

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ลักษณะทางกายภาพของวัตถุดิบใบยางพาราและมูลสุกร

ตัวอย่างใบยางพาราที่ใช้ในการหมักร่วมเพื่อการผลิตก๊าซชีวภาพสำหรับงานวิจัยนี้เป็นใบยางพาราพันธุ์ 600 มีลักษณะทางกายภาพ คือ ใบมีสีน้ำตาลเข้ม ก่อนข้างแห้ง เพ็ชรร่วงจากต้นยางพาราประมาณ 1-2 สัปดาห์ เก็บตัวอย่างจากสวนยางพารา อำเภอควนเนียง จังหวัดสงขลา

ตัวอย่างมูลสุกรที่ใช้ในการหมักร่วมเพื่อการผลิตก๊าซชีวภาพสำหรับงานวิจัยนี้เป็นมูลสุกรสดจากสุกรแม่พันธุ์ ขั้วถ่ายไม่เกิน 24 ชั่วโมง ได้รับความอนุเคราะห์จากภาควิชาสัตวศาสตร์ คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ลักษณะของมูลสุกรค่อนข้างแข็งและแห้ง ก่อนการทดลองจึงต้องมีการบดและลดขนาดของมูลสุกรก่อน โดยเครื่องบด

4.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของวัตถุดิบใบยางพาราและมูลสุกร

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีในของตัวอย่างใบยางพาราและมูลสุกร ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4-1 จากผลการวิเคราะห์พบว่าปริมาณความชื้นทั้งมูลสุกรและใบยางพารามีค่าความชื้นต่ำ 2.31 และ 0.19% ตามลำดับ เนื่องมาจากบริเวณที่เก็บใบยางพารามีแสงแดดส่องอย่างทั่วถึงและก่อนเก็บใบยางพาราไม่มีฝนตก สำหรับมูลสุกรทำการเก็บตัวอย่างมูลสุกรก่อนที่จะมีการทำความสะอาดฟาร์ม จึงมีน้ำล้างคอกและปัสสาวะของสุกรปนอยู่ในปริมาณที่น้อย

ตารางที่ 4-1 องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างใบยางพาราและมูลสุกร

Parameter	Raw material	
	Pig manure	Rubber Leaves
Organic Carbon (OC) % (dry wt.)	17.15	29.76
Total nitrogen (TN) % (dry wt.)	1.59	2.41
C/N ratio	10.79	12.34
Moisture (%)	2.31	0.19

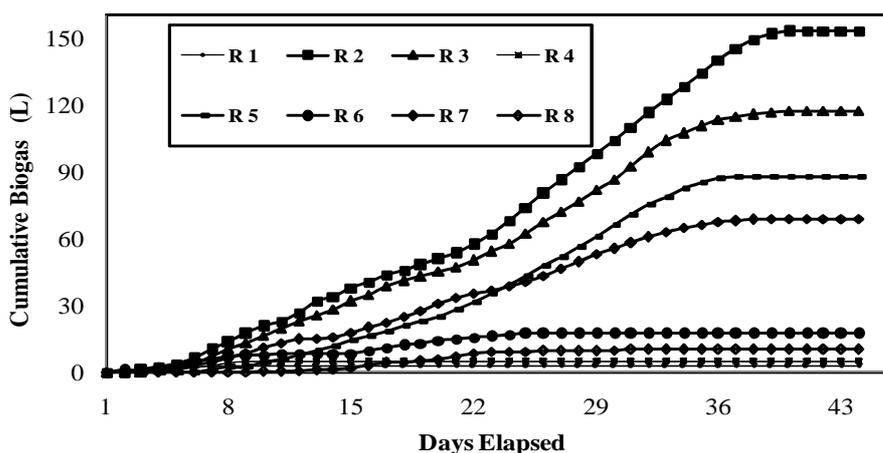
ค่าอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนกับไนโตรเจน (C/N Ratio) ของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพ เป็นอัตราส่วนที่บ่งบอกถึงการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ปราศจากออกซิเจน จากผลการวิเคราะห์พบว่าอัตราส่วนคาร์บอนกับไนโตรเจนของมูลสุกรและใบยางพาราเป็น 10.79 และ 12.34 ตามลำดับ ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่ต่ำเมื่อเทียบกับค่าอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนกับไนโตรเจนตามทฤษฎี ซึ่งควรมีค่าอยู่ที่ประมาณ 20-30:1 ถ้าค่า C/N มากกว่า 30 พบว่า ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจะต่ำ เนื่องจากระบบมีปริมาณไนโตรเจนน้อยเกินไปจะส่งผลให้การเริ่มต้นระบบได้ช้ากว่า ซึ่งการมีปริมาณไนโตรเจนไม่เพียงพอจะส่งผลต่อการจับกลุ่มกันของแบคทีเรีย (Punal *et al*, 2000) แต่ถ้าค่า C/N น้อยกว่า 30 มากๆ จำเป็นต้องมีการลดปริมาณไนโตรเจนให้น้อยลง เนื่องจากถ้ามีปริมาณไนโตรเจนมากจนเกินไปจะเกิดการสร้างแอมโมเนียมากขึ้น สาเหตุที่ค่าอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนกับไนโตรเจนของทั้งมูลสุกรและใบยางพารามีค่าต่ำเนื่องจากมีปริมาณไนโตรเจนที่ค่อนข้างสูง พบว่ามูลสุกรและใบยางพารามีปริมาณไนโตรเจน 1.59% และ 2.41% ตามลำดับ แต่ใบยางพารามีปริมาณคาร์บอนสูงกว่ามูลสุกรประมาณ 2 เท่า ใบยางพาราจึงเป็นตัวช่วยเพิ่มปริมาณคาร์บอนให้กับระบบ ซึ่งปริมาณคาร์บอนเกิดจากการสลายตัวของสารประกอบเซลล์ulosภายในใบยางพารา (วิรัช, 2529) มีผลให้ได้ปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณร้อยละมีเทนสูงขึ้น

4.3 ผลการทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพในระดับห้องปฏิบัติการระบบแบบแบทช์ (Batch)

การทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพระบบแบบแบทช์เป็นชุดการทดลองระดับห้องปฏิบัติการด้วยการหมักร่วมระหว่างมูลสุกรกับใบยางพารา มีการป้อนวัตถุดิบเพียงครั้งเดียวในตอนเริ่มต้นการทดลอง โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ชุดการทดลอง เพื่อศึกษาประสิทธิภาพใน

การผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างมูลสุกรและไบogas พารา คือ ชุดการทดลองที่ R1 ศึกษาผลของความเข้มข้นของของแข็งของวัตถุดิบ ชุดการทดลองที่ R2 ศึกษาผลของสัดส่วนวัตถุดิบเริ่มต้นและชุดการทดลองที่ R3 ศึกษาผลของขนาดไบogas พารา ดังแสดงรายละเอียดของการออกแบบการทดลองในตาราง 3-ก

การเริ่มต้นระบบการหมักร่วมสำหรับการทดลองนี้ไม่มีการใช้เชื้อจุลินทรีย์ในตะกอนเริ่มต้น (Seed Sludge) เนื่องจากต้องการกำหนดสภาวะในการทดลองให้คล้ายคลึงกับการนำไปประยุกต์ใช้งานในระดับครัวเรือน จึงมีผลให้ช่วงเวลาในการเริ่มต้นระบบเกิดก๊าซชีวภาพช้ากว่าการใช้เชื้อจุลินทรีย์เป็นเชื้อเริ่มต้น เนื่องจากปริมาณจุลินทรีย์เริ่มต้นมีปริมาณน้อย (Souza, 1986) ดังแสดงภาพประกอบที่ 4-1 ก๊าซชีวภาพเริ่มผลิตได้เมื่อการทดลองผ่านไปประมาณ 7 วัน การทดลองในกิจกรรมนี้ได้ทำการเติมวัตถุดิบเพียงครั้งเดียวในตอนเริ่มต้นการทดลอง การทดลองและบันทึกผลสิ้นสุดลงเมื่อปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพเริ่มลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการย่อยสลายของแบคทีเรียเริ่มลดน้อยลง หรือไม่มีการย่อยสลายของแบคทีเรียแล้ว เนื่องมาจากสารอาหารสำหรับเลี้ยงแบคทีเรียเริ่มลดน้อยลงหรือหมดแล้ว ซึ่งระยะเวลาในการทดลองและเก็บบันทึกผลทั้งหมด 44 วัน ผลการวิเคราะห์ห่อจี้ประกอบทางเคมีของตัวอย่างหลังสิ้นสุดการทดลองเพื่อใช้ประเมินประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างไบogas พาราและมูลสุกรในสภาวะต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4-2



ภาพประกอบที่ 4-1 ก๊าซชีวภาพสะสมในระบบการผลิตก๊าซชีวภาพแบบหมักร่วมระบบแบบแบทช์ระหว่างมูลสุกรและไบogas พารา

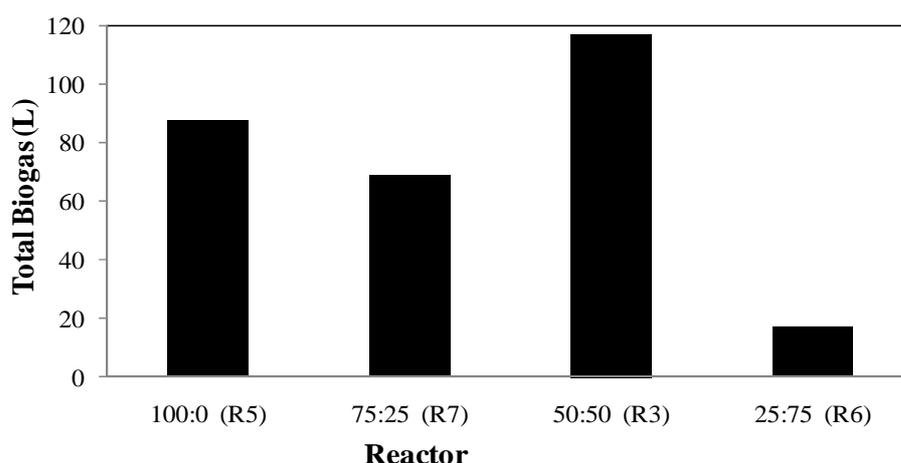
ตารางที่ 4-2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างหลังสิ้นสุดการทดลองสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระบบแบบแบทช์ระหว่างใบยางพาราและมูลสุกรในสภาวะต่างๆ

No.	Pig Manure (PM): Rubber Leaves (RL)	TS (%)	Biogas Production (L/D)	CH ₄ Content (%)	Total CH ₄ (L)	CH ₄ Yield (L/kg TS _{removed})	C/N Ratio	VFA _{eff} (mg/l)	pH		%TS removal
									After	Before	
R1	50:50	8	0.06	-	-	-	11.72	550	6.7	7.01	74.36
R2	50:50	12	3.48	58	88.8	0.38	11.72	500	6.3	7.22	71.13
R3	50:50	16	2.66	50	58.5	0.14	11.72	1500	6.2	7.16	68.97
R4	50:50	20	0.11	-	-	-	11.72	2000	5.9	6.85	45.67
R5	100:0	16	1.99	41	35.9	0.06	10.79	1250	7.4	5.95	84.44
R6	25:75	16	0.39	-	-	-	12.06	2250	5.9	7.15	64.14
R7	75:25	16	1.56	-	-	-	11.31	550	6.7	7.02	71.96
R8*	50:50	16	0.23	-	-	-	11.72	1000	6.0	5.50	24.18

*R8 ใช้ใบยางพาราที่ยังไม่ผ่านการบด

4.3.1 ผลของสัดส่วนวัตถุดิบเริ่มต้นต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ

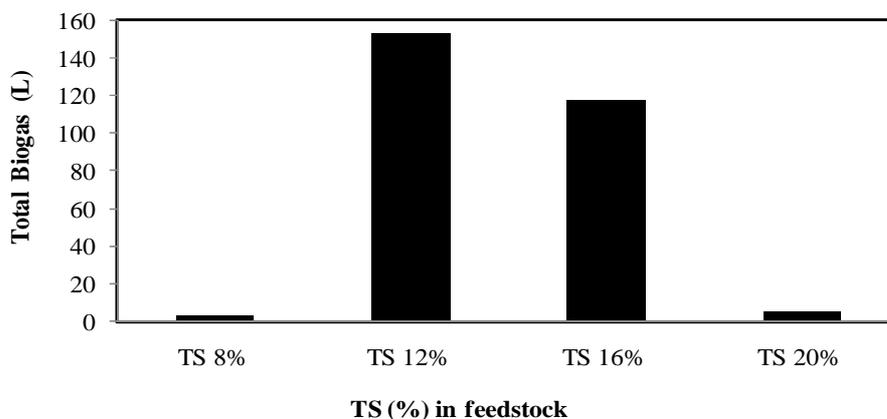
จากการทดลองศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างมูลสุกรกับใบยางพาราที่อัตราส่วนผสมที่แตกต่างกัน ในอัตราส่วนระหว่างมูลสุกรกับใบยางพาราที่ 100:0, 75:25, 50:50, และ 25:75 ตามลำดับ (การทดลองที่ R5, R7, R3, และ R6 ตามลำดับ) โดยการควบคุมปริมาณ TS ของวัตถุดิบที่ 16 % พบว่า ที่อัตราส่วนระหว่างมูลสุกรกับใบยางพาราที่ 50:50 (การทดลองที่ R3) สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ปริมาณสูงสุด ในขณะที่อัตราส่วนระหว่างมูลสุกรกับใบยางพาราที่ 75:25 (การทดลองที่ R7) ผลิตก๊าซชีวภาพได้ปริมาณต่ำที่สุด แสดงดังภาพประกอบที่ 4-2 ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าการเติมใบยางพาราจะช่วยเพิ่มปริมาณคาร์บอนและสารอาหารในวัตถุดิบหมัก แต่ต้องมีปริมาณที่เหมาะสม กล่าวคือ ถ้าหากใบยางพารามีปริมาณที่น้อยจนเกินไปจะไม่สามารถเพิ่มสารอาหารให้แก่ระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ เนื่องจากใบยางพาราเพียงอย่างเดียวจะมีแบคทีเรียสำหรับสร้างก๊าซมีเทนในปริมาณน้อยในระดับที่ไม่ผลิตก๊าซชีวภาพได้ โดยผลการทดลองสอดคล้องกับการทดลองของ Kim *et al*, (2004) และ Carucci *et al*, (2005) ในทางกลับกันหากใบยางพารามีปริมาณที่มากจนเกินไป ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จะมีปริมาณน้อยเช่นกัน เนื่องจากใบยางพารามีปริมาณไนโตรเจนที่ค่อนข้างจะสูงประมาณร้อยละ 2.4 โดยน้ำหนัก ไนโตรเจนจะถูกเปลี่ยนเป็นสารประกอบพวกแอมโมเนีย ซึ่งเป็นตัวการที่สำคัญในการยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียพวกที่สร้างมีเทน สังเกตได้จากค่า pH ในการทดลองที่อัตราส่วนระหว่างมูลสุกรกับใบยางพาราที่ 75:25 (การทดลองที่ R7) มีค่า pH เริ่มต้นการทดลองต่ำที่สุดในทุกชุดการทดลองและมีค่ากรดอินทรีย์ระเหยง่ายสูงที่สุดด้วย



ภาพประกอบที่ 4-2 แสดงผลของอัตราส่วนของใบยางพาราในวัตถุดิบต่อการผลิตก๊าซชีวภาพแบบหมักร่วมในระบบแบบแบทช์ที่ TS 16%

4.3.2 ผลของความเข้มข้นของของแข็งทั้งหมด (TS) ในวัตถุดิบ

จากการทดลองหาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยการหมักร่วมระหว่างไบโอยางพารา กับมูลสุกรระบบแบบแบทช์ โดยพิจารณาผลของความเข้มข้นของของแข็งทั้งหมด (TS) ในวัตถุดิบเริ่มต้น ได้ทำการทดลองที่ TS แยกต่างกัน 4 ค่า ดังต่อไปนี้ 8%, 12%, 16%, และ 20% ตามลำดับ (การทดลองที่ R1, R2, R3, และ R4 ตามลำดับ) และควบคุมอัตราส่วนระหว่างมูลสุกรกับไบโอยางพาราให้คงที่ที่ 50:50 จากผลการทดลองพบว่าที่ TS 12% (การทดลองที่ R2) สามารถผลิตก๊าซชีวภาพในระยะเวลาการทดลองทั้งสิ้น 44 วัน ได้ปริมาณสูงสุด 153.1 ลิตร ในขณะที่ TS 8% และ 20% สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ในปริมาณน้อย คือ 2.6 ลิตร และ 4.9 ลิตร ตามลำดับ แสดงถึงภาพประกอบที่ 4-3 และตารางที่ 4-2 ทั้งนี้เนื่องจากที่ความเข้มข้นของของแข็งสูงที่ TS 20% จะมีปริมาณวัตถุดิบตั้งต้นสูง ทำให้เข้าใกล้การหมักแบบแห้ง (Dry Anaerobic Digestion) ซึ่งการหมักของแข็งสูงที่มีค่า TS อยู่ในช่วง 22-50% (Wujcik *et al*, 1980) ส่งผลให้การหมักไม่มีเสถียรภาพโดยมีการสะสมของตัวยับยั้งการทำงานแบคทีเรียสร้างมีเทน ซึ่งสังเกตได้จากปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายสะสมอยู่ในระดับที่สูงประมาณ 2,000 มิลลิกรัม/ลิตร และค่า pH ของระบบมีค่าค่อนข้างต่ำประมาณ 5.9 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Radwan *et al*, (1993) ซึ่งได้ทำการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างมูลวัวกับผลพลอยได้จากเกษตรกรรม ซึ่งพบว่าที่ความเข้มข้นของของแข็งสูง ปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพจะน้อยลง และงานวิจัยของ Jewell และคณะ (1993) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากของเสียจากการเพาะปลูกทางการเกษตร พบว่าที่ TS มากกว่า 50% อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพลดลงอย่างรวดเร็ว สำหรับที่ TS 8% (การทดลองที่ R1) จะมีปริมาณอาหารของแบคทีเรียที่ใช้ในการผลิตก๊าซมีเทนน้อยเกินไป จึงไม่เพียงพอต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ



ภาพประกอบที่ 4-3 แสดงผลของร้อยละความเข้มข้นของของแข็งทั้งหมด (% TS) ในวัตถุดิบต่อการผลิตก๊าซชีวภาพแบบหมักร่วมด้วยระบบแบบแบทช์ระหว่างมูลสุกรและไบยางพาราที่อัตราส่วนระหว่างมูลสุกรกับไบยางพารา 50:50

4.3.3 ผลของขนาดไบยางพาราต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ

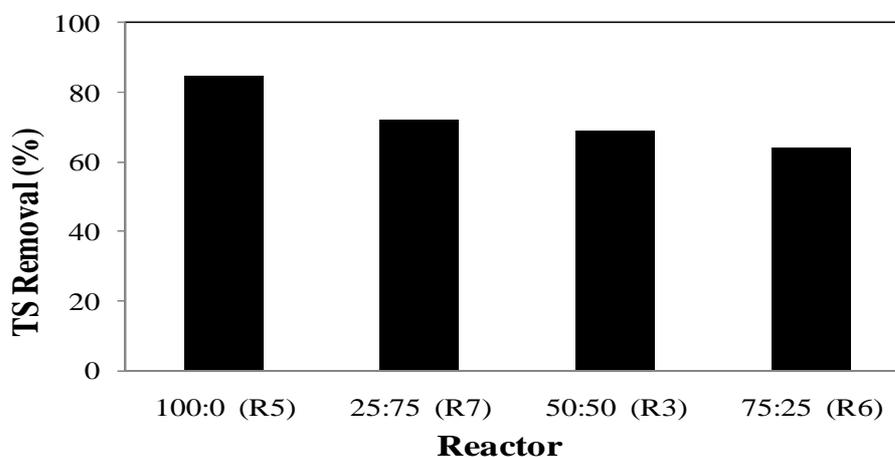
จากการทดลองระบบแบบแบทช์เพื่อหาประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพโดยพิจารณาผลของขนาดไบยางพารา ซึ่งขนาดของไบยางพาราที่ใช้ในการศึกษามีด้วยกัน 2 ขนาด คือ ไบยางพาราที่ผ่านการบดและไบยางพาราที่ยังไม่ผ่านการลดขนาด โดยไบยางพาราที่ผ่านการบดมีขนาดโดยเฉลี่ยที่ $2.81 \times 2.81 \text{ mm}^2$ (การทดลองที่ R3) และไบยางพาราที่ยังไม่ผ่านการลดขนาดมีขนาดประมาณ $50 \times 40 \text{ mm}^2$ (การทดลองที่ R8) การทดลองได้ทำการควบคุมอัตราส่วนระหว่างมูลสุกรกับไบยางพาราให้คงที่ที่ 50:50 และ TS 16 % จากผลการทดลองดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 4-3 เห็นได้ชัดเจนว่าไบยางพาราที่ผ่านการบดสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ปริมาณที่มากกว่าการทดลองที่ใช้ไบยางพาราที่ไม่ผ่านการลดขนาด สาเหตุเนื่องมาจากไบยางพาราที่ผ่านการลดขนาดแล้วจะมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับแบคทีเรียมากกว่า ช่วยให้แบคทีเรียสามารถย่อยสลายได้ดีกว่าไบยางพาราที่ยังไม่ผ่านการลดขนาด จึงส่งผลโดยตรงต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ

ตารางที่ 4-3 แสดงผลของขนาดใบยางพาราต่อการผลิตก๊าซชีวภาพในการหมักร่วม

Property	Shred	No Shred
Particle Size (mm ²)	2.81×2.81	50×40
Biogas Production (L)	117	29.76

4.3.4 ผลของการหมักร่วมต่อการกำจัดของแข็งทั้งหมดในวัตถุดิบ

การกำจัดของแข็งทั้งหมดของวัตถุดิบที่ผ่านการย่อยสลายในการทดลองระบบแบบแบทช์ สามารถบ่งบอกประสิทธิภาพการย่อยสลายของแบคทีเรียในการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยการหมักร่วมระหว่างมูลสุกรกับใบยางพาราได้ โดยทั่วไปธรรมชาติของแบคทีเรียจะย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ง่ายก่อน หลังจากนั้นจะย่อยสารอินทรีย์ที่ย่อยยากกว่า จากการทดลองได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งทั้งหมดในวัตถุดิบเริ่มต้น สำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพที่มีอัตราส่วนระหว่างใบยางพาราและมูลสุกรที่แตกต่างกัน โดยควบคุมน้ำหนักของวัตถุดิบเริ่มต้นทั้งสองให้เท่ากันที่ TS 16% แสดงดังภาพประกอบที่ 4-4



ภาพประกอบที่ 4-4 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดในวัตถุดิบระหว่างมูลสุกรและใบยางพาราที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ต่อการผลิตก๊าซชีวภาพแบบหมักร่วมด้วยระบบแบบแบทช์ที่ TS 16%

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดขึ้นอยู่กับปริมาณอัตราส่วนของมูลสุกรกับใบยางพารา กล่าวคือ ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดจะแปรผันตรงกับอัตราส่วนของใบยางพาราในวัตถุดิบ ในการทดลองที่ R5 เป็นการหมักมูลสุกรเพียงอย่างเดียวมีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดสูงที่สุด (84.44%) ส่วนการทดลองที่ R6 มีอัตราส่วนใบยางพาราในวัตถุดิบปริมาณสูงที่สุด คือ 75% มีผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดต่ำที่สุด (64.14%) สาเหตุเนื่องมาจากแบคทีเรียจะย่อยสลายใบยางพาราได้ยากกว่ามูลสุกรเนื่องจากใบยางพาราเป็นชีวมวลซึ่งประกอบด้วยโมเลกุลขนาดใหญ่ของลิกนิน เซลลูโลส และโปรตีน (Thiago, 2007) สำหรับผลการเปรียบเทียบร้อยละของการกำจัดของแข็งทั้งหมดระหว่างการทดลองที่ R3 และ R8 ซึ่งเป็นการศึกษาปัจจัยของขนาดของใบยางพาราที่มีผลต่อการกำจัดของแข็งทั้งหมด โดยศึกษาเปรียบเทียบระหว่างใบยางพาราที่ผ่านการบดแล้วกับใบยางพาราที่ยังไม่ผ่านการบด พบว่า ใบยางพาราที่ยังไม่ผ่านการบดจะประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดที่ต่ำ (24.18%) เนื่องมาจากการย่อยสลายของแบคทีเรียเป็นไปได้ยาก ดังแสดงผลตามตารางที่ 4-2

สถานะที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยการะบวนการหมักร่วมระหว่างมูลสุกรกับใบยางพาราแบบแบทช์ในระดับห้องปฏิบัติการ คือ สัดส่วนระหว่างมูลสุกรและใบยางพาราที่ 50:50 ปริมาณ TS 12% และใช้ใบยางพาราที่ผ่านการบดแล้ว

4.4 ผลการทดลองศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยชุดการทดลองขนาดห้องปฏิบัติการระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-Continuous)

การทดลองศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยระบบแบบกึ่งต่อเนื่องเป็นชุดการทดลองขนาดห้องปฏิบัติการด้วยการหมักร่วมระหว่างมูลสุกรกับใบยางพารา ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 4 ชุดทดลอง เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างมูลสุกรและใบยางพารา คือ ชุดการทดลองที่ S1 ศึกษาผลของสัดส่วนเริ่มต้นของวัตถุดิบ (Feedstock) ชุดการทดลองที่ S2 ศึกษาผลของปริมาณวัตถุดิบป้อน ชุดการทดลองที่ S3 ศึกษาผลของสัดส่วนวัตถุดิบป้อน (Feed) และชุดการทดลองที่ S4 ปริมาณของแข็งทั้งหมดของวัตถุดิบป้อน ดังแสดงการออกแบบการทดลองในตารางที่ 3-5

การเริ่มต้นดำเนินการระบบสำหรับในการทดลองนี้ไม่มีการใช้เชื้อจุลินทรีย์ในตะกอนเริ่มต้น (Seed Sludge) เช่นเดียวกับการทดลองระบบแบบแบทช์ เนื่องจากต้องการกำหนดสถานะในการทดลองให้คล้ายคลึงกับการนำไปประยุกต์ใช้งานในระดับครัวเรือนมากที่สุด ความเข้มข้นของของแข็งเริ่มต้นของวัตถุดิบได้มาจากการทดลองในกิจกรรมที่ 1 ซึ่งเป็นค่าความเข้มข้นของของแข็งที่ให้ผลได้ก๊าซมีเทนสูงสุด คือ TS 12% โดยดำเนินการระบบแบบกึ่งต่อเนื่องด้วยปริมาณวัตถุดิบเริ่มต้นที่ใช้ในการเริ่มต้นระบบ 3.2 กิโลกรัม ดำเนินการระบบเป็นเวลา 21 วัน โดยไม่มีการป้อนวัตถุดิบเพิ่มหรือถ่ายวัตถุดิบออก จากนั้นจะทำการถ่ายวัตถุดิบหมักออกครึ่งหนึ่ง (ประมาณ 1.6 กิโลกรัม) และป้อนวัตถุดิบหมักใหม่ลงในถังหมักเพิ่มทุกๆ 3 วัน ปริมาณวัตถุดิบป้อนแสดงดังตารางที่ 3-9 ซึ่งในขณะที่เติมวัตถุดิบระบบจะได้รับการระบรทุกสารอินทรีย์แบบทันทีทันใด (Shock Load) และในตลอดวันนั้นจะไม่มีการเติมวัตถุดิบเพิ่มอีกเลย การทดลองในกิจกรรมนี้ได้ทำการทดลองและบันทึกผลสิ้นสุดลงเมื่อปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเริ่มคงที่ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการย่อยสลายของแบคทีเรียเริ่มลดน้อยลงหรือไม่มีการย่อยสลายแล้ว เนื่องจากสารอาหารสำหรับเลี้ยงแบคทีเรียเริ่มลดน้อยลงหรือหมดแล้ว การทดลองเข้าสู่สถานะสมดุลในวันที่ 61 เนื่องจากปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเริ่มคงที่ ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างวัตถุดิบหลังสิ้นสุดการทดลองเพื่อใช้ประเมินประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างใบยางพาราและมูลสุกรแบบกึ่งต่อเนื่องในสถานะต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4-4

ตารางที่ 4-4 ผลการวิเคราะห์ห้องค้ประกอบทางเคมีของตัวอย่างหลังสิ้นสุดการทดลองเพื่อใช้ประเมินประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระบบแบบกึ่งต่อเนื่องระหว่างมูลสุกรและใบยางพาราในสภาวะต่างๆ

No.	Feedstock Pig manure: Rubber leaves	Feed Pig manure: Rubber leaves	HRT (Day)	OLR (kg COD/m ³ /D)	Biogas Production (L/D)	CH ₄ Content (%)	CH ₄ yield (L/g TS _{removed})	%TS removal	%COD removal
S1	50:50	50:50	20	3.25	0.32	65.07	2.07	34.08	24.64
S2	50:50	75:25	20	2.56	0.36	70.18	1.89	45.50	26.36
S3	50:50	100:0	20	4.07	0.27	57.25	0.74	71.50	29.61
S4	50:50	50:50	10	6.50	0.20	63.64	0.70	31.50	28.00
S5	50:50	75:25	10	5.13	0.22	69.63	0.79	33.17	26.84
S6	50:50	100:0	10	8.13	0.19	49.01	0.28	58.08	28.07
S7	100:0	50:50	20	3.25	0.18	49.01	0.70	43.42	25.92
S8	100:0	75:25	20	2.56	0.19	64.58	0.73	56.58	25.75
S9	100:0	100:0	20	4.07	0.18	47.40	0.34	83.00	23.96
S10	100:0	50:50	20	4.75	0.16	40.66	0.46	29.20	23.65

4.4.1 ผลของสัดส่วนเริ่มต้นระหว่างมูลสุกรและไบยางพารา

จากการทดลองศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างมูลสุกรกับไบยางพาราที่สัดส่วนเริ่มต้นแตกต่างกัน โดยสัดส่วนเริ่มต้นระหว่างมูลสุกรและไบยางพาราที่ทำการศึกษามี 2 ค่า คือ สัดส่วนเริ่มต้นระหว่างมูลสุกรและไบยางพาราที่ 50:50 (การทดลองที่ S1) และ 100:0 (การทดลองที่ S7) โดยควบคุมปริมาณวัตถุดิบป้อนที่ 0.15 กิโลกรัม สัดส่วนวัตถุดิบป้อนระหว่างมูลสุกรและไบยางพาราที่ 50:50 และ TS วัตถุดิบป้อนที่ 12% โดยการทดลองที่ S1 คือ สัดส่วนเริ่มต้นของวัตถุดิบที่ให้ผลได้ในการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดในการทดลองกิจกรรมที่ S1 จากผลการทดลองพบว่าที่สัดส่วนเริ่มต้นระหว่างมูลสุกรและไบยางพาราที่ 50:50 สามารถให้ผลได้การผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงกว่าที่สัดส่วนเริ่มต้นระหว่างมูลสุกรและไบยางพาราที่ 100:0 โดยสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 19.53 ลิตร (0.32 ลิตร/วัน) ในขณะที่สัดส่วนเริ่มต้นระหว่างมูลสุกรและไบยางพาราที่ 100:0 สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 11.09 ลิตร (0.18 ลิตร/วัน) ในระยะเวลาการทดลองทั้งสิ้น 61 วัน แสดงผลดังตารางที่ 4-3 ถ้าพิจารณาผลได้ของก๊าซมีเทน พบว่า สัดส่วนวัตถุดิบเริ่มต้น 50:50 มีผลได้ของก๊าซมีเทนมากกว่าสัดส่วนวัตถุดิบเริ่มต้น 100:0 ประมาณ 3 เท่า

เมื่อทำการเปลี่ยนสัดส่วนวัตถุดิบป้อนที่ 75:25 (การทดลองที่ 2 และ 8) และ 100:0 (การทดลองที่ 3 และ 9) โดยควบคุมตัวปริมาณวัตถุดิบป้อนที่ 0.15 กิโลกรัมและ TS วัตถุดิบป้อนที่ 12% แต่ทำการศึกษาที่สัดส่วนเริ่มต้นระหว่างมูลสุกรและไบยางพาราที่ 50:50 และ 100:0 อีกครั้ง พบว่าที่สัดส่วนเริ่มต้นของวัตถุดิบที่ 50:50 สามารถผลิตก๊าซชีวภาพและผลได้ของก๊าซมีเทนสูงกว่าที่ 100:0 ดังนั้นจึงเป็นการยืนยันผลการทดลองของสัดส่วนเริ่มต้นที่เหมาะสมของวัตถุดิบ คือ สัดส่วนเริ่มต้นระหว่างมูลสุกรและไบยางพาราที่ 50:50

4.4.2 ผลของปริมาณวัตถุดิบป้อนต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ

จากการทดลองศึกษาความสามารถของระบบผลิตก๊าซชีวภาพระบบแบบกึ่งต่อเนื่องในการรับภาระสารอินทรีย์จากวัตถุดิบป้อนระหว่างมูลสุกรกับไบยางพาราต่อประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ รวมถึงประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมปริมาณวัตถุดิบป้อนแตกต่างกัน โดยปริมาณวัตถุดิบป้อนที่ทำการศึกษามีด้วยกัน 2 ค่า คือ 0.15 กิโลกรัม/ครั้ง (การทดลองที่ S1) และ 0.30 กิโลกรัม/ครั้ง (การทดลองที่ S4) ซึ่งมีค่าอัตราการป้อนสารอินทรีย์ (OLR) ที่ 1.08 และ 2.17 kg COD/m³/D ตามลำดับ มีการป้อนวัตถุดิบทุกๆ 3 วัน โดยควบคุมสัดส่วนเริ่มต้นของวัตถุดิบและสัดส่วนวัตถุดิบป้อนระหว่างมูลสุกรและไบยางพาราที่ 50:50 และ TS วัตถุดิบป้อนที่ 12% จากผลการทดลองพบว่าปริมาณวัตถุดิบป้อนที่ 0.15 กิโลกรัม/ครั้ง ให้ผลได้

การผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงกว่าการทดลองที่ปริมาณวัตถุดิบป้อน 0.30 กิโลกรัม/ครั้ง โดยสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 19.53 ลิตร (0.32 ลิตร/วัน) ในขณะที่ปริมาณวัตถุดิบป้อนที่ 0.30 กิโลกรัม/ครั้ง สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 12.44 ลิตร (0.20 ลิตร/วัน) แสดงดังตารางที่ 4-3 ถ้าพิจารณาผลได้ของก๊าซมีเทนพบว่า ที่ปริมาณวัตถุดิบป้อนที่ 0.15 กิโลกรัม/ครั้ง มีผลได้ของก๊าซมีเทนมากกว่าที่ปริมาณวัตถุดิบป้อนที่ 0.30 กิโลกรัม/ครั้ง ประมาณ 3 เท่า ถ้าพิจารณาการกำจัดของแข็งทั้งหมดพบว่า ที่ปริมาณวัตถุดิบป้อนที่ 0.15 กิโลกรัม/ครั้ง มีค่าการกำจัดของแข็งทั้งหมด 34.08% ในขณะที่ปริมาณวัตถุดิบป้อนที่ 0.30 กิโลกรัม/ครั้ง มีค่าการกำจัดของแข็งทั้งหมดที่ต่ำกว่า คือ 31.50% สาเหตุเนื่องจากแบคทีเรียไม่สามารถย่อยสลายอาหารสำหรับปริมาณวัตถุดิบป้อนที่ 0.30 กิโลกรัม/ครั้ง ได้หมด เกิดการสะสมของปริมาณของแข็งในระบบที่สูงกว่า ส่งผลให้มีค่าการกำจัดของแข็งทั้งหมดที่ต่ำกว่า

4.4.3 ผลของสัดส่วนวัตถุดิบป้อนระหว่างมูลสุกรและใบยางพารา

จากการทดลองศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างมูลสุกรกับใบยางพาราที่สัดส่วนวัตถุดิบป้อนที่แตกต่างกัน โดยสัดส่วนวัตถุดิบป้อนระหว่างมูลสุกรและใบยางพาราที่ทำการศึกษามี 3 ค่า คือ สัดส่วนวัตถุดิบป้อนระหว่างมูลสุกรและใบยางพาราที่ 50:50 (การทดลองที่ S1) 75:25 (การทดลองที่ S2) และ 100:0 (การทดลองที่ S3) จะมีการเติมวัตถุดิบป้อนทุกๆ 3 วัน โดยควบคุมตัวปริมาณวัตถุดิบป้อนที่ 0.15 กิโลกรัม/ครั้ง สัดส่วนวัตถุดิบเริ่มต้นระหว่างมูลสุกรและใบยางพาราที่ 50:50 และ TS วัตถุดิบป้อนที่ 12% จากผลการทดลองพบว่าที่สัดส่วนวัตถุดิบป้อนระหว่างมูลสุกรและใบยางพาราที่ 75:25 ให้ผลได้การผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงสุด โดยสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 22.02 ลิตร (0.36 ลิตร/วัน) ในขณะที่สัดส่วนวัตถุดิบป้อนระหว่างมูลสุกรและใบยางพาราที่ 50:50 และ 100:0 สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 19.53 (0.32 ลิตร/วัน) และ 16.65 ลิตร (0.27 ลิตร/วัน) ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 4-3 ถ้าพิจารณาผลได้ของก๊าซมีเทนพบว่า สัดส่วน 75:25 มีผลได้ของก๊าซมีเทนมากกว่าสัดส่วน 50:50 และ 100:0 ถ้าพิจารณาการกำจัดของแข็งทั้งหมดพบว่า ที่สัดส่วน 75:25 มีค่าการกำจัดของแข็งทั้งหมด 45.50% ในขณะที่สัดส่วน 50:50 และ 100:0 มีค่าการกำจัดของแข็งทั้งหมด 34.08% และ 31.50% ตามลำดับ สาเหตุที่สัดส่วน 100:0 มีการกำจัดของแข็งทั้งหมดที่สูงที่สุดเนื่องจากไม่มีใบยางพาราเป็นส่วนผสม แบคทีเรียจึงย่อยสลายได้ง่ายกว่า

4.4.4 ผลของปริมาณของแข็งทั้งหมดของวัตถุดิบป้อน

จากการทดลองศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างมูลสุกรกับใบยางพาราที่ปริมาณของแข็งทั้งหมดของวัตถุดิบป้อนที่แตกต่างกัน โดยปริมาณของแข็งทั้งหมดของวัตถุดิบป้อนระหว่างมูลสุกรและใบยางพาราที่ทำการศึกษามี 2 ค่า คือ TS ของวัตถุดิบป้อนระหว่างมูลสุกรและใบยางพาราที่ 12% (การทดลองที่ S7) และ 20% (การทดลองที่ S10) โดยควบคุมตัวปริมาณวัตถุดิบป้อนที่ 0.15 กิโลกรัม/ครั้ง สัดส่วนวัตถุดิบป้อนระหว่างมูลสุกรและใบยางพาราที่ 50:50 และสัดส่วนวัตถุดิบเริ่มต้นระหว่างมูลสุกรและใบยางพาราที่ 100:0 จากผลการทดลองพบว่า TS วัตถุดิบป้อนที่ 12% ให้ผลได้การผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงกว่า TS วัตถุดิบป้อนที่ 20% โดยสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 11.09 ลิตร (0.18 ลิตร/วัน) ในขณะที่ TS วัตถุดิบป้อนที่ 20% สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 9.9 ลิตร (0.16 ลิตร/วัน) แสดงผลดังตารางที่ 4-3 ถ้าพิจารณาผลได้ของก๊าซมีเทนพบว่าที่ TS วัตถุดิบป้อนที่ 12% มีผลได้ของก๊าซมีเทนมากกว่าที่ TS วัตถุดิบป้อนที่ 20% ประมาณ 2 เท่า ถ้าพิจารณาการกำจัดของแข็งทั้งหมดพบว่า TS วัตถุดิบป้อนที่ 12% มีค่าการกำจัดของแข็งทั้งหมด 45.50% ในขณะที่ TS วัตถุดิบป้อนที่ 20% มีค่าการกำจัดของแข็งทั้งหมด 29.20% สาเหตุเนื่องจากที่ปริมาณ TS วัตถุดิบป้อนที่ 20% มีปริมาณของของแข็งมากเกินไป ทำให้แบคทีเรียไม่สามารถย่อยสลายอาหารได้ทั้งหมด จึงเกิดการสะสมของปริมาณของแข็งในระบบที่สูงกว่าและมี pH ของระบบต่ำกว่าด้วย ส่งผลให้มีค่าการกำจัดของแข็งทั้งหมดที่ต่ำกว่าการทดลองที่ปริมาณ TS วัตถุดิบป้อน 12%

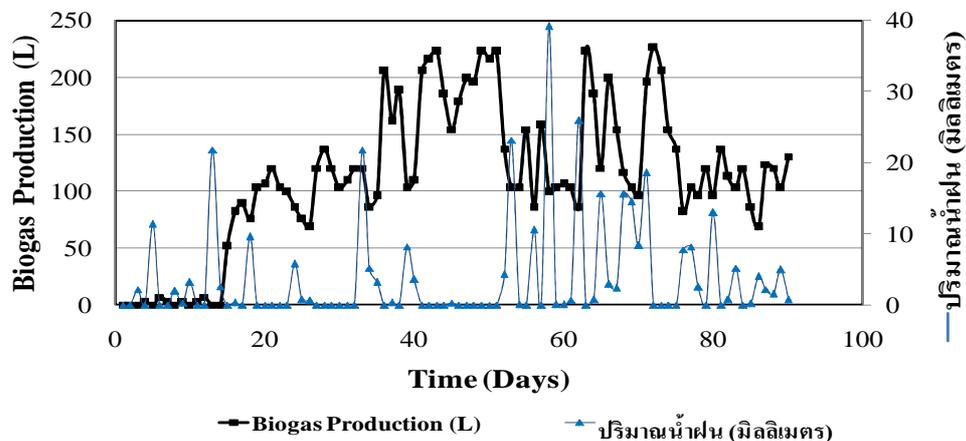
4.5 ผลการทดลองศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพขนาดต้นแบบด้วยระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง

การทดลองศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยระบบแบบกึ่งต่อเนื่องด้วยชุดการทดลองขนาดขนาดต้นแบบ โดยการหมักร่วมระหว่างมูลสุกรกับใบยางพารา โดยดำเนินการด้วยสภาวะที่เหมาะสมที่สุดจากการทดลองในกิจกรรมที่ 2 ตามลำดับ สัดส่วนเริ่มต้นระหว่างมูลสุกรกับใบยางพาราที่ 50:50 ปริมาณวัตถุดิบเริ่มต้นที่ใช้ 80 กิโลกรัม TS ของวัตถุดิบเริ่มต้นและวัตถุดิบป้อน 12% การเริ่มต้นดำเนินการระบบสำหรับการทดลองนี้ไม่มีการใช้เชื้อจุลินทรีย์ในตะกอนเริ่มต้นระบบ เมื่อดำเนินการระบบเป็นเวลา 14 วัน จะทำการป้อนวัตถุดิบเพิ่มทุกๆ 3 วัน ปริมาณวัตถุดิบป้อนครั้งละ 7.5 กิโลกรัม สัดส่วนป้อนระหว่างมูลสุกรกับใบยางพาราที่ 75:25 (ระยะเวลาการเก็บกัก 20 วัน อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2.56 Kg COD/m³/D) การทดลองในกิจกรรมนี้ได้ทำการทดลองและบันทึกผลสิ้นสุดลงเมื่อปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเริ่มคงที่ จากการทดลองไม่ได้มีการควบคุมอุณหภูมิของถังหมัก โดยได้ดำเนินการศึกษาที่สภาวะอุณหภูมิห้อง (28±3°C) ซึ่งอุณหภูมิของการดำเนินการทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพในงานวิจัยนี้อยู่ในช่วงเมโซฟิลิก (Mesophilic) ซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 20-45°C

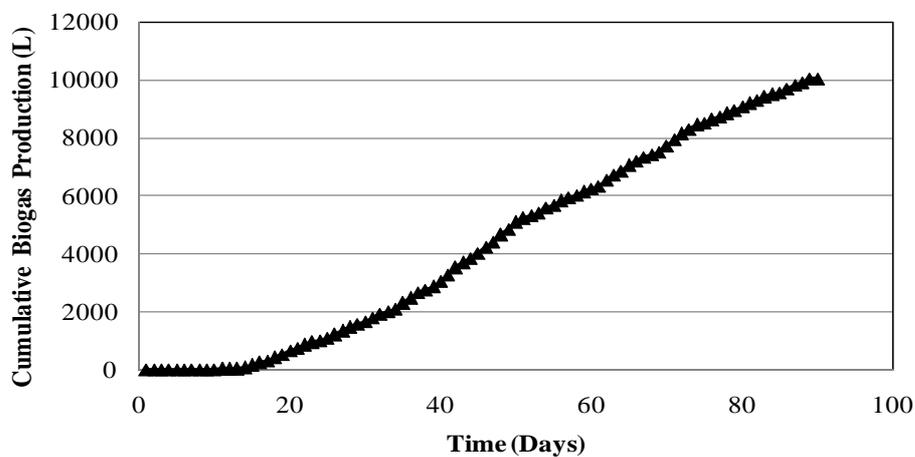
4.5.1 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จากการหมักร่วม

ในแต่ละวันวัดปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่ผลิตได้จากสเกลข้างถังเก็บก๊าซ ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้มีหน่วยลิตรต่อวัน ในช่วง 14 วันแรกของการดำเนินการทดลองสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ในปริมาณน้อย เนื่องจากใช้วัตถุดิบเริ่มต้นจากมูลสุกรและใบยางพาราเท่านั้น ไม่ได้ใช้เชื้อจุลินทรีย์จากตะกอนบ่อหมักในการเริ่มต้นระบบ ประกอบกับระดับ pH ในระบบเริ่มปรับตัวต่ำลงจนอยู่ในสภาวะที่ไม่ค่อยเหมาะสมต่อการทำงานของแบคทีเรียสร้างมีเทน ต่อมาเมื่อมีการป้อนวัตถุดิบเพิ่มทำให้ระบบมีเสถียรภาพมากยิ่งขึ้น กล่าวคือ ระดับค่า pH เริ่มปรับตัวสูงขึ้นและค่ากรดอินทรีย์ระเหยง่ายค่อยๆ ลดลง ส่งผลให้เพิ่มปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ และในช่วงวันที่ 50-70 ปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพปรับตัวลดลงอีกครั้ง ทั้งนี้เนื่องมาจากสภาพอากาศและอุณหภูมิแวดล้อมลดต่ำลง สังเกตได้จากปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จะแปรผกผันกับปริมาณน้ำฝน กล่าวคือ ในช่วงที่มีฝนตกปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพจะลดต่ำกว่าช่วงที่ไม่มีฝนตก ซึ่งก่อให้เกิดการหยุดการทำงานของแบคทีเรียสร้างมีเทน แสดงผลดังภาพประกอบที่ 4-5 ต่อมาหลังจากวันที่ 70 ของการทดลอง ก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้มีปริมาณเพิ่มขึ้น และหลังจากวันที่ 80 ของการทดลองเป็นต้นไปอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย จนกระทั่งไม่มีการเปลี่ยนแปลง

ซึ่งสอดคล้องกับระดับการเปลี่ยนแปลงกรดอินทรีย์ระเหยง่าย ตลอดการทดลองทั้งหมด 90 วัน สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ประมาณ 10,000 ลิตร (112 ลิตร/วัน) แสดงดังภาพประกอบที่ 4-6



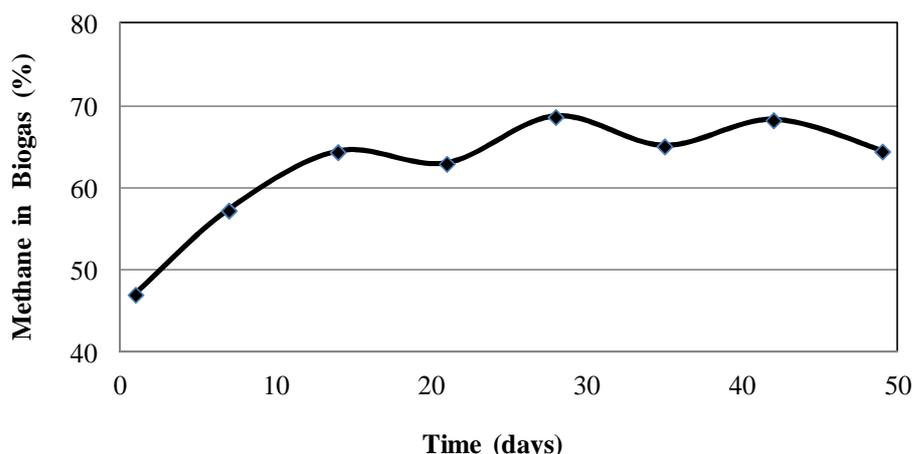
ภาพประกอบที่ 4-5 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพในระบบการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างมูลสุกรและใบยางพาราขนาดต้นแบบระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง



ภาพประกอบที่ 4-6 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมในระบบการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างมูลสุกรและใบยางพาราขนาดต้นแบบระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง

4.5.2 องค์ประกอบก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วม

ผลได้ก๊าซมีเทนมีค่า 13.53 L/g TS_{removed} ซึ่งมีค่ามากกว่าผลได้ของก๊าซมีเทนที่สภาวะเดียวกันสำหรับการทดลองในกิจกรรมที่ 2 ซึ่งมีค่า 2.07 L/g TS_{removed} ประมาณ 6 เท่า ในช่วงแรกของการทดลองก๊าซชีวภาพจะมีร้อยละของก๊าซมีเทนที่ต่ำ เนื่องจากอยู่ในช่วงการปรับตัวของแบคทีเรียและหลังจากวันที่ 30 ร้อยละก๊าซมีเทนเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก สำหรับองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพในช่วงวันที่ 15-50 พบว่ามีร้อยละก๊าซมีเทนในช่วง 62-68% มีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Prasad และ Jukka (2005) และ Rene *et al*, (2007) ซึ่งมีร้อยละมีเทนอยู่ในช่วง 58-63% และ 44-59% ตามลำดับ แสดงคุณภาพประกอบที่ 4-7 สำหรับปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้มีค่าอยู่ในช่วง 334-550 ppm ซึ่งอยู่ในช่วงที่มีค่าไม่สูงมากนักเมื่อเทียบกับกับการผลิตก๊าซชีวภาพในระดับอุตสาหกรรม ซึ่งมีค่าประมาณ 2,000 ppm ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระบบและวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพด้วย

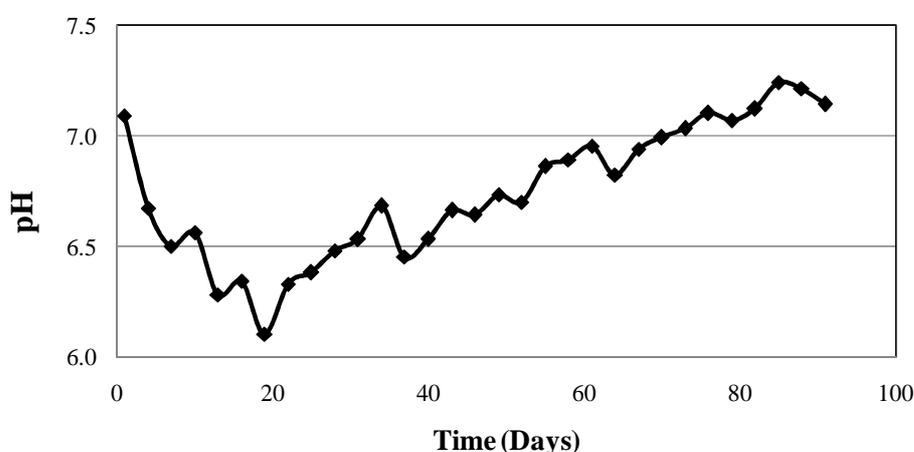


ภาพประกอบที่ 4-7 ปริมาณก๊าซมีเทนในระบบการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่าง
มูลสุกรและใบยางพาราขนาดต้นแบบระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง

4.5.3 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของระบบ

ค่า pH ของวัตถุดิบภายในถังหมักตลอดการทดลองทั้งหมด 90 วัน อยู่ในช่วงระหว่าง 6.10-7.24 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงค่า pH อยู่ในช่วงแคบๆ ซึ่งส่งผลดีต่อการทำงานของแบคทีเรียสร้างมีเทน โดยค่า pH เริ่มต้นของระบบมีค่าประมาณ 7.09 ในช่วง 20 วันแรกของการดำเนินการทดลอง ระดับ pH ภายในระบบลดลงอย่างต่อเนื่อง จนถึงระดับ pH 6.1 แต่ยังคงอยู่ในช่วงที่แบคทีเรียสร้างมีเทนสามารถทำงานได้ แสดงผลดังภาพประกอบที่ 4-8 เนื่องจากมีข้อย

สลายสารอินทรีย์ให้เป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่ายจึงทำให้ pH ลดลง (Rao *et al*, 2000) จากนั้นเมื่อเริ่มป้อนวัตถุดิบในวันที่ 14 ระดับ pH ในระบบเริ่มปรับระดับสูงขึ้นเรื่อยๆ ในช่วงหลังจากวันที่ 20 จนสิ้นสุดการทดลอง เนื่องจากเมื่อดำเนินการหมักนานขึ้นระบบจะมีเสถียรภาพและกิจกรรมของแบคทีเรียสร้างมีเทนทำให้ pH เพิ่มขึ้นและรักษาระดับความเป็นกลางภายในถังหมัก (Bouallagui *et al*, 2002) จากการทดลองจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ภายในถังหมักยังอยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการดำรงชีพของแบคทีเรียสร้างมีเทนและเหมาะสมสำหรับการย่อยสลายภายในสภาวะไร้อากาศ กล่าวคือ ระดับ pH ยังคงอยู่ในช่วง 6.5-7.5 (Acher and Kirsop, 1991)

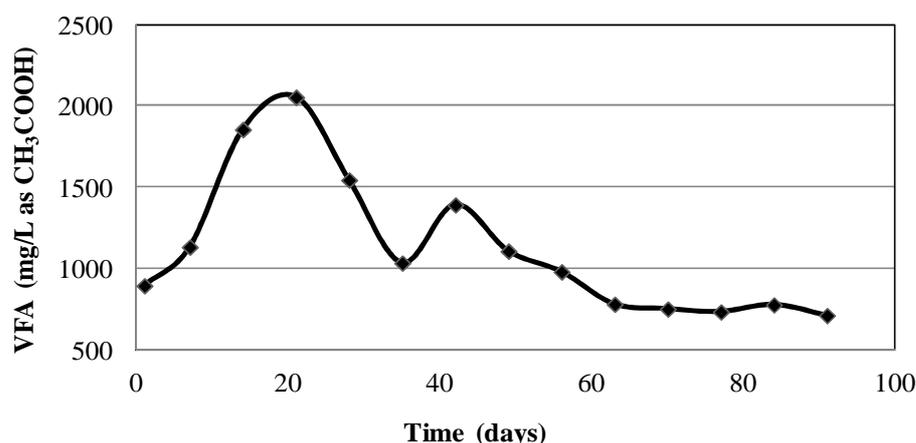


ภาพประกอบที่ 4-8 ค่า pH ในระบบสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างมูลสุกรและใบยางพาราขนาดต้นแบบด้วยระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง

4.5.4 กรดอินทรีย์ระเหยง่ายของระบบ

จากการทดลองความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายในระบบมีค่า 897 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงอยู่ในรูปกรดอะซิติก ($\text{mg/l as CH}_3\text{COOH}$) เมื่อเริ่มดำเนินการระบบในช่วง 20 วันแรกของการทดลอง ระดับของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายค่อยๆ ปรับตัวสูงขึ้น แสดงดังภาพประกอบที่ 4-9 เนื่องจากแบคทีเรียสร้างมีเทนไม่สามารถเปลี่ยนกรดอินทรีย์ระเหยง่ายเป็นก๊าซมีเทนได้ทั้งหมด จึงเกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยง่าย จากนั้นเมื่อเริ่มมีการป้อนวัตถุดิบ ในวันที่ 14 ของการทดลอง พบว่ากรดอินทรีย์ระเหยง่ายค่อยๆ ปรับตัวลดลง เนื่องจากแบคทีเรียสร้างมีเทนทำงานได้ดี สอดคล้องกับการปรับตัวสูงขึ้นของค่า pH ในช่วงวันที่ 60-90 ของการทดลอง ระดับความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายมีระดับการเปลี่ยนแปลงต่ำ สาเหตุเนื่องจากแบคทีเรียสร้างมีเทนสามารถเปลี่ยนกรดอินทรีย์ระเหยง่ายไปเป็นก๊าซมีเทนได้ดี จากผลการทดลองจะเห็นได้

ว่าปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยในการทดลองนี้มีค่าสูงสุดประมาณ 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบการผลิตก๊าซชีวภาพไม่เกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยง่าย อันส่งผลต่อการทำงานของแบคทีเรียจำพวกสร้างมีเทน (Schober *et al*, 1999)

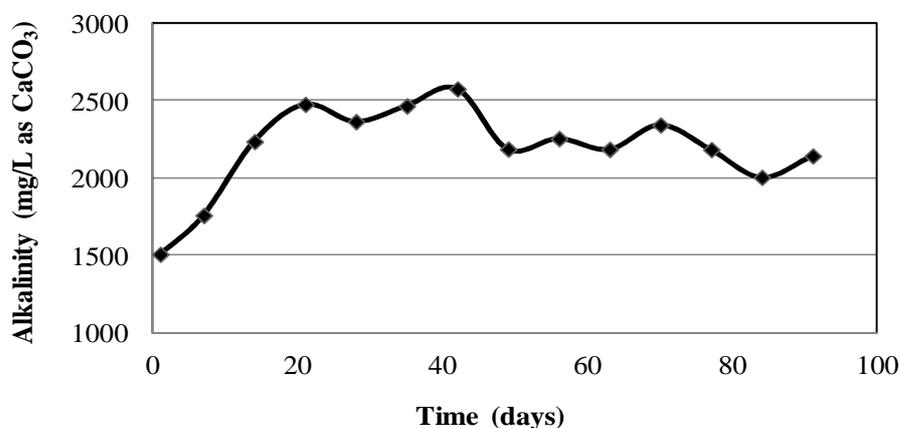


ภาพประกอบที่ 4-9 กรดอินทรีย์ระเหยง่ายในระบบการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างมูลสุกรและใบยางพาราขนาดต้นแบบระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง

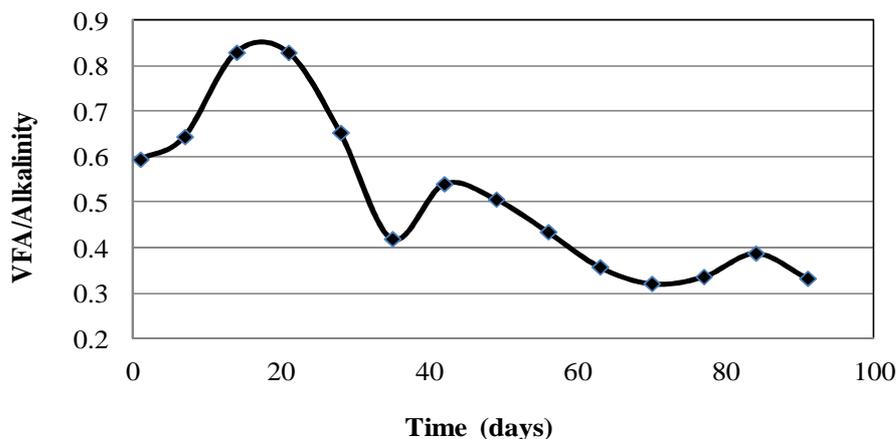
4.5.5 สภาพความเป็นด่างทั้งหมดของระบบ

จากการทดลองค่าสภาพด่างเริ่มต้นระบบมีค่า 1,509 mg/l แสดงอยู่ในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต (mg/l as CaCO₃) โดยค่าสภาพด่างเริ่มต้นที่เหมาะสมสำหรับการย่อยสลายในสภาวะไร้อากาศอยู่ในช่วง 1,000-5,000 mg/L ในช่วง 40 วันแรกของการทดลอง สภาพด่างในระบบมีการปรับตัวสูงขึ้นและมีค่าสูงสุดในวันที่ 42 ของการทดลองที่ประมาณ 2,500 mg/l แสดงดังภาพประกอบที่ 4-10 ทั้งนี้เนื่องมาจากมีการป้อนวัตถุดิบเพิ่มเข้ามาในระบบ แสดงให้เห็นว่าระบบเกิดความเป็นบัฟเฟอร์ โดยจะช่วยป้องกันแบคทีเรียพวกสร้างก๊าซมีเทนให้สามารถทนต่อกรดอินทรีย์ระเหยที่เกิดขึ้นได้ (Raynal *et al*, 1998) ในช่วงหลังจากวันที่ 40 จนถึงสิ้นสุดการทดลอง สภาพด่างของระบบเริ่มมีการปรับตัวค่อนข้างต่ำ สอดคล้องกับระดับการเปลี่ยนแปลงของ pH และกรดอินทรีย์ระเหยง่ายมีการเปลี่ยนแปลงน้อยด้วย ระบบผลิตก๊าซชีวภาพในการทดลองนี้ไม่จำเป็นต้องมีการปรับค่าสภาพความเป็นด่าง เนื่องจากวัตถุดิบภายในถังหมักมีค่าสภาพความเป็นด่างอยู่ในช่วงที่เหมาะสม แต่ถ้ามีสภาพความเป็นด่างมากเกินไปจะเกิดการสะสมของแอมโมเนีย ซึ่งจะยับยั้งการทำงานของเชื้อแบคทีเรียสร้างมีเทน

เมื่อพิจารณาค่าอัตราส่วน VFA/Alkalinity ซึ่งแสดงความสามารถของระบบที่จะรองรับการเปลี่ยนแปลงของสภาพกรดที่เกิดขึ้นได้ หากค่าอัตราส่วน VFA/Alkalinity มีค่าต่ำกว่า 1.0 ระบบจะมีเสถียรภาพในการทำงาน (Peter *et al*, 2001) และถ้ามีค่าต่ำกว่า 0.3 แสดงว่าระบบมีความเสี่ยงต่อการเกิดกรดในปริมาณที่สูง อาจทำให้ระบบล้มเหลวได้ (Borja *et al*, 2002) ตลอดระยะเวลาการทดลองพบว่า ค่าอัตราส่วน VFA/Alkalinity อยู่ในช่วง 0.32-0.83 แสดงถึงภาพประกอบที่ 4-11 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบมีความสามารถที่จะรองรับการเปลี่ยนแปลงของสภาพกรดได้ดี เนื่องจากอัตราส่วนของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายยังน้อยกว่าสภาพด่างอยู่มาก



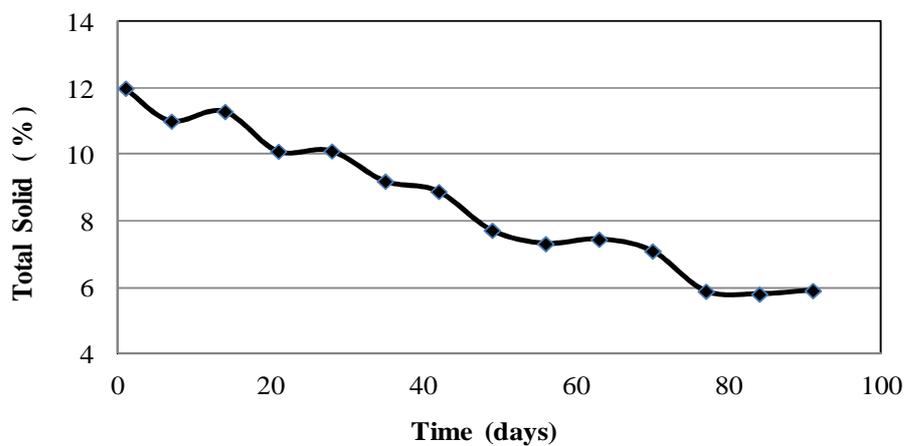
ภาพประกอบที่ 4-10 สภาพด่างในระบบการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่าง
มูลสุกรและใบยางพาราขนาดต้นแบบระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง



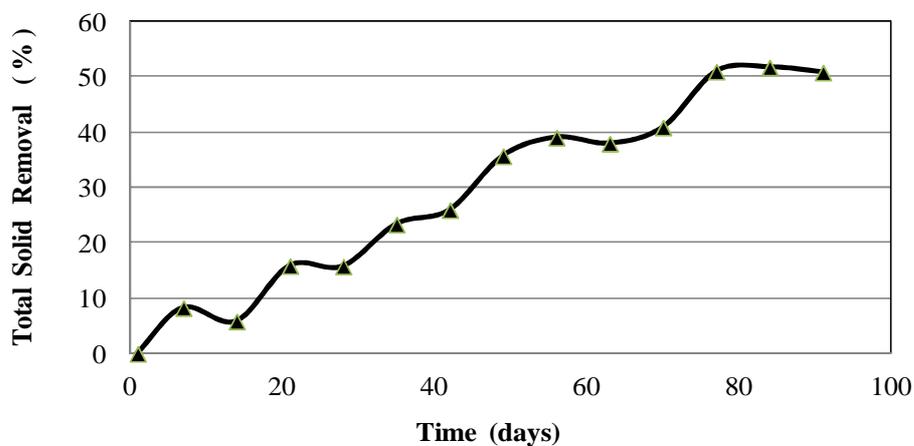
ภาพประกอบที่ 4-11 อัตราส่วนความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายต่อสภาพต่าง
ในระบบการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างมูลสุกรและไบogas พารา
ขนาดคั้นแบบระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง

4.5.6 ปริมาณของแข็งทั้งหมด

TS เริ่มต้นในการดำเนินระบบมีค่า 12% จากนั้นค่า TS ของวัตถุดิบจะค่อยๆ ลดลง เนื่องจากเกิดการย่อยสลายโดยแบคทีเรีย ในช่วงแรกของการทดลองจะมีการกำจัดของแข็งที่ไม่สูงนัก เนื่องจากมีการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายในระบบ หลังวันที่ 20 ของการทดลองเริ่มมีการกำจัดของแข็งมากยิ่งขึ้น เนื่องจากในช่วงนี้แบคทีเรียสามารถย่อยสลายสารอาหารได้ดี สอดคล้องกับปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพที่เริ่มสูงขึ้นด้วย และไม่มี การสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยง่าย จนถึงช่วงวันที่ 77 ของการทดลอง ปริมาณของแข็งทั้งหมดในระบบเริ่มมีค่าคงที่ ทั้งนี้เนื่องจากแบคทีเรียไม่สามารถย่อยสลายวัตถุดิบได้แล้ว ปริมาณของแข็งทั้งหมดและการกำจัดของแข็งทั้งหมดแสดงได้ดังภาพประกอบที่ 4-12 และ 4-13 ประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งทั้งหมดอยู่ที่ 51%



ภาพประกอบที่ 4-12 ปริมาณของแข็งทั้งหมดในระบบการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่าง
มูลสุกรและใบยางพาราขนาดต้นแบบระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง



ภาพประกอบที่ 4-13 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดในระบบการผลิตก๊าซชีวภาพจากการ
หมักร่วมระหว่างมูลสุกรและใบยางพาราขนาดต้นแบบระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง

4.6 โมเดลต้นแบบสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานระดับครัวเรือน

โมเดลต้นแบบสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพในระดับครัวเรือน สำหรับถังหมักขนาด 200 ลิตร จะทำการป้อนวัตถุดิบระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง โดยขณะเริ่มต้นการหมักจะทำการป้อนวัตถุดิบประมาณ 80 กิโลกรัม เตรียมได้จากวัตถุดิบเริ่มต้นของมูลสุกรประมาณ 5 กิโลกรัมและใบยางพาราที่ผ่านการลดขนาดแล้วประมาณ 5 กิโลกรัม น้ำประมาณ 70 ลิตร หลังจากหมักไปแล้วประมาณ 14 วัน โดยจะทำการเติมวัตถุดิบเพิ่มทุกๆ 3 วัน เตรียมได้จากมูลสุกรและใบยางพาราประมาณ 1 กิโลกรัม (มูลสุกร 3 ส่วน ใบยางพารา 1 ส่วน) และน้ำประมาณ 6.5 ลิตร ทำการกวนผสมทุกวันๆ ละครั้ง เพื่อให้การทำงานของแบคทีเรียดีขึ้น ทำการป้อนวัตถุดิบประมาณ 10 ครั้ง แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 4-5

ตารางที่ 4-5 ข้อมูลการป้อนวัตถุดิบสำหรับถังหมักระดับครัวเรือน

วันที่ดำเนินการหมัก	จำนวนครั้งที่เติมวัตถุดิบ	น้ำหนักรวมวัตถุดิบ (กิโลกรัม)		
		มูลสุกร	ใบยางพารา	น้ำ
1	1	5	5	70
14	2	0.75	0.25	6.5
17	3	0.75	0.25	6.5
20	4	0.75	0.25	6.5
23	5	0.75	0.25	6.5
27	6	0.75	0.25	6.5
30	7	0.75	0.25	6.5
33	8	0.75	0.25	6.5
36	9	0.75	0.25	6.5
39	10	0.75	0.25	6.5
42	11	0.75	0.25	6.5

สำหรับสมการที่ใช้ในการประเมินปริมาณกำลังการผลิตก๊าซชีวภาพได้จากชุดการทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพในระดับห้องปฏิบัติการระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง รายละเอียดแสดงดังสมการที่ 1 และตารางที่ 4-6 และ 4-7 ซึ่งสมการนี้จะช่วยสำหรับการประเมินกำลังการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างมูลสุกรและใบยางพาราอย่างคร่าวๆ ได้

$$Y = [A_0 + (A_1 \times C_1) + (A_2 \times C_2) + (A_3 \times C_3)] \left[\frac{(B \times 7)}{4} \right] \quad (1)$$

ตารางที่ 4-6 ข้อมูลของตัวแปรที่ใช้สำหรับสมการการประเมินกำลังการผลิตก๊าซชีวภาพ

Variable	Value
Y	ปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพ (ลิตร/วัน)
A ₀	0.595
A ₁	-0.270
A ₂	-0.041
A ₃	-0.741
C ₁	ร้อยละของใบยางพาราในวัตถุดิบเริ่มต้น
C ₂	ร้อยละของใบยางพาราในวัตถุดิบป้อน
C ₃	ปริมาณวัตถุดิบป้อน (กิโลกรัม) $= 0.15 \times \frac{B}{4}$
B	ขนาดถังหมัก (ลิตร)

ตารางที่ 4-7 ข้อมูลทางสถิติสำหรับสมการประเมินกำลังการผลิตก๊าซชีวภาพ

Variable	Value
R^2	0.8953818
R^2_{adj}	0.8326108
R_{msd}	0.0067762
Variance	0.0007439

ก๊าซชีวภาพ 1 ลูกบาศก์เมตร สามารถทดแทนก๊าซ LPG ได้ 0.46 กิโลกรัม ก๊าซ LPG หนึ่งถังขนาด 15 กิโลกรัม (ราคา 300 บาท/ถัง) สามารถใช้ประกอบอาหารต่อหนึ่งครัวเรือน (สมาชิก 3-6 คนต่อหนึ่งครัวเรือน) โดยเฉลี่ยประมาณ 3 เดือน ดังนั้น ก๊าซชีวภาพประมาณ 33 ลูกบาศก์เมตร สามารถใช้ประกอบอาหารต่อหนึ่งครัวเรือนได้ประมาณ 3 เดือน โดยเฉลี่ย 1 เดือน ปริมาณการใช้ก๊าซชีวภาพในการประกอบอาหารต่อหนึ่งครัวเรือนประมาณ 11 ลูกบาศก์เมตรและ 1 วันจะใช้ก๊าซชีวภาพประมาณ 0.37 ลูกบาศก์เมตร (370 ลิตร) หากใช้ถังหมักขนาด 200, 500, และ 1,000 ลิตร สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้เฉลี่ยประมาณ 112, 280, และ 560 ลิตร/วัน ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 4-8

ตารางที่ 4-8 ข้อมูลการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างมูลสุกรกับใบยางพาราสำหรับถังหมักขนาดต่างๆ

ขนาดถังหมัก (ลิตร)	ปริมาณการผลิต ก๊าซชีวภาพ (ลิตร/วัน)	ปริมาณวัตถุดิบ เริ่มต้น (กิโลกรัม)	ปริมาณวัตถุดิบ ป้อน (กิโลกรัม)	ค่าใช้จ่ายที่สามารถประหยัดได้ (บาท/เดือน)
200	112	80	7.5	31
500	280	200	18.75	77
1,000	560	400	37.5	155