บทที่ 4
ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 ศึกษาองค์ประกอบทางเคมี และทางกายภาพของ POME และสาหร่ายพุงชะโด

น้ำทิ้งโรงงงานสกัดน้ำมันปาล์ม (POME) ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม บริษัท ปาล์มพัฒนาชายแดนใต้ อ. หนองจิก จ. ปัตตานี ได้ถูกนำมาแช่ตู้เย็นอุณหภูมิ 4 ˚C เพื่อรักษาสภาพของวัตถุดิบก่อนที่จะถูกนำมาทดลอง POME มีลักษณะที่ข้นและเป็นสีน้ำตาลและจากการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักเป็นสารอินทรีย์ในรูปของของแข็งระเหยได้ (VS) 63.5 g/L แสดงถึงปริมาณของสารอินทรีย์ที่มาก (ประกอบไปด้วยคาร์โบไฮเดรต ไขมัน โปรตีนและกรดอินทรีย์ระเหยได้ (VFA)) ซึ่งหมายถึงมีความเหมาะสมในการบำบัดด้วยกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศที่มีการย่อยสลายด้วยจุลินทร์เป็นตัวหลักในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศนี้ POME มีค่าอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) อยู่ในระดับสูงประมาณ 29 ในขณะที่ pH มีค่าค่อนข้างต่ำอาจเนื่องมาจากกรดไขมันของน้ำมันปาล์มดิบ และสันนิษฐานว่า POME ที่เก็บมาจากบ่อพักน้ำเสียของโรงงานมีการหมักโดยจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนอยู่ใน POME ทำให้มีการสร้างและสะสมของกรดไขมันระเหยได้ขึ้น โดยจะเห็นได้ว่ามีปริมาณของน้ำมันและไขมันที่ปนอยู่ 15.08 g/L เป็นองค์ประกอบอินทรีย์หนึ่งที่ย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ได้ค่อนข้างยาก แต่พบรายงานว่าน้ำมันและไขมันสามารถให้ผลผลิตของแก๊สมีเทนที่เพิ่มขึ้นได้ (Angelidaki *et al*., 1990) ในขณะที่สาหร่ายพุงชะโดซึ่งถูกเก็บจากคลองบริเวณรอบสวนสาธารณะเทศบาลเมืองปัตตานี และนำมาระเหยน้ำออกโดยการตากแดดให้แห้งและบดเพื่อให้สาหร่ายพุงชะโดมีอนุภาคขนาดเล็กลง (25 Mesh<0.707 mm) ซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ในการย่อยสลายด้วยกระบวนการเชิงกลเพื่อช่วยให้จุลินทรีย์ย่อยสลายได้ง่ายขึ้น จากนั้นนำไปเก็บรักษาสภาพโดยการแช่เย็นที่อุณหภูมิ 4˚C ซึ่งจากการศึกษาหาลักษณะทางกายภาพและเคมีของพบว่าสาหร่ายดังกล่าวมีปริมาณสารอินทรีย์ประมาณร้อย 79.7 โดยน้ำหนักและมีอัตราส่วน C/N ประมาณ 17 ซึ่งค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับ POME แสดงให้เห็นว่าสาหร่ายพุงชะโดมีปริมาณไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบในปริมาณค่อนข้างสูง ตารางที่ 4.1 แสดงสมบัติต่าง ๆ ของ POME และสาหร่ายพุงชะโด

สมบัติของทั้ง POME และสาหร่ายพุงชะโดซึ่งมีลักษณะที่แตกต่างกันโดยเฉพาะอย่างยิ่งค่า C/N จึงสามารถนำมาผสมกันเป็นซับสเตรตร่วมในกระบวนการย่อยสลายร่วมไร้อากาศ คาดว่าการผสมกันของซับสเตรตสองชนิดสามารถส่งผลให้เพิ่มผลผลิตของทั้งไฮโดรเจนและมีเทนในกระบวนผลิตไร้อากาศสองขั้นตอน เนื่องจากการย่อยสลายร่วมจะเกิดปฏิสัมพันธ์เชิงบวก (Positive synergisms) ต่อจุลินทรีย์ในระบบการย่อยสลายและช่วยเพิ่มปริมาณสารอินทรีย์ที่สามารถถูกย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ ปรับสัดส่วนสารอาหารหลักของ เช่นอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C:N) และอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อฟอสฟอรัส (C:P) ให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ลดการเกิดสภาวะกรดเฉียบพลันภายในถังปฏิกรณ์ เนื่องจากมี Buffering capacity เพิ่มขึ้น และช่วยเจือจางความเข้มข้นของสารพิษ (Toxic compounds) (Angelidaki and Ellegaard, 2003; Costa *et al*., 2012; Mata-Alvarez *et al*., 2000)

ตารางที่ 4.1 สมบัติทางเคมีของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม (POME) และสาหร่ายพุงชะโด

Parameters	POME g/L	*C. demersum* %TS (w/w)
pH	4.43±0.46	6.34±0.31
Total solid content; TSC	51.88±0.11	95.26±0.20
Volatile solid content; VSC	42.76±0.08	83.71±0.14
Ash	9.12±0.03	16.29±0.14
Chemical oxygen demand; COD	63.84±3.14	92.857±0.42
Total Kjeldahl Nitrogen; TKN	0.797±0.05	12.29±0.20
NH_3-N	0.140±0.01	0.217±0.02
Oil and grease	15.08±0.62	3.705±0.21
Alkalinity (g-$CaCO_3$/L)	0.261±0.001	N.A.
Total Phenolic content	1.760±0.09	9.267±0.21
Total Carbohydrate content	24.983	58.448
Sulfate content	0.881±0.001	0.415±0.004
C/N ratio*	29	17

N.A.: Not Analyzed

* C/N ratio ถูกวิเคราะห์โดยการวิเคราะห์ CHONS โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ CHNS/O analyzer (Thermo Quest Flash EA 1112)

4.2 ศักยภาพการผลิตแก๊สไฮโดรเจนและมีเทนในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์จากซับสเตรตที่อัตราส่วนผสมของ POME และสาหร่ายต่างกัน

4.2.1 ศักยภาพการผลิตไฮโดรเจน (BHP) จากการหมักร่วม

การผลิตไฮโดรเจนโดยการหมักร่วมระหว่าง POME และสาหร่ายพุงชะโดที่อัตราอัตราส่วนร้อยละ (VS Basis) 0:100, 10:90, 20:80, 30:70, 40:60, 50:50, 60:40, 70:30, 80:20, 90:10 และ 100:0 ในขวดซีรัมขนาด 120 mL (ปริมาตรใช้งาน 60 ml) และควบคุมความเข้มข้นของซับสเตรต 10 g-VS/L จากนั้นเติมกล้าเชื้อผลิตไฮโดรเจน 18 mL ใช้สารละลายด่างจากเถ้าปาล์มซึ่งมี pH ประมาณ 12 ปรับปริมาตรให้ได้ 60 mL ปิดด้วยฝาจุกซิลิโคน และฝาจุกอะลูมิเนียมโดยใช้ Hand crimper เปลี่ยนบรรยากาศภายใน Head space ให้เป็นแก๊สไนโตรเจน โดยพ่นไนโตรเจนผ่านเป็นเวลา 2 นาที จากนั้นนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 55°C ในแต่ละชุดการทดลองจะเตรียม 3 ซ้ำ และมี Blank ซึ่งใช้สารละลายด่างจากเถ้าปาล์มแทนซับสเตรต และใช้สารละลายน้ำตาลกลูโคสที่ความเข้มข้น 10 g/L เป็นชุดควบคุม กล้าเชื้อผลิตไฮโดรเจนนำมาจากถังปฏิกรณ์ CSTR ในระดับห้องปฏิบัติการของหน่วยวิจัยหน่วยวิจัยการแปรรูปชีวมวลเพื่อพลังงานและเคมีภัณฑ์ (Bio-Mass Conversion to Energy and Chemicals: Bio-MEC Research Unit) คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขต

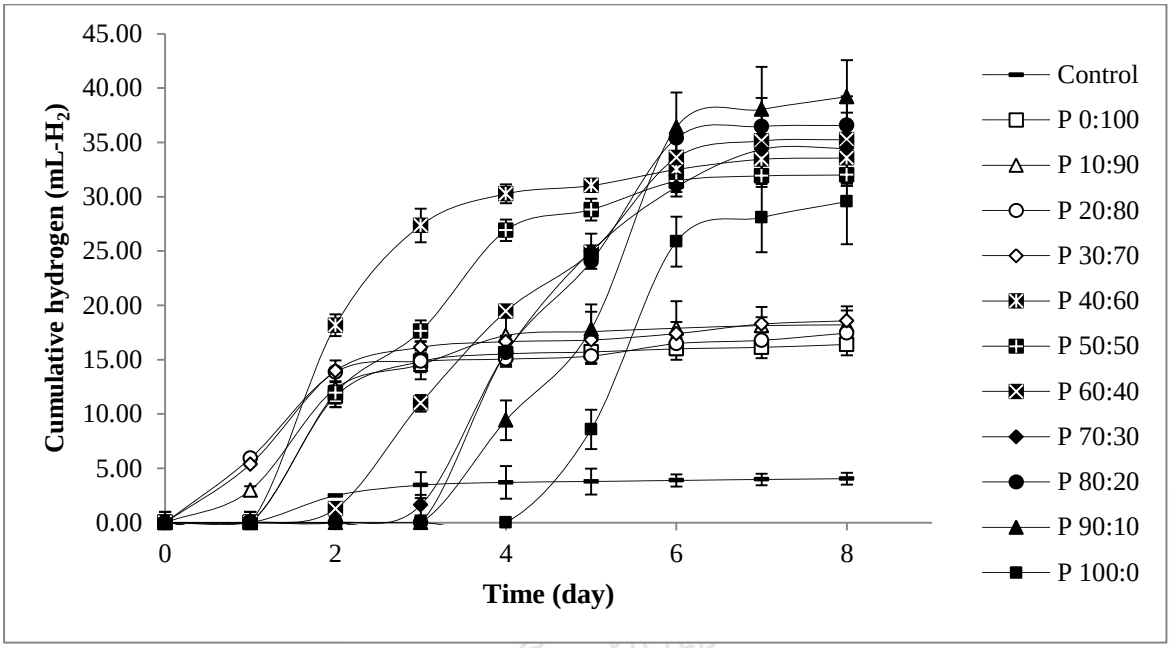
Prince of Songkla University Pattani Campus

ปัตตานี ถังปฏิกรณ์ CSTR ดังกล่าวได้ถูกใช้เพื่อผลิตไฮโดรเจนจากการหมักร่วมระหว่าง POME และซีรัมน้ำยางสกิมที่สภาวะเทอร์โมฟิลิกและควบคุมระยะเวลากักเก็บน้ำ (HRT) 4.5 วันในงานวิจัยก่อนหน้านี้

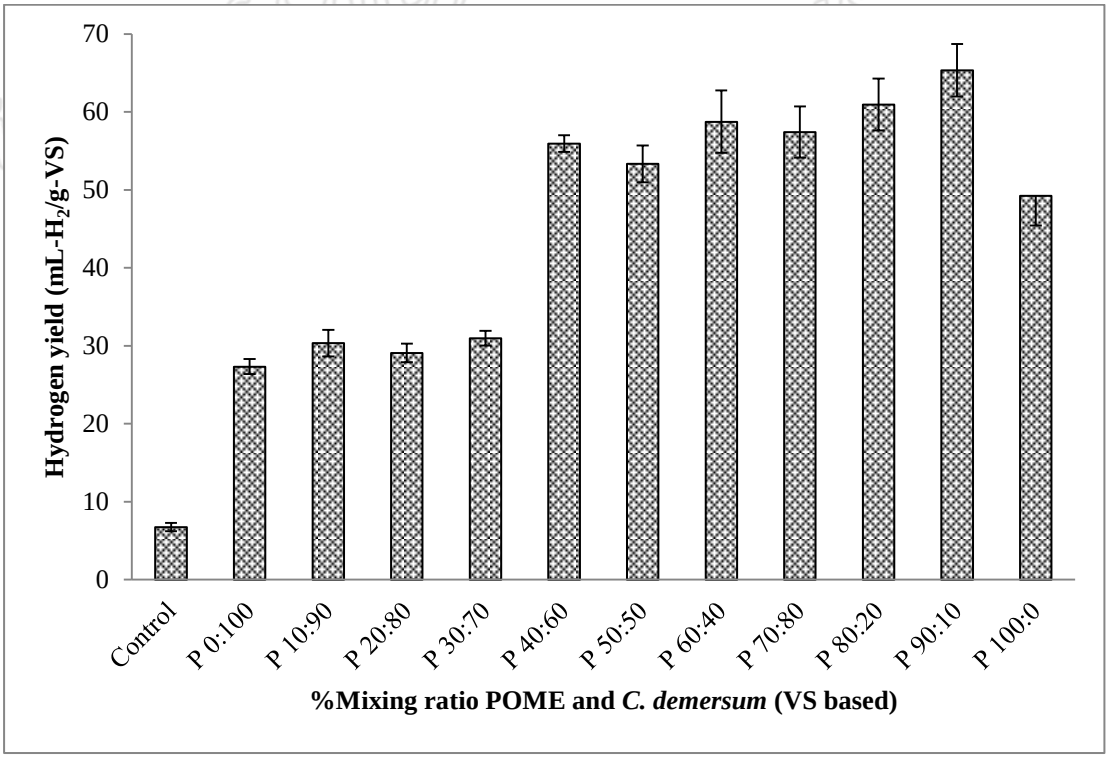
ผลผลิตไฮโดรเจนจากการหมักร่วมระหว่าง POME และสาหร่ายพุงชะโดที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ โดยมีความเข้มข้นเท่ากับ 10 g-VS/L ในทุกชุดการทดลองด้วยอัตราส่วนระหว่าง POME กับ สาหร่ายพุงชะโดดังที่กล่าวมาข้างต้นและใช้เฉพาะสารละลายเถ้าปาล์มเป็นสารบัพเฟอร์โดยไม่มีการเติมสารอาหารอื่น ๆ ผลผลิตไฮโดรเจนสูงสุด 65.35±3.37 mL-H_2/g-VS_{added} ได้จากการหมักที่อัตราส่วนการผสมของ POME และสาหร่ายพุงชะโดเท่ากับ 90:10 (VS Basis) ผลผลิตไฮโดรเจนดังกล่าวเพิ่มขึ้นร้อยละ 19 และร้อยละ 58 เมื่อเทียบกับการหมักเฉพาะ POME และสาหร่ายพุงชะโด ผลผลิตไฮโดรเจนที่ได้จากการหมักชุดที่มีสัดส่วนของสาหร่ายร้อยละ 10-60 (VS Basis) พบว่าถึงแม้แนวโน้มจะค่อย ๆ ลดลงตามปริมาณของสาหร่ายที่ลดลง แต่ผลผลิตไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (P-value>0.05) แต่จากผลการทดลองที่สามารถเห็นได้อย่างชัดเจนของผลผลิตไฮโดรเจนที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่ออัตราส่วนของสาหร่ายสูงกว่าร้อยละ 70 ขึ้นไป

เมื่อหมักโดยใช้เฉพาะสาหร่ายพุงชะโดให้ผลผลิตไฮโดรเจนค่อนข้างต่ำเท่ากับ 27.34±0.98 mL-H_2/g-VS_{added} ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับผลผลิตไฮโดรเจนที่ได้จากการหมักน้ำตาลกลูโคสที่ความเข้มข้น 10 g/L ตลอดช่วงการหมักเป็นระยะเวลา 8 วัน เนื่องจากชุดหมักสาหร่ายพุงชะโดและน้ำตาลกลูโคสที่สัดส่วนของสารอาหารที่ไม่เหมาะสมส่งผลให้จุลินทรีย์ไม่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากผลรวมของแก๊สไฮโดรเจนพบว่าในช่วงที่มีอัตราส่วนของสาหร่ายผสมอยู่มากคือร้อยละ 70-90 จะสามารถเกิดไฮโดรเจนได้ตั้งแต่วันแรกของการทดลอง แต่จะเห็นได้ชัดเจนเมื่อมีอัตราส่วนของสาหร่ายที่ลดลงแต่อัตตราส่วนของ POME ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ระยะเวลาช่วงของการปรับตัวจุลินทรีย์ (lag phase) นานขึ้นดังภาพที่ 4.1 เนื่องมาจากองค์ประกอบของน้ำมันที่ปนอยู่ใน POME ที่ย่อยสลายได้ค่อนข้างยากกว่า โดยผลจากการศึกษาของ Rasit *et al.* (2015) พบว่าไขมันมีผลต่อกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศในขั้นตอนการไฮโดรไลซิสทำให้เกิดผลผลิตของการเกิดแก๊สล่าช้าในระยะเริ่มต้นของการหมัก แต่อย่างไรก็ตามผลผลิตของแก๊สที่เกิดขึ้นในส่วนที่มี POME ตั้งแต่ร้อยละ 40 ขึ้นไปจะให้ผลผลิตแก๊สไฮโดรเจนที่สูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญ (P-value<0.05) เมื่อเทียบกับที่มี POME ผสมอยู่ตั้งแต่ร้อยละ 30 ลงไป แต่ที่การหมัก POME อย่างเดียวให้ปริมาณรวมของไฮโดรเจนที่ต่ำกว่าแบบผสม ที่มี POME ผสมอยู่ตั้งแต่ร้อยละ 40 ขึ้นไป (ภาพที่ 4.2) โดยผลผลิตไฮโดรเจนของการหมัก POME อย่างเดียวอยู่ที่ 49.25±3.81 mL-H_2/g-VS_{added} ซึ่งก็ไม่แต่กต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับที่มีการผสม POME ผสมอยู่ตั้งแต่ร้อยละ 40 ขึ้นไป

ผลการทดลองสามารถยืนยันได้ว่าเมื่อใช้อัตราส่วนผสมระหว่าง POME และสาหร่ายพุงชะโดที่เหมาะสม ส่งผลให้เกิดปฏิสัมพันธ์เชิงบวก (Positive synergisms) ซึ่งเป็นผลให้เกิดการผลิตไฮโดรเจนได้สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยปฏิสัมพันธ์เชิงบวกที่สำคัญได้แก่ อัตราส่วนปริมาณสารคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) ที่เหมาะสมที่พบในงานวิจัยนี้ช่วงอัตราส่วนผสมที่มี POME ต่อสาหร่ายพุงชะโดช่วง 40:60-90:10 คือช่วงที่มีค่า C/N ratio ของซับสเตรตรวมอยู่ในช่วง 21.8-27.7 (ตารางที่ 4.3) มีความเข้มข้นของสารยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ต่ำ และค่า pH ในระบบการหมักที่เหมาะสม ซึ่งอยู่ในช่วง 5.15-5.49 ดังแสดงในตารางที่ 4.2



ภาพที่ 4.1 ปริมาณผลผลิตแก๊สไฮโดรเจนรวมจากการหมักร่วมระหว่าง POME และสาหร่ายพุงชะโดแบบแบทช์ที่ความเข้มข้นซับสเตรตร่วมเริ่มต้น 10 g-VS/L ที่ระยะเวลา 8 วัน



ภาพที่ 4.2 ผลผลิตของแก๊สไฮโดรเจนจากการหมักร่วมระหว่าง POME และสาหร่ายพุงชะโดแบบแบทช์ที่ความเข้มข้นซับสเตรตร่วมเริ่มต้น 10 g-VS/L

การหมักร่วมระหว่าง POME และ สาหร่ายพุงชะโดแบบแบทช์ที่ความเข้มข้นซับสเตรตร่วมเริ่มต้น 10 g-VS/L โดยมีอัตราส่วนเข้มข้นต่าง ๆ ที่อุณหภูมิเทอร์โมฟิลิก (55°C) โดยกล้าเชื้อผสม

(Mixed cultures) เพื่อศึกษาผลของการผลิตไฮโดรเจนเกิดพร้อมกับการผลิตกรดอะซิติกและบิวทิริก และกรดอื่น ๆ เช่น โพรพิโอนิก และกรด แลคติก (ตารางที่ 4.2) ส่งผลให้ในระหว่างการผลิตไฮโดรเจนค่าพีเอชของน้ำหมักมีค่าลดลง ดังนั้นในระบบหมักผลิตไฮโดรเจนจำเป็นต้องใช้สารบัฟเฟอร์เพื่อควบคุม pH ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไฮโดรเจน (5-6) ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของกลุ่มแบคทีเรียผลิตไฮโดรเจน (Kengen *et al*., 2009) น้ำหมักซึ่งมีองค์ประกอบเป็นกรดอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ ก็จะใช้เป็นซับสเตรตสำหรับการผลิตแก๊สมีเทนในขั้นตอนที่สอง (ขั้นตอนการผลิตมีเทน) ผลิตไฮโดรเจนสูงสุดได้จากการหมักร่วม POME และสาหร่ายพุงชะโดที่อัตราส่วน VS 90:10 พร้อมกับผลผลิตกรดอะซิติก 48.8 mM, กรดบิวทิริก 18.3 mM และกรดแลคติก 17.5 mM

ทั้งนี้ผลผลิตของกรดที่เกิดขึ้นในระบบส่งผลให้ระบบมีความเป็นกรดมากขึ้น แต่ที่อัตตร่าส่วนของ POME ตั้งแต่ร้อยละ 40 ขึ้นไปพบว่าค่าความเป็นกรดที่วัดได้หลังหมักมีค่าที่สูงกว่า pH ก่อนหมัก แต่เป็นช่วง pH ที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในกลุ่มที่ผลิตไฮโดรเจน ซึ่งการลดลงของความเป็นกรดที่เกิดขึ้นเป็นไปได้ว่ากรดกรดแลกติกที่มีปริมาณมากใน POME ทำให้ pH เริ่มต้นต่ำ แต่เมื่อมีกระบวนการหมักเกิดขึ้นจุลินทรีย์สามารถเปลี่ยนกรดแลกติกด้วยปฏิกิริยาการหมักและออกซิเดชันเป็นกรด กรดอะซิติกและโพรพิโอนิก (Willquist *et al*., 2012) ซึ่งมีค่าความเป็นกรดน้อยกว่าจึงเป็นผลให้มีการเพิ่มขึ้นของ pH หลังหมัก โดยกรดอินทรีย์มีค่าความเป็นกรดจากมากไปน้อยดังต่อไปนี้ แลคติก (Ka=1.37×10-4) > อะซิติก (Ka=1.80×10-5) > บิวทิริก (Ka=1.51×10-5) > โพรพิโอนิก (Ka=1.34×10-5) ตามลำดับ

ผลการทดลองตารางที่ 4.2 พบผลผลิตไฮโดรเจนมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการผลิตกรดโพรพิโอนิกเพิ่มขึ้นและยังคงมีผลผลิตกรดแลคติกอยู่ในระดับสูงผลผลิตไฮโดรเจนจากการหมักสารอินทรีย์ประเภทคาร์โบไฮเดรตถูกผลิตออกมาพร้อมกับกรดอะซิติกและกรดบิวทิริก ดังนั้นเมื่อกรดอินทรีย์ชนิดอื่นถูกผลิตร่วมด้วยจึงส่งผลให้ผลผลิตไฮโดรเจนลดลง เนื่องจากระบบหมักมีความดันย่อยของไฮโดรเจนสูงจึงส่งผลให้แบคทีเรียเปลี่ยนวิถีของกระบวนการ (Pathway) ผลิตเป็นกรดแลคติกและหรือกรดโพรพิโอนิกเพิ่มมากขึ้น (Kongjan *et al*., 2009; Van Niel *et al*., 2003)

ตารางที่ 4.2 ความเข้มข้นของกรดอินทรีย์หลังการหมักร่วมแบบแบทช์ระหว่าง POME และสาหร่ายพุงชะโดที่ความเข้มข้นซับสเตรตร่วมเริ่มต้น 10 g-VS/L

Mixing ratio (VS Basis)	Concentration (mM)				pH initial	pH final
POME: *C. demersum*	Acetic	Butyric	Propionic	Lactic		
Control	14.6	7.2	1.6	11.0	5.50	4.59
100:0	36.4	11.1	0	20.8	4.45	4.95
90:10	48.8	18.3	0	17.5	4.55	5.03
80:20	41.6	13.6	3.2	27.0	4.67	5.09
70:30	37.9	12.9	3.5	25.7	4.80	5.15
60:40	35.1	11.5	3.7	20.2	4.94	5.21
50:50	33.6	10.9	5.8	17.1	5.11	5.34
40:60	35.8	9.6	5.4	15.3	5.32	5.49
30:70	28.4	7.5	6.2	9.9	5.61	5.45
20:80	29.7	6.2	5.7	9.9	5.87	5.49
10:90	25.7	5.6	9.8	5.1	6.22	5.65
0:100	23.6	5.1	8.0	5.0	6.53	5.61

4.2.2 ศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทน (BMP) จากน้ำหมักขั้นตอนผลิตไฮโดรเจน

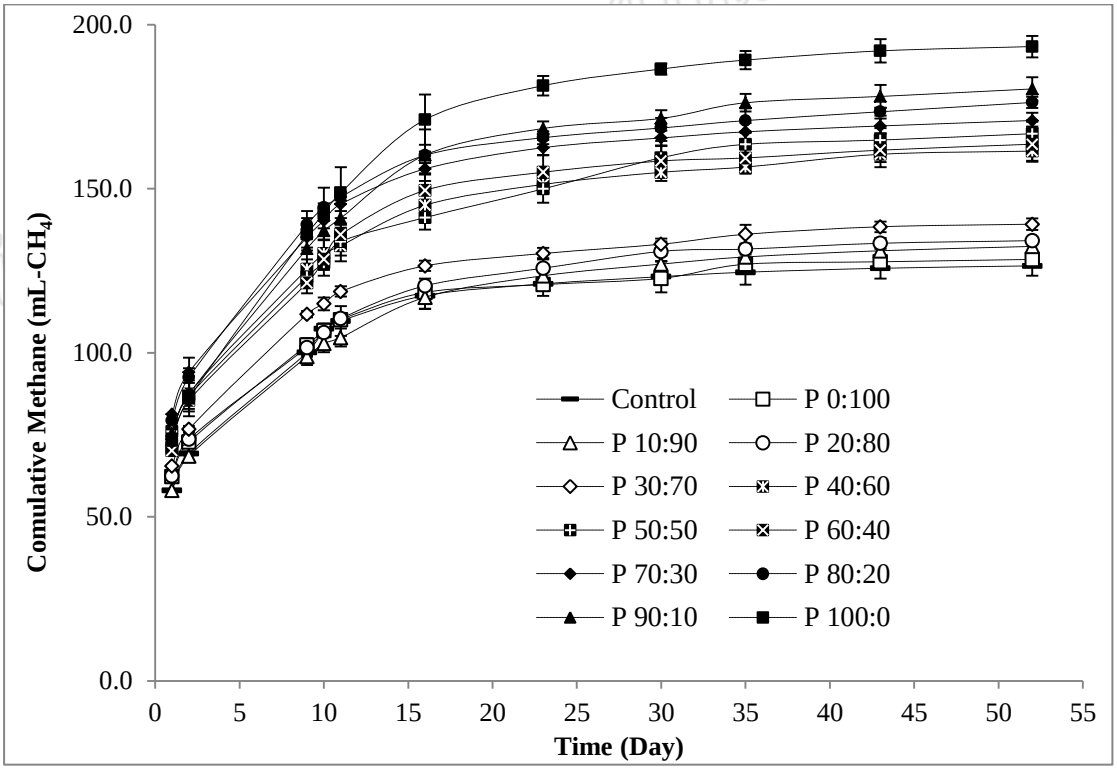
การผลิตมีเทนจากน้ำหมักขั้นตอนผลิตไฮโดรเจน ได้ถูกทดลองโดยใช้ขวดซีรัมขนาด 120 mL (ปริมาตรใช้งาน 60 mL) โดยเติมสารละลายจากขั้นตอนการหมักของแต่ละชุดการทดลองของขั้นตอนผลิตไฮโดรเจนปริมาตร 18 mL (ปริมาตรสุดท้ายหลังเก็บตัวอย่าง) ลงในขวดซีรัม จากนั้นเติมกล้าเชื้อที่เตรียมไว้ 42 mL ปิดด้วยฝาจุกซิลิโคน และฝาจุกอะลูมิเนียมโดยใช้ Hand crimper เปลี่ยนบรรยากาศภายใน Head space ให้เป็นแก๊สไนโตรเจน โดยพ่นไนโตรเจนผ่านเป็นเวลา 3-5 นาที จากนั้นนำไปบ่มที่สภาวะอุณหภูมิห้อง (25-35°C) กล้าเชื้อที่ใช้ในการทดลองได้รับความอนุเคราะห์จากถังปฏิกรณ์ชนิดท่อไหล (PFR) ขนาด 2000 m^3 และมี HRT 40-50 วัน ของ บริษัท ปาล์ม พัฒนาไบโอแก๊ส จำกัด อ.หนองจิก จ.ปัตตานี กล้าเชื้อที่ได้ถูกบ่มที่อุณหภูมิห้อง 3 วัน เพื่อให้จุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ยังเหลืออยู่ในกล้าเชื้อ

ผลการทดลองการหมักเพื่อผลิตมีเทนซึ่งใช้ระยะเวลาในการทดลอง 52 วัน (ภาพที่ 4.3) จะเห็นได้ว่ามีการผลิตแก๊สมีเทนเกิดขึ้นตั้งแต่วันที่ 1 ของการทดลอง เนื่องจากเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้มีความคุ้นชินกับซับสเตรตที่ใช้และอยู่ในสภาวะกระตุ้น โดยผลผลิตมีเทนจากการใช้น้ำหมักจากขั้นตอนการผลิตไฮโดรเจนด้วยการหมักร่วมระหว่าง POME และสาหร่ายพุงชะโดที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ ดังแสดงในภาพที่ 4.4 ผลผลิตมีเทนสูงสุดเท่า 410.4±18.7 ml-CH_4/g-VS_{added} ได้จากน้ำหมักจากขั้นตอนการผลิตไฮโดรเจนที่หมักเฉพาะ POME ผลผลิตมีเทนที่ได้จากน้ำหมักที่มีสาหร่ายผสมใน POME ที่อัตราส่วนร้อยละ 10-60 มีแนวโน้มลดลง แต่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (P-value>0.05) และเมื่อใช้

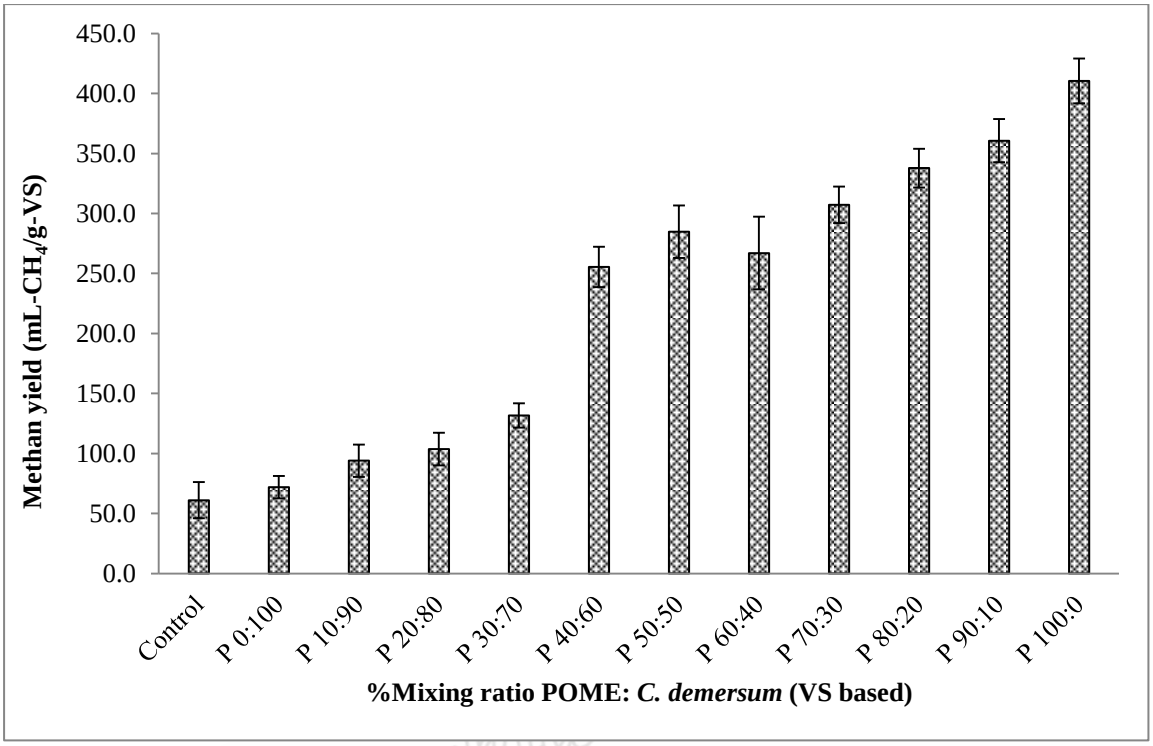
Prince of Songkla University Pattani Campus

น้ำหมักที่มีสาหร่ายสูงกว่าร้อยละ 70 ส่งผลให้ผลผลิตมีเทนลดลงอย่างมีนัยสำคัญและได้ผลิตมีเทนต่ำสุดเท่ากับ 71.9±9.4 ml-CH_4/g-VS_{added} เมื่อใช้น้ำหมักที่ได้จากการหมักเฉพาะเฉพาะสาหร่าย มีเทนที่ผลิตได้จากน้ำหมักที่มีสาหร่ายผสมร้อยละ 10 ใน POME มีผลผลิตมีเทนเป็น 360.7±18.0 mL-CH_4/g-VS_{added} เพิ่มขึ้นร้อยละ 80 เมื่อเทียบกับผลผลิตมีเทนที่ได้จากน้ำหมักที่มีเฉพาะสาหร่าย

ดังนั้นการใช้สาหร่ายในการหมักอัตราส่วนผสมดังกล่าวสามารถทำให้เกิดปฏิสัมพันธ์เชิงบวกจากการใช้ซับเตรตร่วม ส่งผลให้มีอัตราส่วนของสารคาร์บอนและไนโตรเจน (C/N ratio) ในปริมาณที่เหมาะสำหรับสภาวะการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ซึ่งผลของ C/N ratio ที่ได้จากการผลิตมีเทนที่หมาะสมจากการทดลองอยู่ในช่วง 21.8-29 ส่งผลให้ได้ผลผลิตแก๊สมีเทนเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มสัดส่วนสาหร่ายที่สูงเกินไป (ในงานวิจัยนี้คือสูงกว่าร้อยละ 70) จะส่งผลทำให้เกิดผลผลิตมีเทนลดต่ำลง ซึ่งอาจคาดการณ์ได้จากสาเหตุจากมีปริมาณไนโตรเจนในระบบมากเกินไป ซึ่งอาจก่อให้เกิดมีการปล่อยไนโตรเจนในระบบโดยไนโตรเจนที่ปล่อยมาจะอยู่ในรูปแอมโมเนียและแอมโมเนียมไอออน และมีการปล่อยกรดไขมันระเหยได้เข้าสู่ระบบซึ่งมีผลยับยั้งการทำงานและมีพิษต่อเชื้อจุลินทรีย์ในระบบการผลิตแก๊สชีวภาพ (Sialve *et al.*, 2009)



ภาพที่ 4.3 ปริมาณผลผลิตมีเทนรวมจากการหมักด้วยน้ำหมักจากขั้นตอนการผลิตไฮโดรเจนจากการหมักร่วมระหว่าง POME และสาหร่ายพุงชะโดที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ



ภาพที่ 4.4 ผลผลิตมีเทนจากน้ำหมักจากขั้นตอนการผลิตไฮโดรเจนด้วยการหมักร่วมระหว่าง POME และสาหร่ายพุงชะโดที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ

ตารางที่ 4.3 ผลผลิตของมีเทนจากการหมักด้วยสารตั้งต้นต่าง ๆ ที่อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่างกัน

C/N ratio	Substrate	Operation mode	Digestion time (d)	Temp. (°C)	CH_4 yield (ml/g-VS)	references
5.64	Taihu blue algae	Batch, wet one stage	30	35	233.8	Maio *et al.* 2013
16.8	Chicken manure and corn stover	Batch, wet one stage	45	37	328.0	Li *et al*. 2013 a
27.3		Batch, wet one stage	30	37	298.0	Li *et al*. 2013 b
20.0		Batch, wet one stage	30	37	281.0	Li *et al*. 2014
27.7	POME and *C.demersum*	Batch, wet two stage	52	31±4	360.7	This study
29.0	POME	Batch, wet two stage	52	31±4	410.4	This study
17.0	*C.demersum*	Batch, wet two stage	52	31±4	71.9	This study

จากผลการทดลองผลผลิตมีเทนที่ได้จากการหมักร่วมกันของ POME และสาหร่ายพุงชะโดที่อัตราส่วนของ C/N 27.7 ให้ผลผลิตมีเทน 360.7 ml-CH_4/g-VS ที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการหมักร่วมกันของ Chicken manure and corn stover (ตารางที่ 4.3) ที่มีอัตราส่วนของ C/N ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้อาจกล่าวได้ว่าผลที่ได้มาจากการหมักแบบสองขั้นตอน ที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลายทางชีวภาพได้ดีกว่าแบบขั้นตอนเดียว เนื่องจากการหมักสองขั้นตอน ระบบจะอยู่ในสภาวะเหมาะสมสำหรับจุลินทรีย์ในการเจริญเติบโตเพื่อผลิตกรดในขั้นตอนแรก และผลิตแก๊สมีเทนในขั้นตอนหลัง ทั้งสองสภาวะที่มีความแตกต่างกัน ทำให้สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ของสภาวะนั้น ๆ ได้อย่างเต็มที่ เป็นผลทำให้ผลผลิตของมีเทนที่ได้สูงกว่า แต่อย่างไรก็ตามผลจากการหมักจาก Taihu blue algae ที่มีอัตราส่วน C/N ต่ำมาก 5.64 แต่สามารถให้ผลผลิตที่สูงกว่าการหมักสาหร่ายพุงชะโดเพียงอย่างเดียว ที่อัตราส่วน C/N 17 ซึ่งสูงกว่า แต่ให้ผลผลิตน้อยกว่า ทั้งนี้แสดงให้เห็นถึงองค์ประกอบที่สำคัญนอกจากธาตุอาหารหลัก C/N แล้วก็ยังมีธาตุอาหารอื่น ๆ ที่สำคัญอีกเช่น ฟอสฟอรัส โพแทซเซียม เป็นต้น สัดส่วนของหัวเชื้อกับซับสเตรต และชนิดของจุลินทรีย์ก็ยังเป็นอีกปัจจัยสำหรับการเกิดผลผลิตแก๊สมีเทนอีกด้วย ดังจะสังเกตได้จากผลผลิตไฮโดรเจนจากกระบวนการหมักร่วมกันของ POME และสาหร่ายไฟจากการทดลองที่ช่วงร้อยละ 90-40 ของ POME พบว่าเกิดปฏิสัมพันธ์เชิงบวก (Synergism) จากตารางที่ 4.4 ในระบบโดยผลผลิตไฮโดรเจนที่ได้จากการหมักร่วมกันให้ผลผลิตที่สูงกว่าการหมักแบบการหมักด้วยซับสเตรตที่เป็น POME หรือสาหร่ายพุงชะโดเพียงอย่างเดียว ในทางตรงกันข้ามผลจากการหมักร่วมกันบางอัตราส่วนของสารตั้งต้นผสมให้ผลผลิตน้อยกว่าแบบการหมักสารตั้งต้นเพียงอย่างเดียวคือให้ผลในทางลบ (Antagonism) ที่อัตราส่วนของการหมักร่วมกันที่ร้อยละ 30-10 ของ POME ให้ผลในทางตรงกันข้าม โดยผลผลิตไฮโดรเจนที่ได้จะน้อยกว่าผลผลิตไฮโดรเจนที่ควรได้จากการหมักร่วมกันของ POME และสาหร่ายพุงชะโดที่อัตราส่วนนี้ โดยผลผลิตไฮโดรเจนที่ควรจะได้คิดได้จากการรวมกันของผลผลิตไฮโดรเจนที่เกิดจากการหมักเพียงอย่างเดียวของ POME และสาหร่ายพุงชะโด ตามอัตราส่วนนั้น ๆ

ผลิตไฮโดรเจนและมีเทนจากกระบวนการย่อยสลายร่วมแบบไร้อากาศสองขั้นตอนของ POME และสาหร่ายพุงชะโดที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวข้างต้นแล้ว ถึงแม้ว่าพลังงานรวมที่ผลิตได้จากการย่อยสลายร่วมระหว่าง POME และสาหร่ายพุงชะโดไม่ได้สูงกว่าการย่อยสลาย POME เพียงอย่างเดียว แต่การย่อยสลายร่วมกับมีแนวโน้มที่สามารถผลิตไฮโดรเจนได้สูงกว่า การย่อยสลาย POME อย่างเดียว ซึ่งถ้าพิจารณาในรูปของคุณภาพพลังงานจะได้พลังงานที่มีคุณภาพดีกว่า (ไบโอไฮเทนมีสัดส่วนของไฮโดรเจนมากกว่า) สาหร่ายพุงชะโดเป็นพรรณไม้ใต้น้ำที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ยากกว่าเมื่อเทียบกับ POME ดังนั้นการบำบัดขั้นต้น (Pretreatment) ของสาหร่ายพุงชะโดก่อนนำไปใช้เป็นซับสเตรตร่วมน่าจะเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายเพื่อเพิ่มผลิตไฮโดรเจนและมีเทน นอกจากนี้แล้ว ถ้าพิจารณาในแง่ของเสถียรภาพของปริมาณซับสเตรตที่ใช้ตลอดทั้งปี สาหร่ายพุงชะโดสามารถเจริญเติบโตได้ตลอดทั้งปี ในขณะที่ผลผลิตปาล์มอาจจะมีน้อยลงบางช่วงเวลา ส่งผลให้มี POME น้อยลง ก็จะสามารถใช้สาหร่ายพุงชะโดทดแทนในอัตราส่วนที่สูงขึ้นได้เพื่อให้ระบบถังปฏิกรณ์ดำเนินการได้เต็มกำลังการผลิตต่อเนื่องตลอดทั้งปี

ตารางที่ 4.4 ศักยภาพผลผลิตไฮโดรเจนและมีเทนจากกระบวนการย่อยสลายร่วมไร้อากาศสองขั้นตอนของ POME และสาหร่ายพุงชะโดที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ

POME: *C.demersum*	C/N Ratio	H_2 Stage		CH_4 stage		Total Energy
(VS Basis)	Substrate	Yield ml/g-VS	Energy kJ/g-VS	Yield ml/g-VS	Energy kJ/g-VS	kJ/g-VS
100:0	29.0	49.2	0.63	410.4	16.48	17.11
90:10	27.7	65.3	0.84	360.7	14.48	15.32
80:20	26.6	60.9	0.78	337.8	13.50	14.28
70:30	25.4	57.4	0.74	307.2	12.34	13.08
60:40	24.2	58.7	0.75	267.0	10.72	11.47
50:50	23.0	53.3	0.68	284.8	13.38	14.06
40:60	21.8	55.9	0.72	255.4	10.23	10.95
30:70	20.6	31.0	0.40	131.6	5.26	5.66
20:80	19.4	29.1	0.37	103.7	4.15	4.52
10:90	18.2	30.3	0.39	94.0	3.75	4.14
0:100	17.0	27.3	0.35	71.9	2.85	3.20

4.3 การผลิตแก๊สไฮโดรเจนแบบป้อนต่อเนื่องด้วย POME และสาหร่ายพุงชะโด

การหมักร่วมระหว่าง POME และสาหร่ายพุงชะโดเพื่อผลิตไฮโดรเจนแบบต่อเนื่องในถังปฏิกรณ์ CSTR ขนาด 10 L (ปริมาตรใช้งาน 7 L) โดยใช้กล้าเชื้อจากถังปฏิกรณ์ CSTR (ปริมาตรใช้งาน 1.35 L) ของการหมักร่วมระหว่าง POME และซีรัมน้ำยางสกิมเพื่อผลิตไฮโดรเจนที่สภาวะเทอร์โมฟิลิกและควบคุมระยะเวลากักเก็บน้ำ (HRT) 4.5 วัน จากงานวิจัยก่อนหน้านี้ ในงานวิจัยนี้ได้เตรียมระบบถังปฏิกรณ์ CSTR โดยใช้จากการหมักร่วมระหว่าง POME และสาหร่ายพุงชะโดที่สภาวะเทอร์โมฟิลิกควบคุมอุณหภูมิภายในถังปฏิกรณ์ที่ 55°C โดยใช้น้ำร้อนจาก Water Bath ไหลผ่านระบบ Jacket ของถังปฏิกรณ์ CSTR ผลผลิตไฮโดรเจนในแต่ละสภาวะปฏิบัติการ (ภาพที่ 4.5) ช่วงการเริ่มต้นระบบการหมักในถังปฏิกรณ์ (18 วันแรก) ได้ป้อน POME ผสมกับสารละลาย Basic Anaerobic (BA) ในอัตราส่วน 1:1 เพื่อส่งเสริมการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ผลิตไฮโดรเจน โดยควบคุมอัตราการไหลที่ HRT 7 วัน และมีการเติมสารละลาย $NaHCO_3$ ความเข้มข้น 5 $g/L_{substrate}$ เพื่อควบคุม pH ให้อยู่ในช่วง 5-6 ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของกลุ่มแบคทีเรียผลิตไฮโดรเจนในวันที่ 6 และ 7 เกิดไฮโดรเจนขึ้นอย่างรวดเร็วในอัตราการผลิตแก๊สไฮโดรเจนอยู่

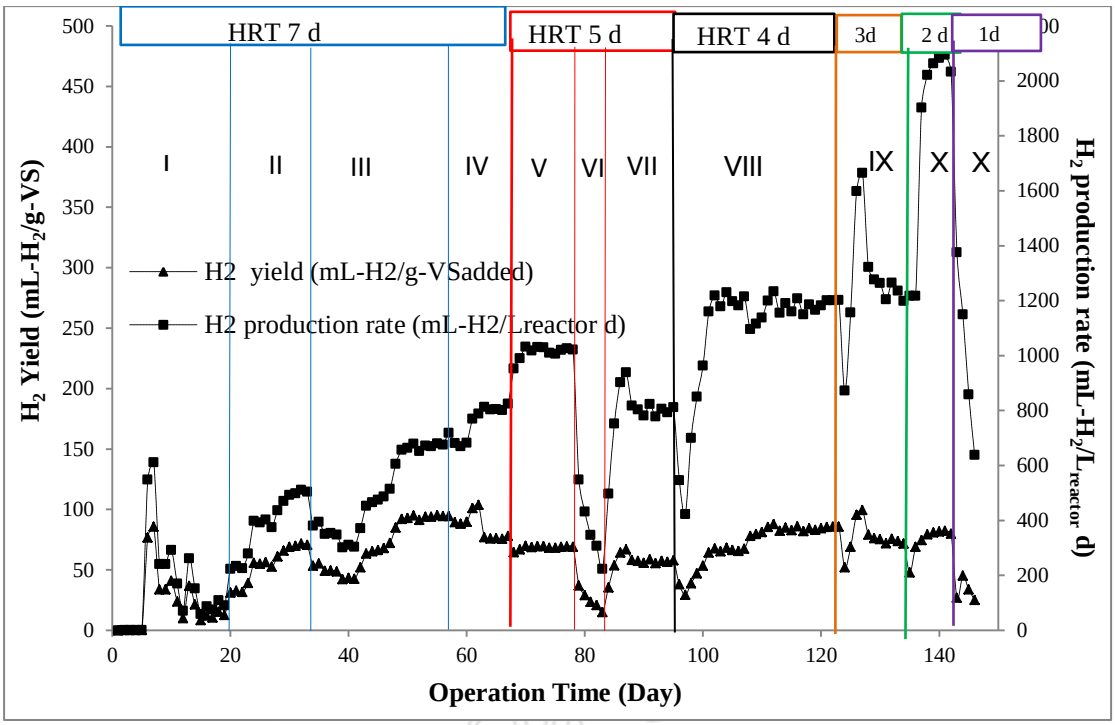
Prince of Songkla University Pattani Campus

ในช่วง 548-612 mL- $H_2/L_{reactor}$.d แต่เนื่องจาก pH ในระบบหรือน้ำหมักขาออกมีค่าค่อนข้างสูงเกินสภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญของกลุ่มแบคทีเรียผลิตไฮโดรเจน ส่งผลให้แบคทีเรียลดกิจกรรมการทำงานในวันที่ 8 เนื่องจาก pH ในระบบจะค่อนข้างสูงประมาณ 7 ส่งให้มีอัตราการผลิตไฮโดรเจนลดลงอย่างรวดเร็วเป็น 241 mL-$H_2/L_{reactor}$.d ดังนั้นในวันที่ 9 จึงทำการปรับ pH ในระบบโดยการป้อน POME ผสมกับสารละลาย BA โดยไม่ได้เติม $NaHCO_3$ เพื่อให้ pH ในระบบลดลง จากนั้นในช่วงวันที่ 10-18 ทำการเติม POME และสารละลาย BA โดยเติม $NaHCO_3$ (2.5 g/ $L_{substrate}$) ซึ่งพบว่า pH ในระบบเริ่มกลับเข้าสู่สภาวะที่เหมาะสมมากขึ้นแต่อย่างไรก็ตามอัตราการผลิตไฮโดรเจนลดลงถึง 51 mL-$H_2/L_{reactor}$.d ในวันที่ 15 หลังจากนั้นผลผลิตไฮโดรเจนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตั้งแต่วันที่ 15-18 จากนั้นเมื่อจุลินทรีย์ในระบบเกิดการปรับตัวและมีแนวโน้มที่สามารถเจริญเติบโตได้ดี จึงป้อนเฉพาะ POME โดยไม่ต้องผสมกับสารละลาย BA แต่ก็ยังผสมสารกับสารละลาย $NaHCO_3$ 2.5 g/ $L_{substrate}$ ในช่วงวันที่ 19-33 พบว่าจุลินทรีย์ภายในระบบเกิดความคุ้นชินสามารถเจริญเติบโตได้และมีอัตราการผลิตไฮโดรเจนคงที่ในช่วงวันที่ 28-33 โดยมีผลผลิตได้ไฮโดรเจนอยู่ในช่วง 61-72 mL-H_2/g-VS_{added} และอัตราการผลิตไฮโดรเจนอยู่ในช่วง 436-511 mL-$H_2/L_{reactor}$.d

จากนั้นจึงเริ่มใช้สารละลายเถ้าปาล์ม (50 g/L) ปรับค่า pH ของซับสเตรตและเป็นตัวบัฟเฟอร์ที่นำมาใช้แทน $NaHCO_3$ ที่ต้องเติมเพื่อเป็นบัฟเฟอร์ภายในระบบการหมักในถังปฏิกรณ์ CSTR โดยผสมลงใน POME ที่ใช้เป็นซับสเตรตที่สภาวะ HRT 7 วัน (วันที่ 34-56) ผลผลิตไฮโดรเจนในระบบเริ่มคงที่ในช่วงวันที่ 48-56 ผลผลิตไฮโดรเจนอยู่ในช่วง 85-95mL-H_2/g-VS_{added} และอัตราการผลิตไฮโดรเจนอยู่ในช่วง 606-680 mL-$H_2/L_{reactor}$.d เมื่อระบบเริ่มคงตัวจึงเริ่มการหมักร่วมโดยเติมสาหร่ายพุงชะโดร้อยละ 5 (VS Basis) ของซับสเตรตรวมในช่วงวันที่ 57-67 ระบบการหมักเริ่มคงตัวในช่วงวันที่ 61-67 โดยได้ผลผลิตไฮโดรเจนอยู่ในช่วง 76-101 mL-H_2/g-VS_{added} และอัตราการผลิตไฮโดรเจนอยู่ในช่วง 769-824 mL-$H_2/L_{reactor}$.d เมื่อระบบคงตัวจึงทดสอบสมรรถนะของระบบหมักในถังปฏิกรณ์ที่อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ที่สูงขึ้น โดยปรับลด HRT ลงเป็น 5 วัน ที่ความเข้มข้นของสาหร่ายเท่าเดิมร้อยละ 5 (VS Basis) ในช่วงวันที่ 68-78 โดยได้ผลผลิตไฮโดรเจนอยู่ในช่วง 68-70 mL-H_2/g-VS_{added} และอัตราผลผลิตไฮโดรเจนอยู่ในช่วง 1,010-1,031 mL-$H_2/L_{reactor}$.d ที่สภาวะคงตัวในช่วงวันที่ 70-78 จากนั้นเปลี่ยนความเข้มข้นของสาหร่ายพุงชะโดเป็นร้อยละ 30 (VS Basis) ของซับสเตรตเพื่อเป็นการศึกษาความสามารถของจุลินทรีย์ในในการผลิตแก๊สไฮโดรเจนในช่วงวันที่ 79-83 โดยยังคงสภาวะ HRT 5 วัน พบว่าผลผลิตไฮโดรเจนลดลงอย่างรวดเร็วถึง 224 mL-$H_2/L_{reactor}$.d เนื่องจากอาจเกิดสภาวะอัตราบรรทุกสารอินทรีย์สูงเกินไปทำให้เชื้อจุลินทรีย์ในระบบไม่สามารถปรับตัวได้และถูกยับยั้งการทำงานจากความเข้มข้นของซับสเตรตที่ป้อนเข้าไปสังเกตได้จากภาพที่ 4.6 pH ในระบบยังคงเป็นปกติไม่มีความเป็นกรดเพิ่มขึ้นที่เกิดจากการสร้างของจุลินทย์เมื่อมีการย่อยสลายซับสเตรตที่ป้อนเข้าไป หรืออัตราส่วน C/N ของซับสเตรตร่วมไม่เหมาะสม ดังนั้นจึงปรับลดปริมาณของสาหร่ายพุงชะโดยเป็นร้อยละ 10 (VS Basis) ของซับสเตรตรวมโดยพบว่าปริมาณของแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตั้งแต่วันแรกของการลดสาหร่ายพุงชะโดและสูงสุดในวันที่ 87 ของการทดลองโดยหลังนั้นไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นลดลงมาในช่วงวันที่ 88 และเริ่มคงที่ในช่วงวันที่ 88-95 ของการทดลองโดยได้ผลผลิตไฮโดรเจนอยู่ในช่วง 55-59 mL-H_2/g-VS_{added} และอัตรา

การผลิตไฮโดรเจนอยู่ในช่วง 778-823 mL-H_2/$L_{reactor}$.d และผลผลิตไฮโดรเจนอยู่ในช่วง 57-67 mL-H_2/g-VS_{added} ซึ่งพบว่าน้อยกว่าที่ร้อยละ 5 ของสาหร่ายพุงชะโดที่ใช้หมักร่วม แต่อย่างไรก็ตามในการนี้เพื่อเป็นการหาปริมาณของสาหร่ายพุงชะโดที่สูงที่สุด สามารถทดแทนในยามขาดแคลน POME ได้ในปริมาณที่สูง และจากร้อยละของสาหร่ายที่ได้ศึกษาข้างต้นพบว่าที่ร้อยละ 10 มีความเหมาะสมในการนำมาศึกษาต่อไป

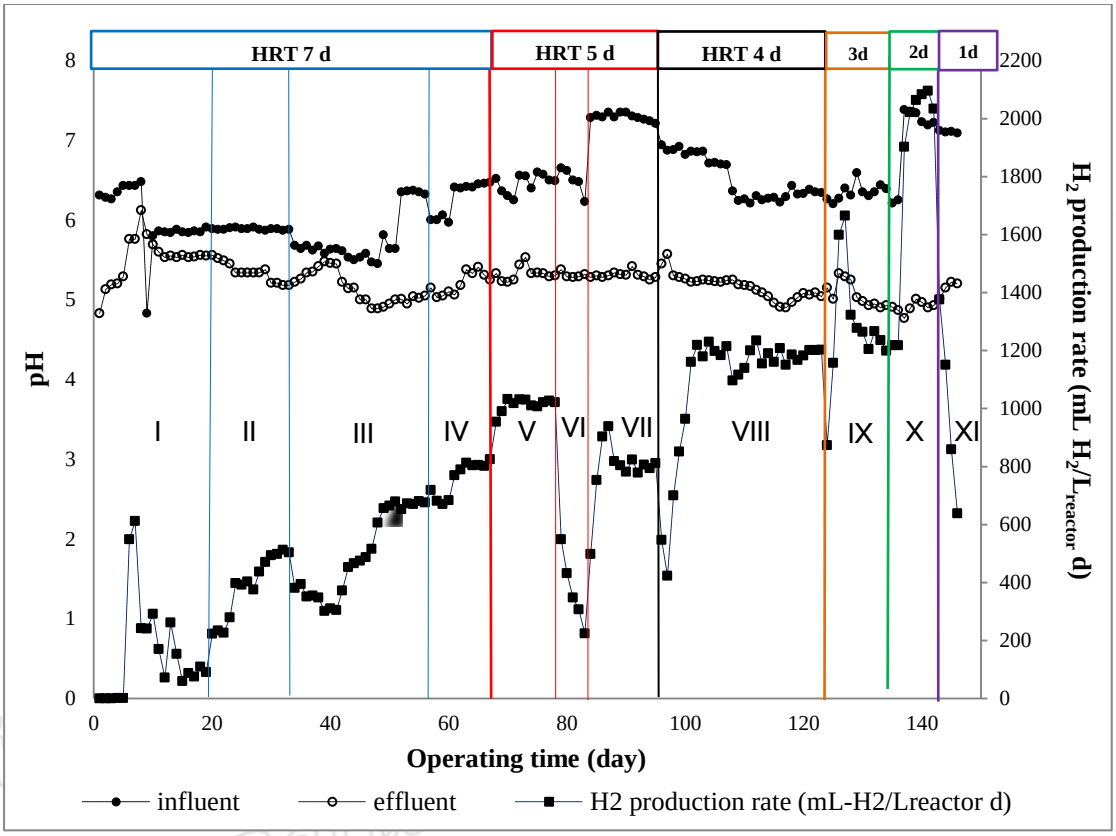
เมื่อระบบคงตัวได้ปรับลด HRT เป็น 4 วัน โดยคงความเข้มข้นของสาหร่ายร้อยละ 10 (VS Basis) ของซับสเตรตรวม ระบบเริ่มเข้าสู่สภาวะคงตัวในช่วงวันที่ 109-123 โดยได้ผลผลิตไฮโดรเจนอยู่ในช่วง 80-88 mL-H_2/g-VS_{added} และอัตราการผลิตไฮโดรเจนอยู่ในช่วง 1,116-1,234 mL-H_2/$L_{reactor}$.d ซึ่งให้ผลผลิตไฮโดรเจนซึ่งถือว่ามีแนวโน้มในการผลิตไฮโดรเจได้สูงขึ้นจาก HRT ก่อนหน้าที่ได้ถูกทำการทดลอง ดังนั้นเมื่อระบบเริ่มคงที่ทำการปรับลด HRT ที่ 3 วัน โดยหมักในช่วงวันที่ 126-136 โดยในช่วงแรกของการทดลองพบว่าจุลินทรีย์ในระบบมีการปรับตัวเนื่องจาก OLR ที่สูงขึ้นส่งผลให้การผลิตไฮโดรเจนลดลงในวันแรกและเมื่อปรับตัวให้เข้ากับสภาวะได้ทำให้สามารถผลิตแก๊สโดยแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งสูงสุดในวันที่ 129 และหลังจากนั้นผลผลิตไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นลดลงอย่างรวดเร็วและคงที่ในวันที่ 128-134 โดยได้ผลผลิตไฮโดรเจนอยู่ในช่วง 72-79 mL-H_2/g-VS_{added} และอัตราการผลิตไฮโดรเจนอยู่ในช่วง 1,199-1,322 mL-H_2/$L_{reactor}$.d ซึ่งจากการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการย่อยสลายของจุลินทรีย์แต่เมื่อถึงสภาวะหนึ่งที่มีการย่อยสลายได้มากก็จะให้ผลผลิตพวกกรดในระบบเพิ่มขึ้นดังจะเห็นในภาพที่ 4.6 ว่า pH ในระบบลดลงซึ่งอาจทำให้จุลินทรีย์มีประสิทธิภาพในการทำงานลดลงจึงเป็นสาเหตุทำให้ปริมาณของแก๊สที่เกิดมาด้วยจากนั้นทำการปรับลด HRT ที่ 2 วันโดยได้ทำการปรับ pH เริ่มต้นของระบบให้สูงขึ้นด้วยเถ้าด่าง เพื่อเป็นการเพิ่มบัฟเฟอร์ในระบบให้ระบบสามารถรองรับความเป็นกรดที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์ผลิตไฮโดรเจน ซึ่งจากการทดลองนี้พบว่าในวันแรกผลผลิตแก๊สไฮโดรเจนลดลงอย่างมากแต่หลังจากนั้นก็เพิ่มปริมาณขึ้นเนื่องจากเชื้อจุลินทรีย์สามารถปรับตัวกับสารอินทรีย์ที่เพิ่มสูงขึ้นถึง 25.48 g-VS/$L_{reactor}$.d ได้และเริ่มคงที่ในวันที่ 138-142 โดยได้ผลผลิตไฮโดรเจนอยู่ในช่วง 79-82 mL-H_2/g-VS_{added} และจะเห็นว่ามีการเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนโดยเฉพาะอัตราผลผลิตแก๊สไฮโดรเจนที่สูง อยู่ในช่วง 2,022-2,095 mL-H_2/$L_{reactor}$.d ถึงแม้ว่า pH ระบบจะค่อนข้างต่ำและ OLR ที่สูงแต่การเติมเถ้าด่างก็สามารถเป็นบัฟเฟอร์ให้ระบบได้ดี ทำให้สามารถรองรับความเป็นกรดที่เกิดขึ้นภายในระบบ และรักษาสภาวะให้ pH คงที่ได้ แต่เมื่อทำการปรับลด HRT 1 วัน โดยยังคง pH เริ่มต้นให้สูงพบว่ามีการลดลดของปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและ pH ในระบบเพิ่มสูงขึ้น สันนิฐานได้ว่าระบบอาจเกิดการ Wash out ของจุลินทรีย์ในระบบออกไปเนื่อง pH ที่เพิ่มขึ้นแสดงถึง pH ที่เกิดจากซับสเตรตที่ป้อนเข้าสู้ระบบและถูกย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ผลิตกรดได้ไม่มากทำให้ได้ผลผลิตแก๊สไฮโดรเจนน้อยตามและหากยังคงดำเนินการเช่นนี้ต่อไปจุลินทรีย์ในระบบอาจลดลงสภาวะที่ HRT 1 วัน จึงไม่เหมาะสมต่อการหมักเพื่อผลิตแก๊สไฮโดรเจนต่อไป



ภาพที่ 4.5 ผลผลิตไฮโดรเจนจากการหมักร่วมระหว่าง POME และสาหร่ายพุงชะโดด้วยถังปฏิกรณ์ CSTR ที่สภาวะ HRT 7 วัน **(I)** ป้อน POME ผสมสารละลาย BA และสารละลาย $NaHCO_3$ 2.5-5 g/L, **(II)** ป้อน POME ผสมสารละลาย $NaHCO_3$ 2.5 g/L, **(III)** ป้อน POME ผสมสารละลายเถ้าปาล์ม 50 g/L, **(IV)** ป้อน POME ผสมสาหร่ายพุงชะโดร้อยละ 5 (VS Basis) สารละลายเถ้าปาล์ม 50 g/L, ที่สภาวะ HRT 5 วัน **(V)** ป้อน POME ผสมสาหร่ายพุงชะโดร้อยละ 5 (VS Basis) และสารละลายเถ้าปาล์ม 50 g/L, **(VI)** ป้อน POME ผสมสาหร่ายพุงชะโดร้อยละ 30 (VS Basis) และสารละลายเถ้าปาล์ม 50g/L **(VII)** ป้อน POME ผสมสาหร่ายพุงชะโดร้อยละ 10 (VS Basis) และสารละลายเถ้าปาล์ม 60 g/L, ที่สภาวะ HRT 4 วัน **(VIII)** ป้อน POME ผสมสาหร่ายพุงชะโดร้อยละ 10 (VS Basis) และสารละลายเถ้าปาล์ม 50 g/L , ที่สภาวะ HRT 3 วัน **(IX)** ป้อน POME ผสมสาหร่ายพุงชะโดร้อยละ 10 (VS Basis) และสารละลายเถ้าปาล์ม 50 g/L , ที่สภาวะ HRT 2 วัน **(X)** ป้อน POME ผสมสาหร่ายพุงชะโดร้อยละ 10 (VS Basis) และสารละลายเถ้าปาล์ม 70 g/L และที่สภาวะ HRT 1 วัน **(XI)** ป้อน POME ผสมสาหร่ายพุงชะโดร้อยละ 10 (VS Basis) และสารละลายเถ้าปาล์ม 70 g/L

จากผลการทดลอง HRT ที่มีความเป็นไปได้และเหมาะสมต่อการผลิตแก๊สไฮโดรเจนด้วยกระบวนการหมักร่วมระหว่าง POME และสาหร่ายพุงชะโด ในการทดลองนี้คือ HRT 2 วัน โดยการเติมอัตราส่วนของสาหร่าย ด้วยปริมาณของสาหร่ายพุงชะโดที่ใช้ร้อยละ 10 (VS Basis) ซึ่งจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องคำนึงถึงอย่างมากคือความเป็น Alkalinity ในระบบ เพราะยิ่งมี OLR ที่สูงหากจุลินทรีย์ผลิตกรดสามารถย่อยสลายได้ดีก็จะเกิดกรดในปริมาณที่มากและหากในระบบมีความเป็นบัฟเฟอร์ไม่มากพออาจมีผลกระทบต่อการเจริญของจุลินทรีย์ในระบบซึ่งเป็นตัวการหลักในการผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้ ดังจะเห็นได้จาก HRT 3 วัน ที่มีปริมาณความเป็นกรดที่สูงขึ้นและระบบบัฟเฟอร์ที่ไม่สามารถเพียงพอที่จะรองรับสภาวะกรดที่เกิดขึ้นมีผลทำให้ปริมาณของแก๊สไฮโดรเจนที่ผลิตลดลง

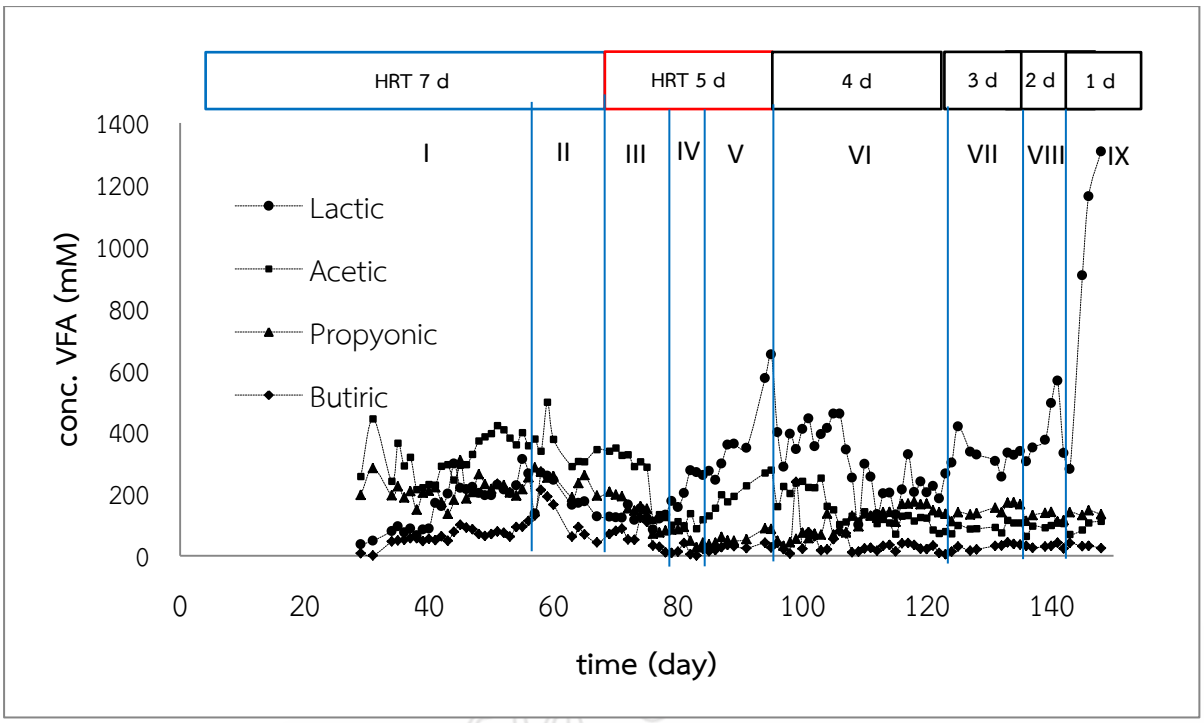
ดังนั้นปัจจัยต่าง ๆ ที่สำคัญที่มีผลต่อผลผลิตไฮโดรเจน หลัก ๆ ในการดำเนินการที่สภาวะนี้ คือ pH ความเป็น Alkalinity ของระบบและปริมาณสารอินทรีย์ในซับสเตรต ที่มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในกลุ่มที่ผลิตไฮโดรเจน



ภาพที่ 4.6 อัตราผลผลิตไฮโดรเจนและ pH ขาเข้า และขาออก จากการหมักร่วมระหว่าง POME และสาหร่ายพุงชะโดด้วยถังปฏิกรณ์ CSTR ที่สภาวะHRT 7 วัน **(I)** ป้อน POME ผสมสารละลาย BA และสารละลาย $NaHCO_3$ 2.5-5 g/L, **(II)** ป้อน POME ผสมสารละลาย $NaHCO_3$ 2.5 g/L, **(III)** ป้อน POME ผสมสารละลายเถ้าปาล์ม 50 g/L, **(IV)** ป้อน POME ผสมสาหร่ายพุงชะโดร้อยละ 5 (VS Basis) สารละลายเถ้าปาล์ม 50 g/L, ที่สภาวะ HRT 5 วัน **(V)** ป้อน POME ผสมสาหร่ายพุงชะโดร้อยละ5 (VS Basis) และสารละลายเถ้าปาล์ม 50 g/L, **(VI)** ป้อน POME ผสมสาหร่ายพุงชะโดร้อยละ 30 (VS Basis) และสารละลายเถ้าปาล์ม 50g/L, **(VII)** ป้อน POME ผสมสาหร่ายพุงชะโดร้อยละ 10 (VS Basis) และสารละลายเถ้าปาล์ม 60 g/L, ที่สภาวะ HRT 4 วัน **(VIII)** ป้อน POME ผสมสาหร่ายพุงชะโดร้อยละ 10 (VS Basis) และสารละลายเถ้าปาล์ม 50 g/L , ที่สภาวะ HRT 3 วัน **(IX)** ป้อน POME ผสมสาหร่ายพุงชะโดร้อยละ 10 (VS Basis) และสารละลายเถ้าปาล์ม 50 g/L , ที่สภาวะ HRT 2 วัน **(X)** ป้อน POME ผสมสาหร่ายพุงชะโดร้อยละ 10 (VS Basis) และสารละลายเถ้าปาล์ม 70 g/L และที่สภาวะ HRT 1 วัน **(XI)** ป้อน POME ผสมสาหร่ายพุงชะโดร้อยละ 10 (VS Basis) และสารละลายเถ้าปาล์ม 70 g/L

ในระบบการหมักเพื่อผลิตไฮโดรเจนนั้นสารละลายบัฟเฟอร์มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งในการรักษาระดับ pH ให้เหมาะสม โดยทั่วไปแล้วการหมักในห้องปฏิบัติการนั้น มีการใช้สารละลาย $NaHCO_3$ ซึ่งมีผลต่อต้นทุนการผลิตในระดับอุตสาหกรรมได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้พบว่าสามารถใช้สารละลายเถ้าปาล์มซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากในอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มสามารถนำมาใช้ทดแทนสารละลาย $NaHCO_3$ และสามารถช่วยรักษาระดับ pH ให้อยู่ในช่วงที่แบคทีเรียผลิตไฮโดรเจนสามารถเจริญได้และให้ผลผลิตไฮโดรเจนในระดับที่น่าพอใจ งานวิจัยก่อนหน้านี้โดย Saritpongteeraka and Chaiprapat (2008) ใช้เถ้าไม้ยางสำหรับการปรับสภาพน้ำเสียโรงงานน้ำยางข้นสำหรับการผลิตแก๊สชีวภาพในถังปฏิกรณ์ชนิด Anaerobic Bafle Reactor ซึ่งได้ผลผลิตแก๊สชีวภาพในระดับดี (0.29-0.30 L-CH_4 /g-$COD_{removed}$)

ผลการวิเคราะห์กรดไขมันระเหยได้และกรดอินทรีย์ด้วยเครื่อง HPLC ลักษณะของการเกิดกรดจะเห็นว่ามีความสอดคล้องกับการเกิดผลผลิตไฮโดรเจน โดยเฉพาะการเกิดกรดอะซิติกยิ่งมีการผลิตหรือการเกิดกรดอะซิติกในปริมาณมาก การเกิดผลผลิตไฮโดรเจนก็จะได้มากขึ้น ถึงแม้ว่าปริมาณของไฮโดรเจนจะเกิดขึ้นมากกว่าหากมีการผลิตกรดบิวทิริก แต่ในกระบวนการผลิตของจุลินทรีย์กลุ่มผลิตกรด มักจะผลิตในรูปของกรดอะซิติกมากกว่ากรดบิวทิริกดังแสดงในภาพที่ 4.7 ที่มีการศึกษาปริมาณความเข้มข้นของกรดที่เกิดขึ้นในระบบของถังหมัก CSTR ที่ HRT 7, 5, 4, 3, 2 และ 1 วัน ซึ่งจากการวิเคราะห์กรดไขมันที่ระเหยง่ายพบว่าที่ HRT 7 วันเกิดการผลิตกรดอะซิติกสูงสุด (200-300 mM) ตามด้วยกรดโพรพิโอนิก (135-260 mM) กรดแลคติก (110-200 mM) และกรดบิวทิริก (50-100 mM) ซึ่งแสดงถึงแนวโน้มที่ดีในการเกิดผลผลิตไฮโดรเจนที่สูง แต่หลังจาก HRT 7 วัน พบปริมาณของกรดแลคติกที่สูงที่สุด และมีปริมาณที่สูงขึ้นอย่างมากเมื่อเข้าสู่ HRT 1 วัน แต่ pH ของระบบยังอยู่ในสภาวะที่เหมาะสมแม้ว่าจะต่ำถึง pH 5.2 แต่ก็ยังอยู่ในสภาวะที่จุลินทรีย์ผลิตกรดยังคงสามารถเจริญได้ ดังนั้นอีกสาเหตุของปริมาณกรดแลคติกที่สูงมาจากองค์ประกอบของซับสเตรต POME ซึ่งจากผลการวิเคราะห์พบมีปริมาณกรดแลคติกสูงถึง 2,397 mM ซึ่งอาจเป็นสาเหตุเมื่อ HRT ต่ำลงปริมาณของซับสเตรตที่ป้อนเข้าสู่ระบบมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการสะสมของกรดไขมันระเหยได้และหรือกรดอินทรีย์ ในกรณีที่เกิดการผลิตกรดอะซิติกเพียงอย่างเดียวจะให้ผลผลิตของแก๊สไฮโดรเจนในทางทฤษฎีคือ 498 mL-H_2/g-Sugar (STP) ส่วนในกรณีที่เกิดการผลิตกรดบิวทิริกเพียงอย่างเดียวจะให้ผลผลิตของแก๊สไฮโดรเจนในทางทฤษฎีคือ 249 mL-H_2/g-Sugar (STP) ในขณะที่การผลิตกรดชนิดอื่น ๆ พบว่าไม่เกิดการผลิตแก๊สไฮโดรเจนและอาจมีการใช้ไฮโดรเจนร่วมเพื่อผลิตด้วยในกรณีของการเกิดกรดโพรพิโอนิก (Angenent *et al*., 2004) ดังนั้นผลผลิตไฮโดรเจนจึงขึ้นกับการผลิตอินทรีย์ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาการหมักแบบต่อเนื่อง การเกิดกรดหลากหลายชนิดส่งผลให้ผลผลิตไฮโดรเจนมีการเปลี่ยนแปลงได้โดยขึ้นอยู่สภาวะการปฏิบัติการและสิ่งแวดล้อม

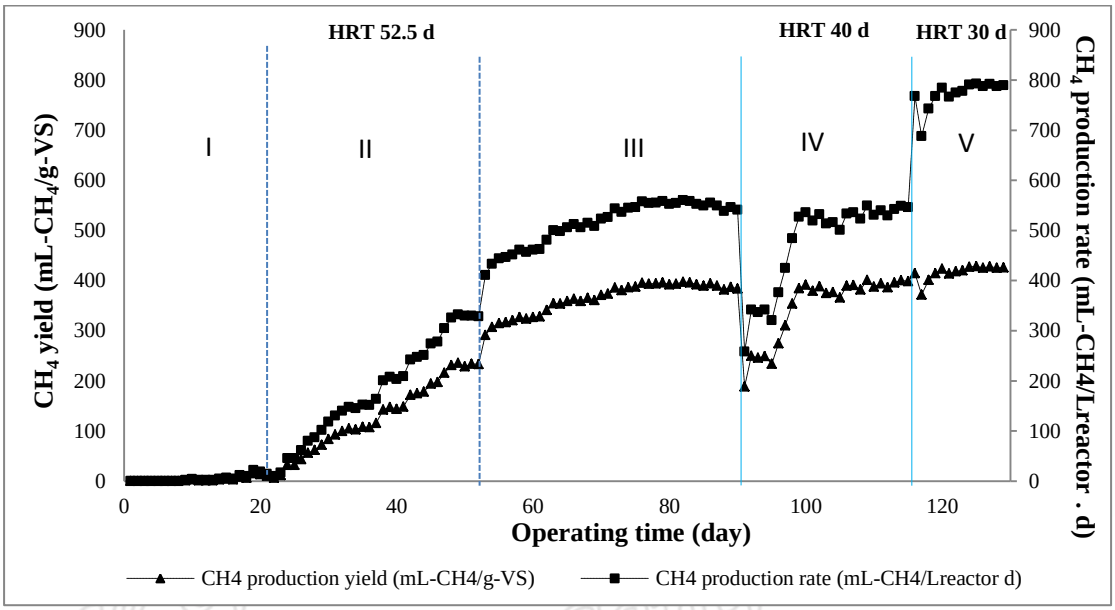


ภาพที่ 4.7 กรดอินทรีย์จากการหมักร่วมระหว่าง POME และสาหร่ายพุงชะโดด้วยถังปฏิกรณ์ CSTR ที่สภาวะ **(I)** เริ่มต้นป้อน POME สารละลาย $NaHCO_3$ 2.5 g/L และ ป้อน POME ที่ HRT 7 วัน, **(II)** ป้อน POME ผสมสาหร่ายพุงชะโดร้อยละ 5 (VS Basis) ที่ HRT 7 วัน, **(III, IV, V)** ป้อน POME ผสมสาหร่ายพุงชะโดร้อยละ 5, 30 และ 10 (VS Basis) ตามลำดับ ที่ HRT 5 วัน และ **(VI, VII, VIII, IX)** ป้อน POME ผสมสาหร่ายพุงชะโดร้อยละ 10 (VS Basis) ที่ HRT 4, 3, 2, และ 1 วัน ตามลำดับ

4.4 การผลิตแก๊สมีเทนแบบป้อนต่อเนื่องด้วยน้ำทิ้งจากขั้นตอนผลิตไฮโดรเจน

การผลิตมีเทนจากน้ำหมักจากกระบวนการผลิตแก๊สไฮโดรเจนแบบต่อเนื่องในถังปฏิกรณ์ PFR ขนาด 43.0 L (ปริมาตรใช้งาน 29.0 L) ซึ่งเป็นขั้นตอนที่สองของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศสองขั้นตอน ที่สภาวะเมโซฟิลิกที่อุณหภูมิห้อง การทดลองครั้งนี้ทำการผลิตมีเทนโดยควบคุมระยะเวลากักเก็บน้ำ (HRT) 52.5 วัน ช่วงเริ่มต้นระบบเติมกล้าเชื้อเทียบเป็นร้อยละ 75 ของปริมาตรใช้งานทั้งหมดและเติมน้ำหมักจากขั้นตอนการผลิตไฮโดรเจนจากการหมักร่วม POME และสาหร่ายพุงชะโดที่สภาวะ HRT 7 วัน ให้ได้ปริมาตรใช้งานหลังจากนั้นไม่ทำการป้อนซับสเตรตเข้าสู่ระบบเพื่อปล่อยให้กลุ่มจุลินทรีย์ปรับตัวให้เข้ากับสภาวะแวดล้อมใหม่ (22 วันแรก) พบว่า 7 วันหลังของการทดลอง จากภาพที่ 4.8 กลุ่มเชื้อจุลินทรีย์เริ่มผลิตแก๊สถึงแม้ว่าร้อยละความเข้มข้นช่วงเริ่มต้นของมีเทนจะยังคงมีน้อยดังแสดงในภาพที่ 4.10 แต่ก็มีแนวโน้มค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนกระทั่งคงที่ตั้งแต่วันที่ 18 และมี pH ของน้ำหมักเริ่มสูงและขึ้นเข้าสู่สภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในกลุ่มนี้ (7.4-7.9) ดังภาพที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง pH และผลผลิตของแก๊สที่เกิดขึ้น ซึ่งเป็นสภาวะ pH ที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของกลุ่มจุลินทรีย์ผลิตมีเทน (Kongjan *et al*., 2011) จากนั้นจึงเริ่มดำเนินการเติมน้ำหมักจากขั้นตอนการผลิตไฮโดรเจนที่ HRT 7 วัน ที่อัตราการไหลเทียบเท่า HRT 52.5 วัน พบว่าปริมาณแก๊สมีเทนที่เกิดขึ้นนั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ในช่วงวันที่

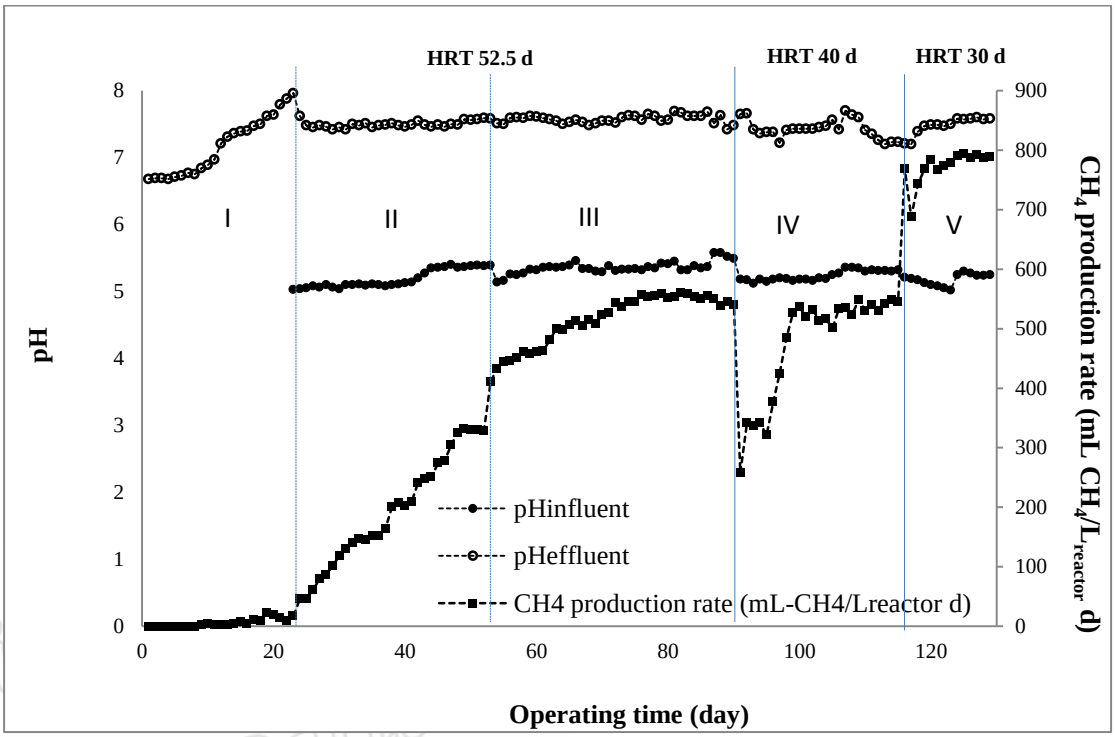
23-47 และผลผลิตมีเทนเริ่มคงที่ในช่วงวันที่ 48-52 โดยมีผลผลิตมีเทนอยู่ในช่วง 216-236 mL-CH_4/g-VS_{added} และอัตราการผลิตมีเทนอยู่ในช่วง 326-332 mL-CH_4/L.d จากนั้นจึงป้อนน้ำหมักจากการผลิตไฮโดรเจนที่ HRT 5 วัน ปริมาณแก๊สมีเทนที่เกิดขึ้นนั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงวันที่ 53-75 ของการทดลองพบว่าผลผลิตมีเทนเริ่มคงที่ในช่วงวันที่ 70-90 วัน โดยมีผลผลิตมีเทนอยู่ในช่วง 371-398 mL-CH_4/g-VS_{added} และอัตราการผลิตมีเทนอยู่ในช่วง 523-558 mL-CH_4/L.d



ภาพที่ 4.8 ผลผลิตมีเทนด้วยถังปฏิกรณ์ PFR ที่สภาวะ **(I)** ปรับสภาพกล้าเชื้อเริ่มต้นระบบ, ควบคุม HRT ของถัง PFR 52.5 วัน **(II, III)** ป้อนน้ำหมักขั้นตอนผลิตไฮโดรเจนจากการหมักร่วมกันระหว่าง POME และสาหร่ายพุงชะโดในถัง CSTR -HRT 7 และ 5 วัน ตามลำดับ, **(IV)** ควบคุม HRT ของถัง PFR 40 วัน และ **(IV)** ควบคุม HRT ของถัง PFR 30 วัน

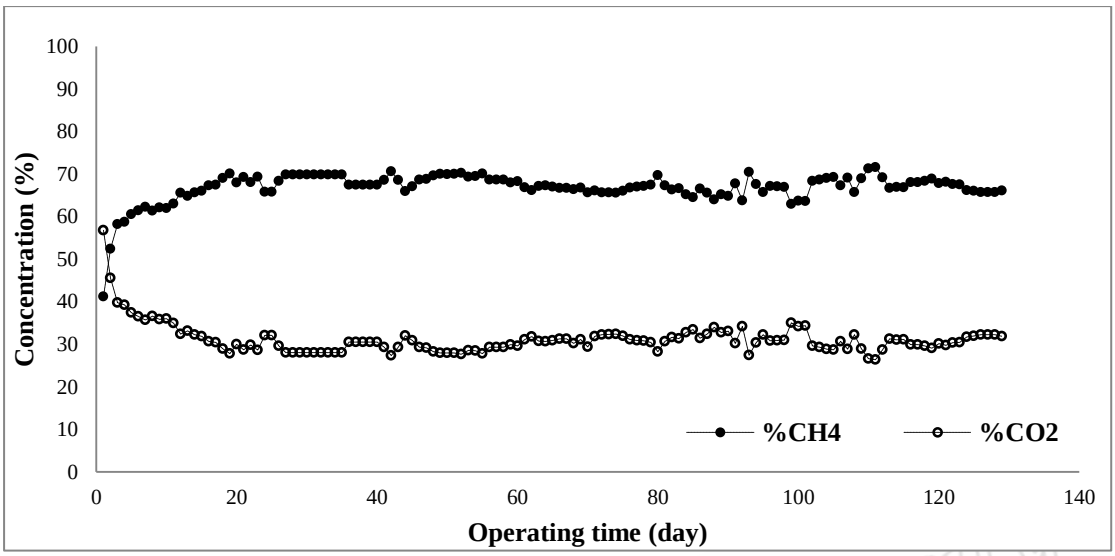
เมื่อทำการทดลองจนกระทั่งเสร็จสิ้น HRT ที่ 52.5 วัน พบว่าระบบมีการผลิตแก๊สที่ลดลงและหยุดการบันทึกผลและตรวจหาสาเหตุ คาดว่ามาจากการรั่วออกของแก๊ส แต่อย่างไรก็ตามหลังจากปิดรอยทั้งหมดที่คาดว่ารั่วก็ยังคงผลผลิตแก๊สน้อยอยู่เช่นเดิม จึงคาดว่าระบบมีปริมาณของตะกอนที่ค่อนข้างสูงจากการสะสมของตะกอนเซลล์จุลินทรีย์และสารอินทรีย์ต่าง ๆ จึงอาจเป็นตัวการหลักทำให้พื้นที่สำหรับการเจริญของจุลินทรีย์ลดลง ดังนั้นจึงถ่ายตะกอนของระบบออกปริมาณร้อยละ 25 ของปริมาตรการทำงาน และเติมน้ำหมักจากขั้นตอนการผลิตไฮโดรเจนที่ถูกดำเนินการ HRT 5 วัน เข้าสู่ระบบพบว่าเริ่มมีการผลิตแก๊สเกิดขึ้นรอจนกระทั่งปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นลดลง และเริ่มดำเนินการทดลองต่อที่ระยะเวลาการกักเก็บ HRT 40 วัน โดยใช้น้ำหมักจากการผลิตไฮโดรเจนที่ HRT 4 วัน โดยเริ่มทำการทดลองต่อเนื่องในวันที่ 91 พบว่าปริมาณของแก๊สมีเทนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งเริ่มคงที่ตั้งแต่วันที่ 99-115 ของการทดลองโดยผลผลิตมีเทนที่ได้อยู่ในช่วง 366-401 mL-CH_4/g-VS_{added} และอัตราผลผลิตที่ได้ 501-549 mL-CH_4/L.d จะเห็นได้ว่าปริมาณที่เพิ่มขึ้นของแก๊สมีเทนไม่มากและอัตราผลผลิตที่ไม่แตกต่างกันกับ HRT ก่อนหน้าเนื่องมาจากปริมาณของของแข็งที่ระเหยได้ของซับสเตรตรวมน้อยลงจากเดิมทำให้สารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบนั้นใกล้เคียงกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.5

ทำให้ผลผลิตของแก๊สที่เกิดขึ้นใกล้เคียงกันกับ HRT 52.5 วัน ดังนั้นจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสามารถเพิ่ม OLR เพื่อผลผลิตมีเทนที่เพิ่มขึ้นได้ จึงดำเนินการปรับลด HRT ลงที่ 30 วัน จะเห็นได้อย่างชัดเจนเมื่อปริมาณสารที่บรรทุกเพิ่มขึ้น ผลผลิตมีเทนและอัตราการผลิตที่สูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดและเริ่มคงที่ในวันที่ 120-129 ของการทดลอง 52 โดยมีผลผลิตมีเทนอยู่ในช่วง 414-428 mL-CH_4/g-VS_{added} และอัตราการผลิตมีเทนอยู่ในช่วง 767-793 mL-CH_4/L.d



ภาพที่ 4.9 อัตราผลผลิตมีเทน pH ขาเข้าและขาออก ด้วยถังปฏิกรณ์ PFR ที่สภาวะ **(I)** ปรับสภาพกล้าเชื้อเริ่มต้นระบบ, ควบคุม HRT ของถัง PFR 52.5 วัน, **(II, III)** ป้อนน้ำหมักขั้นตอนผลิตไฮโดรเจนจากการหมักร่วมกันระหว่าง POME และสาหร่ายพุงชะโดในถัง CSTR จาก HRT 7, 3 วันตามลำดับ, **(IV)** ควบคุม HRT ของถัง PFR 40 วัน และ **(IV)** ควบคุม HRT ของถัง PFR 30 วัน

การดำเนินการทดลองการหมักเพื่อผลิตมีเทนพบว่าความเข้มข้นของมีเทนที่ได้จากการศึกษาจากการหมักร่วมในช่วงตั้งแต่วันที่ 20 ของการทดลองจนกระทั่งการดำเนินการที่ HRT 30 วัน พบว่าความเข้มข้นของมีเทนจะอยู่ในช่วงร้อยละ 64-70 ของมีเทน และผลผลิตมีเทนที่เกิดขึ้นที่ HRT 30 วัน มีการเกิดผลผลิตมีเทนที่สูงขึ้นจาก HRT 40 วัน โดยมีผลผลิตมีเทนเฉลี่ย 391±6.6 เมื่อลดเป็น 30 วัน ปริมาณของมีเทนเฉลี่ยที่เกิดเพิ่มขึ้นถึง 424±4.6 mL-CH_4/g-VS (344.4±4.6 mL-CH_4/g-COD) ที่อุณหภูมิห้อง โดยค่าทฤษฎีของผลผลิตมีเทน 350 mL-CH_4/g-COD ที่ STP อย่างไรก็ตามการผลิตยังคงมีแนวโนมเพิ่มขึ้น และ pH ในระบบก็ยังคงอยู่ในสภาวะที่เหมาะสมที่สามารถดำเนินการหมักที่อัตราการบรรจุสารอินทรีย์สูงขึ้นได้จึงมีความเป็นไปได้ในการปรับลด HRT ที่ลดลงต่อไป



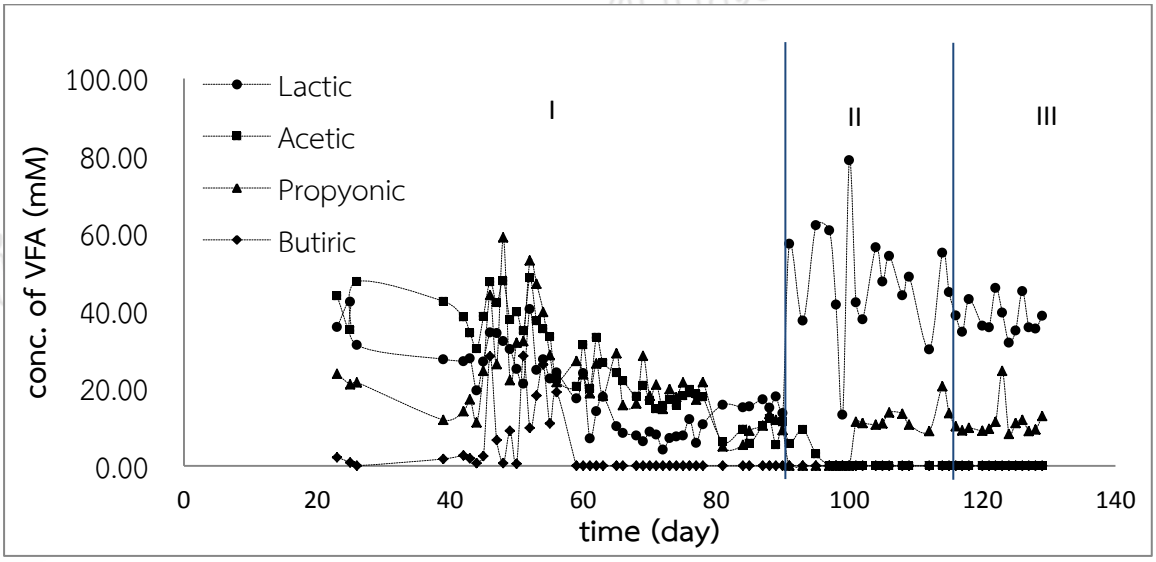
ภาพที่ 4.10 ความเข้มข้นของแก๊สมีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์จากการหมักด้วยถังปฏิกรณ์ PFR ที่อุณหภูมิห้อง จากน้ำหมักขาออกของการผลิตไฮโดรเจนจากการหมักร่วมระหว่าง POME กับสาหร่ายพุงชะโด

ในขณะที่ผลการวิเคราะห์กรดอินทรีย์ (ภาพที่ 4.11) ตั้งแต่วันที่ 23 ซึ่งเป็นช่วงที่ระบบในถังปฏิกรณ์ PFR เริ่มมีการดำเนินการที่ HRT 52.5 วัน มีปริมาณกรดสูงในวันแรกของการวิเคราะห์ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการนำไปใช้ของจุลินทรีย์ที่ไม่มากพอและเมื่อระยะเวลาในการหมักนานขึ้นปริมาณของกรดที่ตรวจพบลดลงแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการนำไปใช้ในกระบวนการย่อยสลายได้ และเมื่อการทดลองดำเนินไปจนเข้าสู่สภาวะคงตัวในช่วงวันที่ 70-90 ของการทดลองที่ HRT 52.5 วัน พบว่าน้ำหมักยังมีความเข้มข้นของกรดอะซิติก (14-20 mM) กรดโพรพิโอนิก (15-20 mM) และกรดแลคติก (6-10 mM) ในขณะที่กรดบิวทิริกไม่ถูกตรวจพบ ค่าความเข้มของกรดอินทรีย์มีค่าต่ำกว่าความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ที่ตรวจพบในน้ำหมักจากขั้นตอนที่หนึ่งค่อนข้างมากเป็นการยืนยันได้ว่าในถังปฏิกรณ์ที่สองมีการย่อยสลายของกรดอินทรีย์ที่ผลิตได้จากขั้นตอนการหมักเพื่อผลิตไฮโดรเจน ซึ่งสอดคล้องกับผลผลิตมีเทนที่ดีของ HRT 52.5 วัน (389±7.2 mL-CH_4/g-VS) แต่หลังจากการหมักที่ HRT 52.5 วันระบบเกิดการร่วและมีปัญหาของปริมาณตะกอนอินทรีย์ที่สูงขึ้นในระบบจึงทำการซ่อมและปล่อยตะกอนทิ้งไปและเริ่มการเดินระบบใหม่ด้วยการป้อนน้ำเสียขาออกจากขั้นตอนการผลิตกรดที่ถูกเติมแทนที่ปริมาณตะกอนที่ปล่อยทิ้งไป 25 ของปริมาตรการทำงาน จากนั้นได้ดำเนินการต่อที่ HRT 40 และ 30 วัน

กระบวนการย่อยสลายไร้อากาศขั้นที่สอง จุลินทรีย์กลุ่มผลิตมีเทน (Methanogens) สามารถเปลี่ยนกรดอะซิติกและแก๊สไฮโดรเจนกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (H_2/CO_2) เป็นแก๊สมีเทน ดังนั้นกรดอินทรีย์และตัวทำละลายชนิดอื่นต้องถูกออกซิไดซ์เป็นกรดอะซิติกและ/หรือ (H_2/CO_2) ในสภาวะที่ความดันย่อยของไฮโดรเจนต่ำ ($<10^{-4}$ atm) (Stams *et al*., 2005) โดยจุลินทรีย์กลุ่มผลิตกรดอะซิติก (Acetogens) โดยที่กรดโพรพิโอนิกเป็นกรดอินทรีย์ที่ถูกออกซิไดซ์ได้ยากที่สุดและจัดเป็นปัจจัยควบคุมที่มีผลต่อปฏิกิริยาผลิตกรดอะซิติกเนื่องจากปฏิกิริยาเปลี่ยนเป็นอะซิติกและคาร์บอนไดออกไซด์เป็นปฏิกิริยา Endergonic (ΔG =+76.1 kJ/mol) (Tatara *et al*., 2008) ดังนั้น

ที่อัตราบรรทุกสารอินทรีย์สูง ๆ ทำให้เกิดปัญหาการสะสมของกรดโพรพิโอนิกในระบบการย่อยสลายไร้อากาศขั้นตอนที่สองได้ ดังนั้นการลดลงอย่างมากของความเข้มข้นกรดอินทรีย์ในระบบถังปฏิกรณ์ PFR แสดงว่าอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ที่ HRT 52.5 วัน อยู่ในช่วงที่เหมาะสม และเมื่อปรับลด HRT 40 และ 30 วันพบว่าปริมาณของกรดอินทรีย์ที่ตรวจพบมีปริมาณกรดแลคติก และโพรพิออนิกที่ค่อนข้างสูงซึ่งอาจเกิดจากการเติมน้ำหมักปริมาณร้อยละ 25 ของปริมาตรการทำงานของถังปฏิกรณ์ PFR เพื่อเป็นการลดปริมาณของตะกอนที่สะสมในระบบจึงอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้ปริมาณของกรดสะสมอยู่ในระบบมาก โดยเฉพาะกรดแลคติกที่สะสมในระบบมากที่สุดถึง 78.85 mM ที่ HRT 40 วัน

แต่อย่างไรก็ตาม ความเป็นบัฟเฟอร์ของระบบสามารถช่วยให้ระบบยังคงอยู่ในสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตมีเทนของจุลินทรีย์อยู่ สังเกตได้จาก pH ของระบบอยู่ในช่วง 7.22-7.43 แม้ว่า pH ที่ตรวจวัดได้จะลดลงจากเดิมแต่ก็อยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการเจริญของจุลินทรีย์ในกลุ่มที่ผลิตมีเทนซึ่งนำกรดระเหยง่ายไปใช้ในกระบวนการเมแทบอลิซึมโดยจะสังเกตุได้จากการลดลงจนไม่สามารถตรวจวัดได้ของกรดอะซิติกและบิวทิริกที่ HRT 40 และ 30 วัน ซึ่งสอดคล้องกับผลผลิตมีเทนที่สูง 391±6.6 และ 424±4.6 ตามลำดับ



ภาพที่ 4.11 กรดอินทรีย์ในถัง PFR ที่ควบคุม **(I)** HRT 52.5 วันที่มีการป้อนน้ำหมักขั้นตอนผลิตไฮโดรเจนจากการหมักร่วมกันระหว่าง POME และสาหร่ายพุงชะโดในถัง CSTR จาก HRT 7 และ 5 วัน ตามลำดับ และ **(II, III)** ป้อนน้ำหมักขั้นตอนผลิตไฮโดรเจนจากการหมักร่วมกันระหว่าง POME และสาหร่ายพุงชะโดในถัง CSTR จาก HRT 4 วัน ที่ควบคุม HRT 40 และ HRT 30 วัน ตามลำดับ

4.5 สมรรถนะกระบวนการย่อยสลายร่วมแบบไร้อากาศสองขั้นตอนของ POME และสาหร่ายพุงชะโด

สมรรถนะการผลิตไฮโดรเจนและมีเทนจากกระบวนการไร้อากาศสองขั้นตอนแบบต่อเนื่องของระบบถังปฏิกรณ์ CSTR-PFR (ตารางที่ 4.5 และ 4.6) พบว่าที่สภาวะ HRT 2 วัน และ 30 วัน ตามลำดับให้ผลผลิตไฮโดรเจนและมีเทนประมาณ 81±1.2 mL-H_2/g-VS และ 424±4.6 mL-CH_4/g-VS เทียบเท่าผลผลิตไฮโดรเจน 4.13 L-H_2/ $L_{substrate}$ และผลผลิตมีเทน 23.15 L-CH_4/ $L_{substrate}$ เมื่อใช้สาหร่ายพุง

ชะโดเป็นซับสเตรตร่วมประมาณร้อยละ 10 (VS Basis) ที่ความเข้มข้นซับสเตรตร่วม 51.0 และ 54.6 g-VS/L ตามลำดับ ทั้งนี้ Angelidaki and Ellegaard (2003) ได้รายงานจุดคุ้มทุนในเชิงเศรษฐศาสตร์นั้นต้องสามารถผลิตแก๊สเชื้อเพลิงได้เทียบเท่ากับผลผลิตแก๊สมีเทนที่สูงกว่า 20 L-CH_4/ $L_{substrate}$ ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ในเชิงเศรษฐศาสตร์ที่จะพัฒนากระบวนการย่อยสลายร่วมไร้อากาศสองขั้นตอนของ POME และสาหร่าย ในระดับอุตสาหกรรมต่อไป จากอัตราการผลิตไฮโดรเจนสูงสุดในถังปฏิกรณ์ CSTR (2,059 ml-H_2/L.d) และอัตราการผลิตมีเทนสูงสุดในถังปฏิกรณ์ Plug flow (784 ml-CH_4/L.d) และถังปฏิกรณ์ Plug flow ใช้ระยะเวลา HRT สูงกว่าถังปฏิกรณ์ CSTR ประมาณ 15 เท่า ดังนั้นสัดส่วนของแก๊สไฮโดรเจนจะมีประมาณร้อยละ 15 โดยปริมาตรของแก๊สเชื้อเพลิงผสมระหว่างไฮโดรเจนและมีเทน ซึ่งสัดส่วนของไฮโดรเจนในแก๊สผสมอยู่ในช่วงของคุณภาพแก๊สไบโอไฮเทน แก๊สไบโอไฮเทนที่ผลิตได้สามารถใช้ได้ในเครื่องยนต์สันดาปภายในที่ใช้แก๊สธรรมชาติ/แก๊สชีวภาพได้โดยไม่ต้องปรับแต่งเครื่องยนต์ (Porpatham *et al*., 2007)

ตารางที่ 4.5 สมรรถนะของระบบถังปฏิกรณ์ CSTR ผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากการย่อยสลายร่วม POME และสาหร่ายพุงชะโด

Reactor Configuration	**H_2-CSTR**					
HRT (day)	7	5	4	3	2	1
OLR (g-VS/d·l)	10.57	14.8	14.0	16.7	25.4	50.9
H_2 Yield (mL/g -VS)	76±0.8	59±3.7	84±2.2	75±2.6	81±1.2	25-47
H_2 Rate (mL/d·l)	809±9.4	825±52.6	1,179±31.0	1,252±43.2	2,059±31.3	634-1375
Energy Rate (kJ/d·l)	10.39	10.6	15.2	16.1	26.5	-
% H_2	54-55	53-55	56-58	54-58	50-58	33-46
pH	5.20±0.13	5.31±0.04	5.06±0.01	4.99±0.12	4.91±0.07	5.14±0.09
Acetate (mM)	353.9±66.4	320.0±24.0	110.0± 22.5	91.3±14.9	94.9±15.3	69-112
Butyrate (mM)	120.8±63.9	77.3±28.6	26.0±10.2	28.2±10.7	31.7±6.1	25-41
Propionate (mM)	243.3±35.0	152.8±24.6	142.0±22.7	145.1±20.5	130.8±20.2	131-146
Lactate (mM)	193.3±55.7	132.8±18.6	215.32±59.7	325.1±45.7	394.0±72.2	279-1,307

Prince of Songkla University Pattani Campus

ผลผลิตของแก๊สมีเทนเฉลี่ยในช่วงที่เริ่มคงที่ของ HRT 52.5, 40 และ 30 วัน มีผลผลิตของมีเทนในฐานของ VS ดังนี้ 389±7.2, 391±6.6 และ 424±4.6 mL-CH_4/g–VS ตามลำดับซึ่งตรงกับ 320.0±7.2, 315.8±6.6 และ 344.4±4.6 mL-CH_4/g-COD ซึ่ง COD ที่ใช้ในการคำนวณในหน่วยของ (mL-CH_4/g-COD) ที่ HRT 52.2 วัน ที่ 89.95 g-COD/L ที่ของแข็งอินทรีย์ที่ระเหยได้ 74.0 g-VS/L และที่ HRT 40 และ 30 วัน COD ที่ป้อน 67.20 g-COD/L ที่ของแข็งอินทรีย์ที่ระเหยได้ 54.6 g-VS/L เนื่องมาจากซับสเตรตที่ต้องนำมาใหม่เพราะระบบที่ใช้อย่างต่อเนื่องเวลานานทำให้ต้องมีการนำตัวอย่างซับสเตรตมาเพิ่มแต่ละช่วงการทดลองที่มีการเปลี่ยนชุดซับสเตรตที่เก็บมามีปริมาณขององค์ประกอบอินทรีย์ที่แต่กต่างกัน

ตารางที่ 4.6 สมรรถนะของระบบถังปฏิกรณ์ PFR ผลิตแก๊สมีเทนจากการย่อยสลายร่วม POME และสาหร่ายพุงชะโด

Reactor Configuration	**CH_4-PFR**		
HRT (day)	52.5	40	30
OLR (g-VS/d·l)	1.40	1.36	1.80
CH_4Yield (mL/g -VS)	389±7.2	391±6.6	424±4.6
CH_4Yield (mL/g-COD)	320.0±7.2	315.8±6.6	344.4±4.6
CH_4Rate (mL-H_2/d·l)	548±10.2	535±9.1	784±8.5
Energy Rate (kJ/d·l)	21.9	21.4	31.4
% CH_4	65-70	64-70	66-69
pH	7.59±0.06	7.43±0.14	7.54±0.05
Acetate (mM)	17.1±1.6	ND	ND
Butyrate (mM)	ND	ND	ND
Propionate (mM)	18.9±2.3	12.5±1.3	11.2±4.2
Lactate (mM)	8.0±2.3	46.3±8.3	38.1±4.3

ND: Non detectable

Prince of Songkla University Pattani Campus

ตารางที่ 4.7 ศักยภาพผลผลิตไฮโดรเจนและมีเทนจากกระบวนการย่อยสลายร่วมไร้อากาศสองขั้นตอนของ POME และสาหร่ายพุงชะโดที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ

Stages	HRT (d)	Total COD effluent (mg/L)	COD removal (%)	Total VS effluent (mg/L)	VS removal (%)	Total phenol Effluent (mg/L)	phenol removal (%)
H_2 Stage	5	61,920	31.16	44.96	39.27	1,298.0	46.97
	4	43,360	35.47	37.9	51.32	1,088.0	55.57
	3	37,760	43.81	34.15	51.33	1,038.0	57.59
	2	31,680	52.86	25.17	50.61	1,008.0	58.82
	1	42,720	36.43	24.19	52.54	1,258.0	48.60
CH_4 stage	52.5	4,200	95.33	6.08	88.59	361.2	85.24
	40	3,100	95.39	8.55	87.81	117.5	95.20
	30	2,100	96.88	6.43	90.83	73.7	96.99

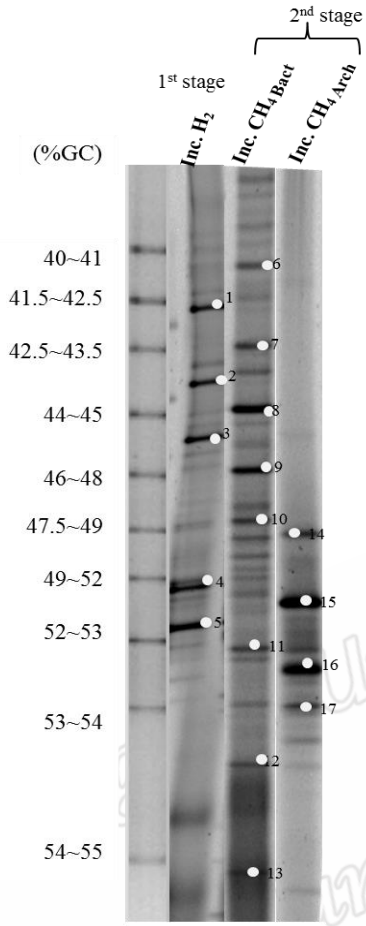
ผลที่ได้จากกระบวนการย่อยสลายร่วมของ POME และสาหร่ายพุงชะโด จากตารางที่ 4.7 สามารถบอกถึงศักยภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในระบบได้ สูงในขั้นตอนแรกของกระบวนการผลิตไฮโดรเจนจากถังปฏิกรณ์ CSTR พบว่าที่ HRT 2 วันสามารถที่จะกำจัด COD ได้สูงที่สุดร้อยละ 52.86 ซึ่ง และที่กระบวนการหมักขั้นที่สองสามารถกำจัด COD ได้สูงสุดถึงร้อยละ 96.88 ที่ระยะเวลาการกักเก็บ HRT 30 วัน ผลที่ได้แสดงถึงศักยภาพของระบบที่ได้ทำการทดลองว่ามีประสิทธิภาพที่สูงในการกำจัด COD ซึ่งใกล้เคียงกับผลการทดลองของ Yacob *et al*., (2005) การหมัก POME แบบบ่อหมัก (Anaerobic Ponding system) ที่ให้ประสิธิภาพในการกำจัด COD ได้มากถึงร้อยละ 97.8 ที่ HRT 40 วัน โดยผลจากการทดลองของการกำจัดของถังปฏิกรณ์ PFR สามารถกำจัด COD ได้สูงที่การดำเนินการ HRT ที่ต่ำกว่าจึงเป็นผลดีของการดำเนินการหมักที่สามารถลดขนาดของถังปฏิกรณ์ให้เล็กลงและลดพื้นที่ในการหมักลงได้ ของจากนี้ผลของการกำจัดสารอินทรีย์ที่ระเหยได้ (VS removal) และการกำจัดฟีนอล (Phenol removal) ของน้ำหมักที่ได้สอดคล้องกันกับการกำจัด COD เช่นกัน โดยที่ขั้นตอนที่สองของการย่อยสลายร่วมกันระหว่าง POME และสาหร่ายพุงชะโดสูงถึงร้อยละ 73.7 และ 96.99 ตามลำดับที่ HRT 30 วัน ถึงแม้การกำจัดฟีนอลในขั้นแรกในการผลิตไฮโดรเจนที่ HRT 2 วันจะให้ผลในการกำจัดฟีนอล 58.82 ซึ่งน้อยกว่าผลจากการทดลองของ Mamimin *et al*., (2012) หมัก POME แบบแบทช์เพื่อผลิตไฮโดรเจนที่ให้ผลการกำจัดฟีนอลสูงสุดร้อยละ 65 ทั้งนี้เนื่องจากการทดลองถูกจำกัดความเข้มข้นของฟีนอลเริ่มต้นที่ต่ำกว่า 100-400 mg/L โดยในการศึกษาข้างต้นพบว่าถ้าความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลสูงกว่า 600 mg/L ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

4.6 กลุ่มจุลินทรีย์หลักในระหว่างการดำเนินงานกระบวนการย่อยสลายร่วมไร้อากาศสองขั้นตอน

กลุ่มจุลินทรีย์หลักในระหว่างการดำเนินงานกระบวนการย่อยสลายร่วมไร้อากาศสองขั้นตอน โดยป้อน POME ผสมสาหร่ายพุงชะโดร้อยละ 5 (VS Basis) เข้าถังปฏิกรณ์ CSTR ที่ HRT 7 วัน และป้อนน้ำหมักจากขั้นตอนแรกเข้าถุงปฏิกรณ์ PFR ที่ HRT 52.5 วัน ได้ถูกตรวจวิเคราะห์ด้วยวิธี Denatruing gradient gel electrophoresis (DGGE) วิธีการตรวจวิเคราะห์นี้สามารถให้ข้อมูลโครงสร้างกลุ่มจุลินทรีย์ในกลุ่มจุลินทรีย์ผสม (Mixed cultures) และสามารถทราบข้อมูลเชิงปริมาณของกลุ่มเชื้อแต่ละชนิดจาก DNA band intensities (Stamper *et al*., 2003) ผลการวิเคราะห์โครงสร้างกลุ่มจุลินทรีย์และชนิดของจุลินทรีย์หลักที่ถูกตรวจพบในถังปฏิกรณ์ CSTR และ PFR ของขั้นตอนการผลิตไฮโดรเจนและมีเทนตามลำดับ (ภาพที่ 4.12 และตารางที่ 4.8)

กลุ่มจุลินทรีย์ที่เด่นในขั้นตอนการผลิตไฮโดรเจนได้แก่ *Clostridium* sp., *Enterobacter* sp., *Weissella* sp., *Leuconostoc* sp. และ *Lactobacillus* sp. การตรวจพบ *Clostridium* sp. เป็นการยืนยันการผลิตไฮโดรเจนได้ เนื่องแบคทีเรียทั้งสองกลุ่มนี้สามารถเปลี่ยนคาร์โบไฮเดรตเป็นกรดอะซิติก/บิวทิริกควบคู่กับแก๊สไฮโดรเจนในกระบวนการหมักไร้อากาศในสภาวะเทอร์โมฟิลิกได้ดี (Jariyaboon *et al*., 2015) ส่วน *Enterobacter* sp. ซึ่งเป็น Facultative anaerobes จึงสามารถกำจัดออกซิเจนส่วนเกินและช่วยเสริมสร้างสภาวะไร้อากาศและสามารถผลิตไฮโดรเจนได้จากคาร์โบไฮเดรต (Hung *et al*., 2011) นอกจากนี้ยังพบจุลินทรีย์ในกลุ่ม *Weissella* sp., *Leuconostoc* sp. และ *Lactobacillus* sp. เป็นกลุ่มที่ผลิตกรดแลคติกและยังมีฤทธิ์ในการต่อต้านการเจริญของเชื้อในกลุ่ม *Clostridium* sp. ได้ ซึ่งหากมีจุลินทรียในกลุ่มนี้มากอาจทำให้ผลผลิตของแก๊สไฮโดรเจนเกิดน้อยลงได้ (Adams and Nicolaides, 1997) ซึ่งยืนยันได้จากการสะสมของกรดแลคติกในน้ำหมักในขั้นตอนการผลิตไฮโดรเจน

การผลิตแก๊สมีเทนจากกระบวนการป้อนต่อเนื่องด้วยกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศสองขั้นตอนพบว่ามีกลุ่มเชื้อต่าง ๆ ที่ตรวจวิเคราะห์ด้วยวิธี DGGE (ภาพที่ 4.12) ซึ่งพบกลุ่มจุลินทรียทีย์แบ่งออกเป็นสองกลุ่มหลัก (ภาพที่ 4.12 และตารางที่ 4.6) ได้แก่แบคทีเรีย *Pusillimonas* sp., *Acinetobacter* sp., *Proteiniphilum* sp., *Pedobacter* sp., *Thiobacillus* sp., *Anaerobaculum* sp., *Thermocrispum* sp. และ *Paenibacillus* sp. ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนกรดระเหยง่ายทุกชนิดให้เป็นอะซิติกและกลุ่มที่สามารถผลิตไฮโดรเจนให้เกิดขึ้น (Khemkhao *et al*. 2012) และอาเคียร์เป็นกลุ่มที่ทำหน้าที่เปลี่ยนอะซิติกเป็นมีเทนและคาร์บอนไดออกไซน์ โดยบางชนิดสามารถใช้ไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซน์ให้ผลผลิตเป้นมีเทนได้อีกด้วย โดยพบว่ากลุ่มอาเคียร์ที่โดดเด่นของการทดลองนี้คือ *Methanocorpusculum* sp., *Methanothrix* sp. และ *Methanoregula* sp. ซึ่งเป็นกลุ่มประชากรหลักที่มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สมีเทน (Poh and Chong, 2010)

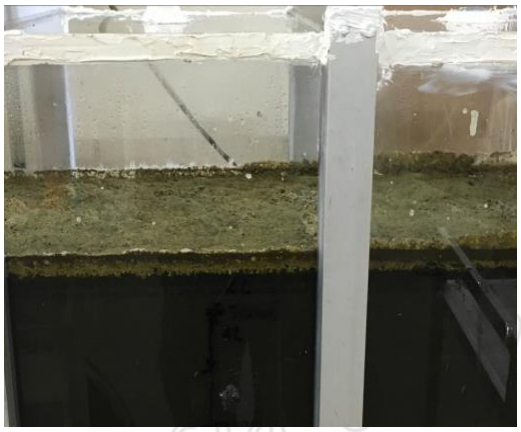


ภาพที่ 4.12 โครงสร้างกลุ่มจุลินทรีย์ในกระบวนการย่อยสลายร่วมแบบไร้อากาศสองขั้นตอนของ POME และสาหร่ายพุงชะโดแบบป้อนต่อเนื่อง

ตารางที่ 4.8 ผลการ blast ของแบนที่ตัดจาก DGGE เจลของกลุ่มจุลินทรีย์ในกระบวนการย่อยสลายร่วมแบบไร้อากาศสองขั้นตอนของ POME และสาหร่ายพุงชะโดแบบป้อนต่อเนื่อง

Affiliation Strains *(Band)*		
First stage	Second stage	
Bacteria	Bacteria	Archea
Weissella sp. (1)	*Pusillimonas* sp. (6)	*Methanosarcina* sp. (14)
Leuconostoc sp. (2)	*Acinetobacter* sp. (7)	*Methanocorpusculum* sp. (15)
Enterobacter sp. (3)	*Proteiniphilum* sp. (8)	*Methanothrix* sp. (16)
Lactobacillus sp. (4)	*Pedobacter* sp. (9)	*Methanoregula* sp. (17)
Clostridium sp. (5)	*Thiobacillus* sp. (10)	
	Anaerobaculum sp.(11)	
	Paenibacillus sp. (12)	
	Thermocrispum sp. (13)	

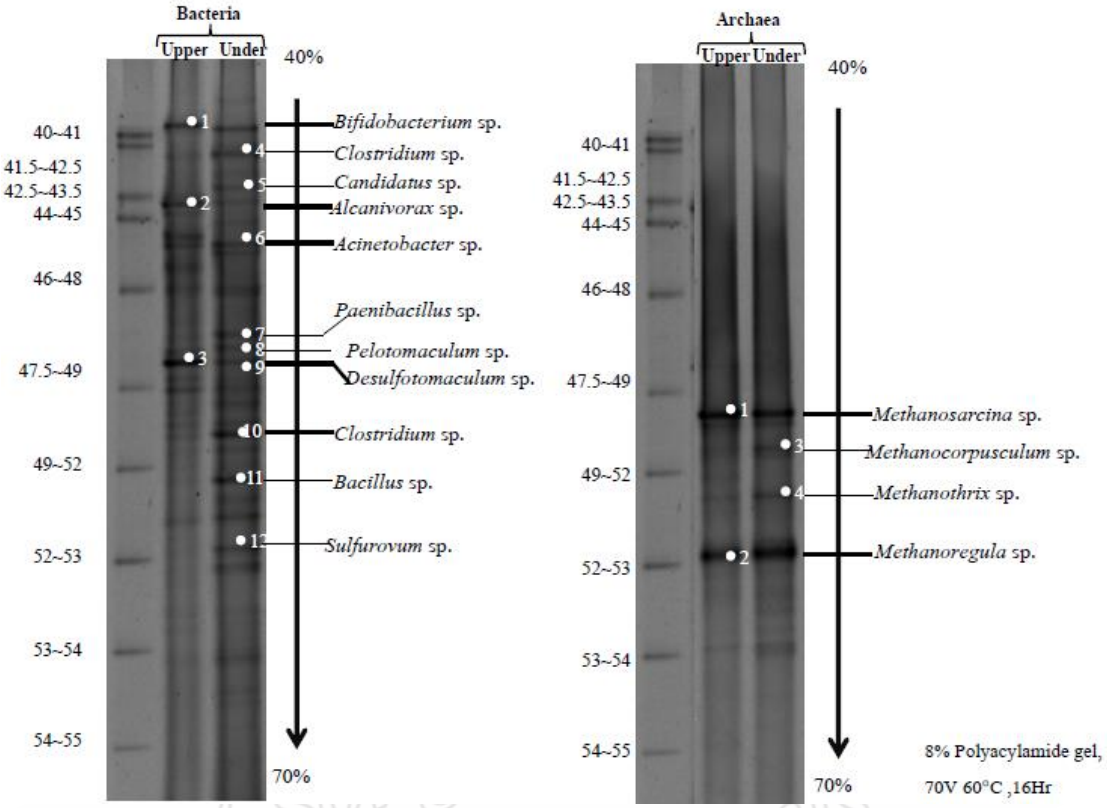
การเกิดโฟมในถังปฏิกรณ์ PFR (ภาพที่ 4.13) เป็นปัญหาวิกฤตอย่างหนึ่งในกระบวนการย่อยสลายไร้อากาศซึ่งอาจก่อให้ระบบการผลิตแก๊สชีวภาพล้มเหลวได้โฟมสามารถเกิดขึ้นได้ง่ายเมื่อใช้ซับสเตรตที่มีองค์ประกอบของโปรตีนและไขมันสูง (Boe *et al*., 2012) จุลินทรีย์กลุ่ม Filamentous ซึ่งได้แก่ *Gordonia*species และ *Microthrixparvicella* สามารถยึดเกาะฟองแก๊สให้อยู่ติดที่พื้นผิวด้านบนของน้ำหมัก (Heard *et al*., 2008)



ภาพที่ 4.13 ลักษณะการเกิดโฟมในถังปฏิกรณ์ PFR

จากปัญหาการเกิดโฟมนั้นจึงได้นำตัวอย่างตะกอนไปวิเคราะห์หากลุ่มเชื้อจุลินทรีย์ด้วยวิธี DGGE (ภาพที่ 4.14) พบแบคทีเรีย Filamentous *Desulfotomaculum* sp., *Candidatus* sp., *Paenibacillus* sp., *Desulfotomaculum* sp. และ *Bacillus* sp. ซึ่งอาจเป็นอีกสาเหตุหนึ่งของการเกิดโฟมในถังปฏิกรณ์ ถึงแม้ว่าการเกิดโฟมจะเป็นการป้องกันการสัมผัสกับออกซิเจนของน้ำหมักในระบบแต่ก็ เป็นสาเหตุที่ทำให้ปิดกั้นการออกของแก๊สที่เกิดขึ้นในระบบซึ่งอาจทำให้แรงดันที่มากขึ้นลดความสามารถในการเจริญของจุลินทรีย์ได้ การเกิดโฟมมีปัจจัยอื่น ๆ ที่สำคัญเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย เช่น องค์ประกอบของซับสเตรต การสะสมของกรดอินทรีย์ในน้ำหมัก และสภาวะปฏิบัติการ (Ganidi *et al*., 2009) ดังนั้นจึงมีความสำคัญที่ควรแก้ปัญหาการเกิดโฟมภายในระบบที่เกิดขึ้น

Prince of Songkla University Pattani Campus



ภาพที่ 4.14 โครงสร้างกลุ่มจุลินทรีย์ที่พบในตะกอนโฟม

Prince of Songkla University Pattani Campus