial pH 5.5				
Time (hr)	Total gas (ml at STP)	%H ₂	H ₂ (ml at STP)	Accumulate H ₂ (ml at STP)
0	0.00	0.00	0.00	0.00
1	8.66	15.64	1.35	1.35
2	14.87	43.68	6.50	7.83
3	31.07	44.74	13.90	21.74
4	43.99	43.96	19.34	41.01
5	20.06	48.10	9.65	50.53
6	9.99	40.60	4.05	54.59
9	19.72	36.36	7.17	61.75
12	8.43	37.49	3.16	64.91
15	13.96	45.13	6.30	71.15
18	11.20	52.78	5.91	77.04
21	13.32	54.53	7.26	84.29
24	3.70	56.28	2.08	86.37
27	0.00	53.74	0.00	86.37
30	0.00	51.19	0.00	86.37
33	0.00	0.00	0.00	86.37
36	0.00	0.00	0.00	86.37
42	0.00	0.00	0.00	86.37
48	0.00	0.00	0.00	86.37

หมายเหตุ ศูนย์ คือ ปริมาตรก๊าซเป็นศูนย์

ตารางผนวกที่ ก50 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 6 ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยด่าง (Base treatment)

Initial pH 6				
Time (hr)	Total gas (ml at STP)	%H ₂	H ₂ (ml at STP)	Accumulate H ₂ (ml at STP)
0	0.00	0.00	0.00	0.00
1	10.52	15.52	1.63	1.63
2	17.84	44.07	7.86	9.50
3	38.42	45.65	17.54	27.04
4	46.79	43.04	20.14	47.18
5	15.40	43.57	6.71	53.91
6	10.03	38.12	3.82	57.73
9	23.32	37.01	8.63	66.36
12	8.83	41.86	3.70	70.05
15	14.55	48.12	7.00	77.05
18	9.37	54.37	5.10	82.14
21	10.36	54.80	5.68	87.82
24	1.28	55.23	0.71	88.52
27	0.00	52.45	0.00	88.52
30	0.00	49.67	0.00	88.52
33	0.00	0.00	0.00	88.52
36	0.00	0.00	0.00	88.52
42	0.00	0.00	0.00	88.52
48	0.00	0.00	0.00	88.52

หมายเหตุ ศูนย์ คือ ปริมาตรก๊าซเป็นศูนย์

ตารางผนวกที่ ก51 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 6.5 ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยด่าง (Base treatment)

Initial pH 6.5				
Time (hr)	Total gas (ml at STP)	%H ₂	H ₂ (ml at STP)	Accumulate H ₂ (ml at STP)
0	0.00	0.00	0.00	0.00
1	9.85	15.23	1.50	1.50
2	18.42	42.76	7.88	9.36
3	39.86	46.13	18.39	27.77
4	51.60	42.30	21.83	49.59
5	17.02	41.82	7.12	56.71
6	11.94	37.46	4.47	61.18
9	27.92	34.08	9.51	70.71
12	7.57	43.62	3.30	74.00
15	17.71	48.68	8.62	82.57
18	6.61	53.73	3.55	86.14
21	8.24	53.02	4.37	90.50
24	1.87	52.31	0.98	91.48
27	0.00	49.90	0.00	91.48
30	0.00	47.49	0.00	91.48
33	0.00	0.00	0.00	91.48
36	0.00	0.00	0.00	91.48
42	0.00	0.00	0.00	91.48
48	0.00	0.00	0.00	91.48

หมายเหตุ ศูนย์ คือ ปริมาตรก๊าซเป็นศูนย์

ตารางผนวกที่ ก52 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 7 ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยด่าง (Base treatment)

Initial pH 7				
Time (hr)	Total gas (ml at STP)	%H ₂	H ₂ (ml at STP)	Accumulate H ₂ (ml at STP)
0	0.00	0.00	0.00	0.00
1	8.83	14.02	1.24	1.23
2	18.60	44.29	8.24	9.42
3	43.39	45.04	19.55	28.90
4	53.62	41.06	22.02	50.92
5	16.65	38.90	6.48	57.42
6	10.21	35.02	3.58	61.00
9	34.90	35.24	12.30	73.24
12	5.70	43.80	2.50	75.75
15	17.71	47.95	8.49	84.21
18	4.34	52.11	2.26	86.49
21	3.01	50.28	1.51	88.02
24	2.32	48.45	1.12	89.14
27	0.00	47.35	0.00	89.14
30	0.00	46.24	0.00	89.14
33	0.00	0.00	0.00	89.14
36	0.00	0.00	0.00	89.14
42	0.00	0.00	0.00	89.14
48	0.00	0.00	0.00	89.14

หมายเหตุ ศูนย์ คือ ปริมาตรก๊าซเป็นศูนย์

ตารางผนวกที่ ก53 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมที่ใช้ น้ำกลั่นเป็น substrate (Control) ของการผลิตไฮโดรเจน โดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความต่าง (Base treatment)

Control				
Time (hr)	Total gas (ml at STP)	%H ₂	H ₂ (ml at STP)	Accumulate H ₂ (ml at STP)
0	0.00	0.00	0	0.00
1	1.69	0.48	0.01	0.01
2	0.00	0.00	0.00	0.01
3	0.00	0.00	0.00	0.01
4	0.00	0.00	0.00	0.01
5	0.00	0.00	0.00	0.01
6	1.78	1.21	0.02	0.03
9	0.00	0.00	0.00	0.03
12	0.00	0.00	0.00	0.03
15	0.00	0.00	0.00	0.03
18	0.00	0.00	0.00	0.03
21	0.00	0.00	0.00	0.03
24	0.00	0.00	0.00	0.03
30	0.00	0.00	0.00	0.03
33	0.00	0.00	0.00	0.03
33	0.00	0.00	0.00	0.03
36	0.00	0.00	0.00	0.03
42	0.00	0.00	0.00	0.03
48	0.00	0.00	0.00	0.03

หมายเหตุ ศูนย์ คือ ปริมาตรก๊าซเป็นศูนย์

ตารางผนวกที่ ก54 ปริมาณ COD ที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียตั้งแต่ 5.5-7 ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาความเหมาะสมของ Cell: COD)

Time (hour)	Initial pH			
	5.5	6	6.5	7
0	23848	23848	23848	23848
1	16744	15156	17209	19384
18	15625	15039	16899	16364
48	13750	14884	16432	13984
72	12870	14040	14788	12502
120	12798	14005	14714	12443

ตารางผนวกที่ ก55 ปริมาณ COD ที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียตั้งแต่ 5.5-7 ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาความเหมาะสมของ Cell: COD และศึกษาถึง Activity ของตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตไฮโดรเจน)

Time (hour)	Initial pH			
	5.5	6	6.5	7
0	23666	23666	23666	23666
6	22837	23099	21561	21011
12	22288	22849	19975	19039
18	21930	22642	18535	17449
30	21773	22487	17650	16039
48	21636	22317	17422	15569

ตารางผนวกที่ ก56 ปริมาณ COD ที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียตั้งแต่ 4-7 ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาถึง Activity ของตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตไฮโดรเจนและใช้ในการศึกษาผลของ pH เริ่มต้นของน้ำเสียที่ส่งผลต่อการผลิตไฮโดรเจน)

Time (hour)	Initial pH						
	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7
0	20980	20980	20980	20980	20980	20980	20980
6	19520	19840	19200	18960	18600	19360	19040
12	19360	18747	19071	18182	18455	19152	18755
24	18444	18599	18521	18054	18276	18833	17899
48	18231	18154	18077	17923	18000	17462	17385

ตารางผนวกที่ ก57 ปริมาณ COD ที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียตั้งแต่ 4-7 ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยกรด (Acid treatment)

Time (hour)	Initial pH						
	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7
0	20582	20582	20582	20582	20582	20582	20582
6	19512	19163	19350	19463	18130	19341	18374
12	18263	18284	18843	18965	17466	18110	18077
24	17934	17774	18049	17675	17341	17341	17935
48	17614	17489	17565	17180	17251	17212	17519

ตารางผนวกที่ ก58 ปริมาณ COD ที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียตั้งแต่ 4-7 ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้
ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยด่าง (Base treatment)

Time (hour)	Initial pH						
	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7
0	24473	24473	24473	24473	24473	24473	24473
6	23160	21847	22454	22418	22133	22557	21884
12	22816	21571	21388	21367	21557	21167	21265
24	21337	20929	19898	19888	19951	19789	19862
48	20407	20228	19239	19046	19092	19441	19235

ตารางผนวกที่ ก59 ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ (%COD degraded) และผลผลิตไฮโดรเจน (H₂ yield) ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาความเหมาะสมของ Cell: COD)

Initial pH of wastewater	Initial COD (mg/l)	Final COD (mg/l)	COD degraded (mg/l)	COD degraded (%)	Accumulate H ₂ (ml at STP/100ml)	H ₂ yield (ml H ₂ at STP/ g COD degraded)
5.5	23,848	12,798	11,050	46.34	16.56	14.98
6	23,848	14,005	9,843	41.27	16.44	16.70
6.5	23,848	14,714	9,134	38.30	19.25	21.08
7	23,848	12,443	11,405	47.82	24.79	21.74

หมายเหตุ H_2 yield (ml H₂ at STP/g COD degraded) = $\frac{\text{Accumulate } H_2 \text{ (ml at STP/100ml)} \times 10,000}{\text{COD degraded (mg/l)}}$

ตารางผนวกที่ ก60 ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ (%COD degraded) และผลผลิตไฮโดรเจน (H₂ yield) ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาความเหมาะสมของ Cell: COD และใช้ในการศึกษา Activity ของตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตไฮโดรเจน)

Initial pH of wastewater	Initial COD (mg/l)	Final COD (mg/l)	COD degraded (mg/l)	COD degraded (%)	Accumulate H ₂ (ml at STP/100ml)	H ₂ yield (ml H ₂ at STP/ g COD degraded)
5.5	23,666	21,636	2,030	8.58	2.02	9.95
6	23,666	22,317	1,349	5.70	1.83	13.55
6.5	23,666	17,422	6,244	26.38	28.78	46.09
7	23,666	15,569	8,097	34.21	51.34	63.40

หมายเหตุ H_2 yield (ml H₂ at STP/g COD degraded) = $\frac{\text{Accumulate } H_2 \text{ (ml at STP/100ml)} \times 10,000}{\text{COD degraded (mg/l)}}$

ตารางผนวกที่ ก61 ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ (%COD degraded) และผลผลิตไฮโดรเจน (H₂ yield) ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาถึง Activity ของตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตไฮโดรเจนและใช้ในการศึกษาผลของ pH เริ่มต้นของน้ำเสียที่ส่งผลต่อการผลิตไฮโดรเจน)

Initial pH of wastewater	Initial COD (mg/l)	Final COD (mg/l)	COD degraded (mg/l)	COD degraded (%)	Accumulate H ₂ (ml at STP/100ml)	H ₂ yield (ml H ₂ at STP/ g COD degraded)
4	20,980	18,231	2,749	13.10	70.12	255
4.5	20,980	18,154	2,826	13.47	65.26	231
5	20,980	18,077	2,903	13.84	56.82	196
5.5	20,980	17,923	3,057	14.57	56.31	184
6	20,980	18,000	2,980	14.20	54.56	183
6.5	20,980	17,462	3,518	16.77	55.93	159
7	20,980	17,385	3,595	17.14	55.88	155

หมายเหตุ H_2 yield (ml H₂ at STP/g COD degraded) = $\frac{\text{Accumulate } H_2 \text{ (ml at STP/100ml)} \times 10,000}{\text{COD degraded (mg/l)}}$

ตารางผนวกที่ ก62 ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ (%COD degraded) และผลผลิตไฮโดรเจน (H₂ yield) ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยกรด (Acid treatment)

Initial pH of wastewater	Initial COD (mg/l)	Final COD (mg/l)	COD degraded (mg/l)	COD degraded (%)	Accumulate H ₂ (ml at STP/100ml)	H ₂ yield (ml H ₂ at STP/ g COD degraded)
4	20,582	17,614	2,968	7.67	30.16	102
4.5	20,582	17,489	3,094	12.98	34.80	112
5	20,582	17,565	3,018	14.66	40.25	114
5.5	20,582	17,180	3,402	16.53	40.56	119
6	20,582	17,251	3,331	16.19	42.39	127
6.5	20,582	17,212	3,371	16.38	46.45	138
7	20,582	17,519	3,063	14.88	41.44	135

หมายเหตุ H_2 yield (ml H₂ at STP/g COD degraded) = $\frac{\text{Accumulate } H_2 \text{ (ml at STP/100ml)} \times 10,000}{\text{COD degraded (mg/l)}}$

ตารางผนวกที่ ก63 ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ (%COD degraded) และผลผลิตไฮโดรเจน (H₂ yield) ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยด่าง (Base treatment)

Initial pH of wastewater	Initial COD (mg/l)	Final COD (mg/l)	COD degraded (mg/l)	COD degraded (%)	Accumulate H ₂ (ml at STP/100ml)	H ₂ yield* (ml H ₂ at STP/ g COD degraded)
4	24,473	20,407	4,067	16.62	51.98	128
4.5	24,473	20,228	4,246	17.35	63.76	150
5	24,473	19,239	5,234	21.39	79.04	151
5.5	24,473	19,046	5,427	22.18	86.37	159
6	24,473	19,092	5,381	21.99	88.52	165
6.5	24,473	19,441	5,032	20.56	91.48	182
7	24,473	19,235	5,239	21.41	89.14	170

หมายเหตุ H_2 yield (ml H₂ at STP/g COD degraded) = $\frac{\text{Accumulate } H_2 \text{ (ml at STP/100ml)} \times 10,000}{\text{COD degraded (mg/l)}}$

ตารางผนวกที่ ก64 อัตราการผลิตไฮโดรเจนจำเพาะ (Specific hydrogen production rate, SHPR) ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาความเหมาะสมของ Cell: COD)

Initial pH	Rm (ml/h)	MLVSS (mg/l)	MLVSS (mg/100ml)	MLVSS (g)	SHPR (ml/g cells-h)
5.5	1.20	19540	1954	1.954	0.61
6	1.13	19540	1954	1.954	0.58
6.5	1.25	19540	1954	1.954	0.64
7	1.50	19540	1954	1.954	0.77

หมายเหตุ Rm คือ อัตราการเกิดไฮโดรเจนสูงสุด หาได้จากวิธีการคำนวณในภาคผนวก ข

ตารางผนวกที่ ก65 อัตราการผลิตไฮโดรเจนจำเพาะ (Specific hydrogen production rate, SHPR) ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาความเหมาะสมของ Cell: COD และศึกษาถึง Activity ของตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตไฮโดรเจน)

Initial pH	Rm (ml/h)	MLVSS (mg/l)	MLVSS (mg/100ml)	MLVSS (g)	SHPR (ml/g cells-h)
5.5	0.11	4863	486.3	0.4863	0.23
6	0.12	4863	486.3	0.4863	0.25
6.5	1.45	4863	486.3	0.4863	2.99
7	3.59	4863	486.3	0.4863	7.38

หมายเหตุ Rm คือ อัตราการเกิดไฮโดรเจนสูงสุด หาได้จากวิธีการคำนวณในภาคผนวก ข

ตารางผนวกที่ ก66 อัตราการผลิตไฮโดรเจนจำเพาะ (Specific hydrogen production rate, SHPR) ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) (จากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษา ถึง Activity ของตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตไฮโดรเจนและใช้ในการศึกษาผลของ pH เริ่มต้นของน้ำเลี้ยงที่ส่งผลต่อการผลิตไฮโดรเจน)

Initial pH	Rm (ml/h)	MLVSS (mg/l)	MLVSS (mg/100ml)	MLVSS (g)	SHPR (ml/g cells-h)
4	8.00	5740	574	0.574	13.94
4.5	7.80	5740	574	0.574	13.59
5	7.65	5740	574	0.574	13.33
5.5	7.61	5740	574	0.574	13.26
6	7.67	5740	574	0.574	13.37
6.5	7.67	5740	574	0.574	13.36
7	7.70	5740	574	0.574	13.42

หมายเหตุ Rm คือ อัตราการเกิดไฮโดรเจนสูงสุด หาได้จากวิธีการคำนวณในภาคผนวก ข

ตารางผนวกที่ ก67 อัตราการผลิตไฮโดรเจนจำเพาะ (Specific hydrogen production rate, SHPR) ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยกรด (Acid treatment)

Initial pH	Rm (ml/h)	MLVSS (mg/l)	MLVSS (mg/100ml)	MLVSS (g)	SHPR (ml/g cells-h)
4	2.41	5143	514.3	0.5143	4.68
4.5	2.74	5143	514.3	0.5143	5.32
5	3.21	5143	514.3	0.5143	6.25
5.5	3.25	5143	514.3	0.5143	6.32
6	3.73	5143	514.3	0.5143	7.25
6.5	3.81	5143	514.3	0.5143	7.42
7	3.71	5143	514.3	0.5143	7.22

หมายเหตุ Rm คือ อัตราการเกิดไฮโดรเจนสูงสุด หาได้จากวิธีการคำนวณในภาคผนวก ข

ตารางผนวกที่ ก68 อัตราการผลิตไฮโดรเจนจำเพาะ (Specific hydrogen production rate, SHPR) ของการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธีปรับสภาพด้วยด่าง (Base treatment)

Initial pH	Rm (ml/h)	MLVSS (mg/l)	MLVSS (mg/100ml)	MLVSS (g)	SHPR (ml/g cells-h)
4	4.02	5329	532.9	0.5329	7.55
4.5	7.45	5329	532.9	0.5329	13.99
5	9.76	5329	532.9	0.5329	18.31
5.5	11.44	5329	532.9	0.5329	21.48
6	13.29	5329	532.9	0.5329	24.94
6.5	13.64	5329	532.9	0.5329	25.60
7	13.95	5329	532.9	0.5329	26.18

หมายเหตุ Rm คือ อัตราการเกิดไฮโดรเจนสูงสุด หาได้จากวิธีการคำนวณในภาคผนวก ข



1. การคำนวณสัดส่วนมวลตะกอนจุลินทรีย์ต่อความสกปรกอินทรีย์ในรูป Cell: COD

เมื่อ Cell: COD = 4 g cell/g COD หรือ อัตราส่วนโดยปริมาตรของตะกอนจุลินทรีย์ 80 ml ต่อน้ำเสียโรงงานแป้งมันสำปะหลัง 20 ml คำนวณได้จาก

Cell ตะกอนจุลินทรีย์ในระบบ คำนวณมวลได้จากค่า MLVSS ที่ทำการทดลองในขวดซีรัม โดยคิดใน working volume เป็นมวลทั้งหมดในขวดซีรัม 100 ml โดยที่ค่า MLVSS มีค่า 19,540 mg/l

ในตะกอนจุลินทรีย์	1,000 ml	มีมวลตะกอนจุลินทรีย์	19,540 mg
ถ้าในตะกอนจุลินทรีย์	100 ml	มีมวลตะกอนจุลินทรีย์	$\frac{19,540 \times 100}{1,000} = 1,954$ mg

COD น้ำเสียในระบบ คำนวณมวลได้จากค่า COD โดยคำนวณจากน้ำเสียปริมาตร 20 ml เพราะจากการศึกษานำน้ำเสีย 20 ml มาใส่ในขวดซีรัมที่มีมวลตะกอนจุลินทรีย์อยู่แล้ว และ สมมติว่ามวลของ COD มาจากน้ำเสีย 20 ml โดยไม่ได้ปนกับน้ำของตะกอนจุลินทรีย์ ซึ่งค่ามวลของ COD เป็นค่าที่ได้จากค่า COD เริ่มต้นที่ 23,848 mg/l มาคำนวณดังนี้

ในน้ำเสีย	1,000 ml	มีมวล COD	23,848 mg
ถ้าในน้ำเสีย	20 ml	มีมวล COD	$\frac{23,848 \times 20}{1,000} = 477$ mg

$$\text{ดังนั้น Cell : COD} = \frac{1,954 \text{ mg cell}}{477 \text{ mg COD}} = \frac{1,954 \text{ g cell}}{477 \text{ g COD}} = 4 \text{ gcell/g COD}$$

เมื่อ Cell: COD = 0.26 g cell/g COD หรือ อัตราส่วนโดยปริมาตรของตะกอนจุลินทรีย์ 20 ml ต่อน้ำเสียโรงงานแป้งมันสำปะหลัง 80 ml คำนวณได้จาก

Cell ตะกอนจุลินทรีย์ในระบบ คำนวณมวลได้จากค่า MLVSS ที่ทำการทดลองในขวดซีรัม โดยคิดใน working volume เป็นมวลทั้งหมดในขวดซีรัม 100 ml โดยที่ค่า MLVSS มีค่า 4,863 mg/l

ในตะกอนจุลินทรีย์	1,000 ml	มีมวลตะกอนจุลินทรีย์	4,863 mg
ถ้าในตะกอนจุลินทรีย์	100 ml	มีมวลตะกอนจุลินทรีย์	$\frac{4,863 \times 100}{1,000} = 486.3 \text{ mg}$

COD น้ำเสียในระบบ คำนวณมวลได้จากค่า COD โดยคำนวณจากน้ำเสียปริมาตร 80 ml เพราะจากการศึกษาน้ำเสีย 80 ml มาใส่ในขวดซีรัมที่มีมวลตะกอนจุลินทรีย์อยู่แล้ว และให้สมมติว่ามวลของ COD มาจากน้ำเสีย 80 ml โดยไม่ได้ปนกับน้ำของตะกอนจุลินทรีย์ ซึ่งค่ามวลของ COD เป็นค่าที่ได้จากค่า COD เริ่มต้นที่ 23,666 mg/l มาคำนวณดังนี้

ในน้ำเสีย	1,000 ml	มีมวล COD	23,666 mg
ถ้าในน้ำเสีย	80 ml	มีมวล COD	$\frac{23,666 \times 80}{1,000} = 1,893 \text{ mg}$

$$\text{ดังนั้น Cell : COD} = \frac{486.3 \text{ mg cell}}{1,893 \text{ mg COD}} = \frac{486.3 \text{ g cell}}{1,893 \text{ g COD}} = 0.26 \text{ g cell/g COD}$$

2. การคำนวณก๊าซที่สภาวะมาตรฐาน

การคำนวณก๊าซที่สภาวะมาตรฐาน โดยแสดงการคำนวณการเปลี่ยนปริมาตรก๊าซที่สภาวะการทดลอง (Room condition) เป็นปริมาตรก๊าซที่สภาวะมาตรฐาน (Standard temperature and Pressure, STP)

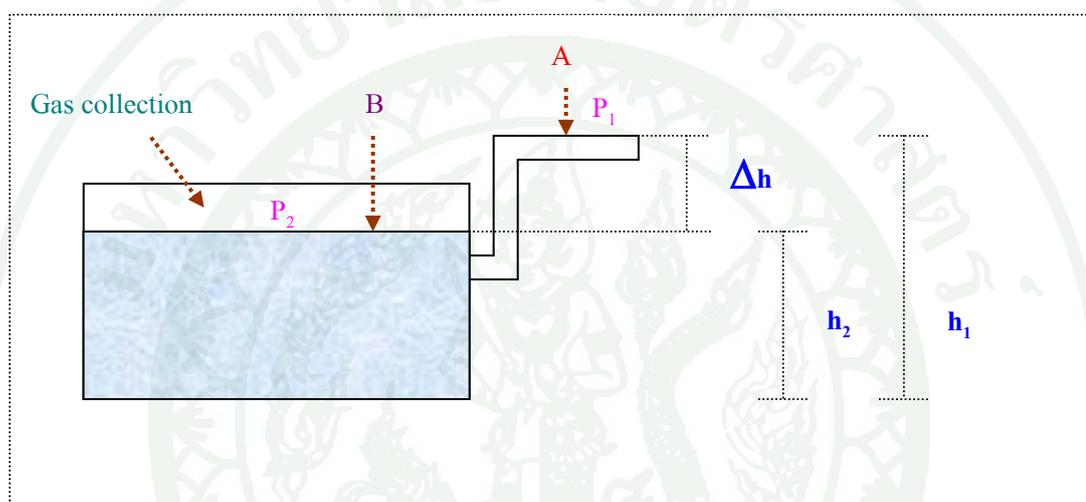
สภาวะมาตรฐาน (STP) คือ สภาวะที่อุณหภูมิ 0°C (273.15 K) และที่ความดัน 1 บรรยากาศ ($1.013 \times 10^5 \text{ N/m}^2$)

สภาวะการทดลอง คือ สภาวะที่อุณหภูมิห้อง $30\text{-}31^{\circ}\text{C}$ เฉลี่ย 30°C และที่ความดันของก๊าซในระบบเก็บก๊าซ ซึ่งใช้สมการ (1) ในการคำนวณ

$$\text{จาก} \quad \frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad (1)$$

เมื่อ	P_1, P_2	=	ความดันก๊าซที่ STP และที่สภาวะการทดลอง ตามลำดับ
	T_1, T_2	=	อุณหภูมิ (K) ที่ STP และที่สภาวะการทดลอง ตามลำดับ
	V_1, V_2	=	ปริมาตรก๊าซที่ STP และที่สภาวะการทดลอง ตามลำดับ

สามารถคำนวณเปลี่ยนปริมาตรก๊าซที่สภาวะทดลอง เป็นปริมาตรก๊าซที่สภาวะมาตรฐาน
ดังนี้



ภาพผนวกที่ ข1 ความดันของก๊าซในระบบเก็บก๊าซของการทดลอง

จากภาพสามารถหา P_2 ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{ความดันที่จุด A} &= \text{ความดันที่จุด B} \\
 P_1 + \rho g h_1 &= P_2 + \rho g h_2 \\
 P_2 &= P_1 + \rho g (h_1 - h_2) \quad (2)
 \end{aligned}$$

โดยที่ $P_1 = 1.013 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ หรือ 1 atm.

$\rho = 1,000 \text{ Kg/m}^3$

$g = 9.8 \text{ m/s}^2$

$(h_1 - h_2) =$ ความสูงของก๊าซที่อยู่ในระบบเก็บก๊าซ (m.) ได้จากการทดลอง

การคำนวณ โดยค่า $(h_1 - h_2)$ ความสูงของก๊าซที่อยู่ในระบบเก็บก๊าซวัดได้ $1.6 \times 10^{-2} \text{ m}$. และอุณหภูมิเฉลี่ย 30°C หากความดันที่จุด B โดยการ แทนค่าใน (2) จะได้

$$\begin{aligned}
 P_2 &= (1.013 \times 10^5) + (1,000 \times 9.8 \times 1.6 \times 10^{-2}) \\
 &= 101,456.8 \text{ N / m}^2 \\
 &\cong 1 \text{ atm.}
 \end{aligned}$$

หาค่าความสัมพันธ์ระหว่าง V_1 และ V_2 จากสมการที่ (1)

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad (1)$$

โดย

$$\begin{aligned}
 P_1 &= \text{ความดันที่ STP (101,300.0 N / m}^2\text{)} \\
 P_2 &= \text{ความดันที่สภาวะการทดลอง (101,456.8 N / m}^2\text{)} \\
 T_1 &= \text{อุณหภูมิ (K) ที่ STP (273.15 K)} \\
 T_2 &= \text{อุณหภูมิ (K) ที่สภาวะการทดลอง (273.15 + 30 K)} \\
 V_2 &= \text{ปริมาตรก๊าซที่สภาวะการทดลอง (V}_2\text{ ml)}
 \end{aligned}$$

แทนค่าหา V_1 ปริมาตรก๊าซที่ STP

$$\begin{aligned}
 V_1 &= \frac{P_2 V_2 T_1}{P_1 T_2} \\
 V_1 &= \frac{101,456.8 \times V_2 \times 273.15}{101,300 \times (273.15 + 30)} \\
 V_1 &= 0.8878 V_2 \quad \text{ml}
 \end{aligned}$$

เพราะฉะนั้นในการเปลี่ยนปริมาตรก๊าซที่สภาวะการทดลอง เป็นปริมาตรก๊าซที่สภาวะมาตรฐาน นั้นทำได้โดยคูณค่า 0.8878 กับปริมาตรก๊าซที่สภาวะทดลองในหน่วย ml

ตัวอย่างการคำนวณก๊าซที่สภาวะมาตรฐาน

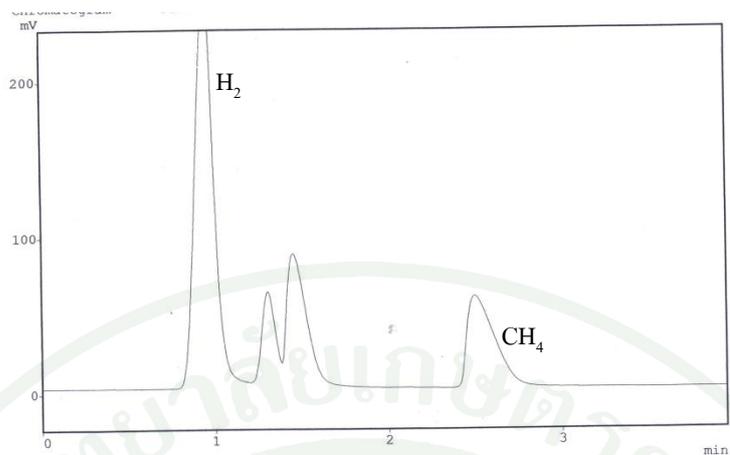
ตารางผนวก ข1 ตัวอย่างปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสม

Time (hr)	Total gas (ml at STP)	%H ₂	H ₂ (ml at STP)	Accumulate H ₂ (ml at STP)
0	0.00	0.00	0.00	0.00
1	9.06	2.32	0.21	0.21
3	4.21	16.53	0.70	0.91

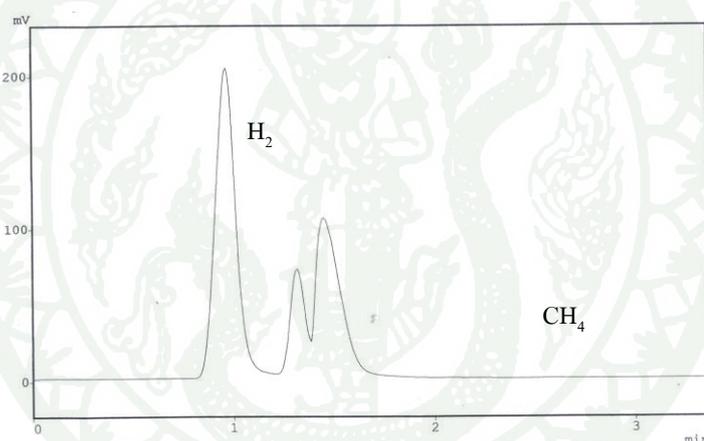
จากตารางผนวก ข1 Total gas (ml at STP) เป็นการเปลี่ยนปริมาตรก๊าซที่สภาวะการทดลอง เป็นปริมาตรก๊าซที่สภาวะมาตรฐาน ทำได้โดยคูณค่า 0.8878 กับปริมาตรก๊าซที่สภาวะทดลอง %H₂ ได้มาจากการเก็บตัวอย่างก๊าซในระบบแล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gas chromatograph (GC/TCD) (ภาพผนวกที่ ข4) โดยผลการวิเคราะห์จากเครื่อง Gas chromatograph จะแสดงผลเป็นพื้นที่ใต้กราฟ และนำไปเทียบกับพื้นที่ใต้กราฟของก๊าซมาตรฐาน ซึ่งการศึกษานี้ใช้ก๊าซไฮโดรเจน 30% เป็นก๊าซมาตรฐาน โดยแสดงผลก๊าซไฮโดรเจนที่ retention time ที่ประมาณ 0.95 นาที มีพื้นที่ใต้กราฟเป็น 1,790,801 ดังภาพผนวกที่ ข2 และเมื่อนำตัวอย่างก๊าซในระบบไปวิเคราะห์จะใช้พื้นที่ใต้กราฟที่ retention time ประมาณ 0.9 นาที เป็นผลของก๊าซไฮโดรเจน ดังภาพผนวกที่ ข3 ซึ่งโคร-มาโตแกรมแสดงให้เห็นว่าเครื่อง Gas chromatograph ตรวจพบก๊าซไฮโดรเจน

H₂ (ml at STP) ได้จากการคำนวณ Total gas (ml at STP) กับ %H₂ ตัวอย่างเช่นที่ชั่วโมงที่ 3 มีการคำนวณดังต่อไปนี้

ถ้าปริมาตรก๊าซทั้งหมด 100 ml เป็นปริมาตรไฮโดรเจน 16.53 ml
 ถ้ามีปริมาตรก๊าซ 4.21 ml เป็นปริมาตรไฮโดรเจน $\frac{16.53}{100} \times 4.21 = 0.71$ ml



ภาพผนวกที่ ข2 โครมาโตแกรมของก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทนมาตรฐาน



ภาพผนวกที่ ข3 โครมาโตแกรมของตัวอย่างก๊าซในระบบ



ภาพผนวกที่ ข4 เครื่อง Gas chromatograph (GC/TCD) Model Shimadzu รุ่น GC-14B

3. การคำนวณอัตราการผลิตไฮโดรเจนจำเพาะ (Specific hydrogen production rate, SHPR)

อัตราการผลิตไฮโดรเจนจำเพาะ (SHPR, ml H₂/g cells-hr) คือ อัตราการผลิตไฮโดรเจนสูงสุดที่ได้จากความชันของกราฟการเกิดไฮโดรเจนสะสมใน 24 ชั่วโมงแรก (ml/hr) ต่อความเข้มข้นของเซลล์ เริ่มต้น

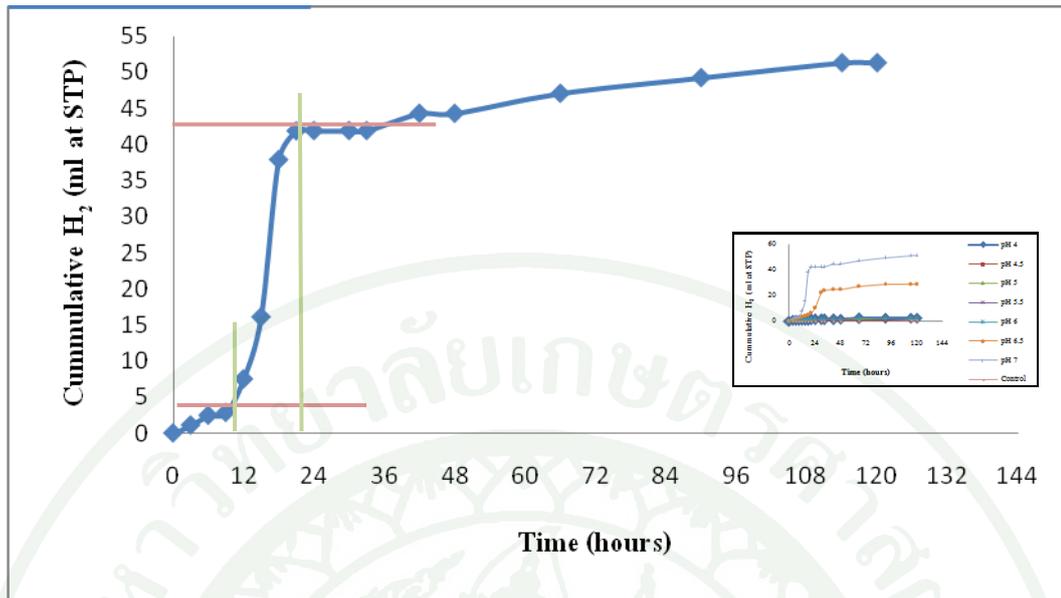
จากภาพผนวกที่ ข4 เป็นปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสะสมที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 7 ซึ่งเป็นการยกตัวอย่างกราฟมาจากภาพที่ 8 ของการรายงานผลการศึกษา (ภาพเล็ก) โดยที่อัตราการผลิตไฮโดรเจนสูงสุด เป็นค่าที่ได้จากความชันสูงสุดของกราฟ ดังนี้

$$\text{Slope} = \frac{\text{ระยะแกนแนวตั้ง}}{\text{ระยะแกนแนวราบ}} = \frac{\Delta Y}{\Delta X}$$

แทนค่าจากกราฟในภาพผนวก ข3 จะได้ว่า

$$\text{Slope} = \frac{42.5 - 3 \text{ ml}}{21 - 10 \text{ hr}} = \frac{39.5 \text{ ml}}{11 \text{ hr}} = 3.59 \text{ ml/hr}$$

จากนั้น นำค่า Slope ที่ได้ไปหารด้วย ค่า MLVSS เริ่มต้น จะได้ผลดังตารางผนวก ก65 ซึ่งวิธีการคำนวณเป็นเช่นเดียวกันในทุกการศึกษา



ภาพผนวกที่ ข4 ปริมาตรไฮโดรเจนสะสมที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 7 ด้วยตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยวิธี Heat treatment ของ Cell: COD = 0.26 โดยในช่วงเริ่มต้นการหมักตะกอนจุลินทรีย์มี Activity ต่ำ (%H₂ ในการเริ่มต้นการหมักต่ำกว่า 50%)

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวบุษกร กาญจนาคาร
วัน เดือน ปี ที่เกิด	13 พฤศจิกายน พ.ศ.2529
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วท.บ.(วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม) มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	ผู้ช่วยนักวิจัย
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-