

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 ลักษณะของกากตะกอนส่วนเกินจากโรงงานกระดาษรีไซเคิล

กากตะกอนส่วนเกินจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานกระดาษรีไซเคิลที่ศึกษา พบว่ามีปริมาณและลักษณะแตกต่างกันไปตามชนิดของกากตะกอนและรอบการผลิตของโรงงาน การศึกษาครั้งนี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์อัตราการผลิตกากตะกอน องค์ประกอบทางกายภาพและเคมี ตลอดจนความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ ทั้งนี้ เพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบในการจัดการกากตะกอนและประเมินศักยภาพการนำไปใช้ประโยชน์ในอนาคต

4.1.1 อัตราการผลิตกากตะกอนส่วนเกิน

จากตารางที่ 4.1 แสดงอัตราการผลิตกากตะกอนส่วนเกินรายเดือน พบว่าปริมาณกากตะกอนมีความผันแปรตามช่วงเวลา โดยกากตะกอนปฐมภูมิ (Primary Sludge: PS) อยู่ระหว่าง 727.5 ถึง 887.6 ตัน/เดือน กากตะกอนทุติยภูมิ (Secondary Sludge: SS) อยู่ระหว่าง 907.3 ถึง 1,202.3 ตัน/เดือน และกากตะกอนผสม (Mixed Sludge: MS) มีค่าเฉลี่ย 1,839.9 ตัน/เดือน โดยพบค่าสูงสุดในเดือน พฤศจิกายน (2,054.1 ตัน/เดือน) และต่ำสุดในเดือน กรกฎาคม (1,660 ตัน/เดือน) สะท้อนถึงความแตกต่างของปริมาณกากตะกอนที่เกิดขึ้นตามรอบการผลิต

ความผันแปรดังกล่าวสัมพันธ์กับ ความต้องการผลิตกระดาษที่เปลี่ยนแปลงตามตลาด หากมีการผลิตสูง ปริมาณกากตะกอนก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ขณะเดียวกัน ประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสีย ก็เป็นอีกปัจจัยสำคัญ หากระบบทำงานได้เสถียร ปริมาณกากตะกอนจะค่อนข้างคงที่ แต่หากเกิดความแปรปรวนหรือมีการปรับเปลี่ยนการเดินระบบ อาจทำให้กากตะกอนเพิ่มขึ้นกว่าปกติ

ตารางที่ 4.1 อัตราการเกิดกากตะกอนส่วนเกิน

เดือน	อัตราการเกิดกากตะกอน (ตัน/เดือน)		
	กากตะกอน PS	กากตะกอน SS	กากตะกอน MS
มกราคม	748.22	920.31	1,668.53
กุมภาพันธ์	889.84	1,094.51	1,984.35
มีนาคม	887.62	1,091.78	1,979.40
เมษายน	967.74	1,190.31	2,158.05
พฤษภาคม	826.88	1,017.07	1,843.95
มิถุนายน	797.35	980.75	1,778.10
กรกฎาคม	737.62	907.28	1,644.90
สิงหาคม	813.57	1,000.68	1,814.25
กันยายน	756.79	930.86	1,687.65
ตุลาคม	886.21	1,090.04	1,976.25
พฤศจิกายน	827.83	1,018.22	1,846.05
ธันวาคม	761.37	936.48	1,697.85
ค่าเฉลี่ย	825.09	1,014.86	1,839.94
S.D.	70.96	87.28	158.23

4.1.2 ลักษณะทางกายภาพและเคมีของกากตะกอนส่วนเกิน

การทดสอบลักษณะทางกายภาพและเคมีของกากตะกอนส่วนเกินจากโรงงานกระดาษรีไซเคิล (ตารางที่ 4.2) พบว่า กากตะกอน PS และกากตะกอน SS ที่เก็บตัวอย่างยังไม่ผ่านกระบวนการแยกน้ำ ทำให้มีความชื้นสูงมาก โดยกากตะกอน PS มีค่าเฉลี่ยร้อยละ 97.21 ± 1.66 และกากตะกอน SS มีค่าเฉลี่ยร้อยละ 99.02 ± 0.59 สะท้อนถึงการมีน้ำแทรกอยู่ในเนื้อกากตะกอนในปริมาณมาก ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนในทางลบ

ค่า pH ของกากตะกอน PS และกากตะกอน SS ใกล้เคียงเป็นกลาง (6.38 ± 0.54 และ 7.16 ± 0.26 ตามลำดับ) จึงอยู่ในช่วงเหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของจุลินทรีย์ ทำให้ต้องใช้สารเคมีในการปรับค่า pH เพียงเล็กน้อย ด้านองค์ประกอบ พบว่ากากตะกอน PS มีค่าของแข็งทั้งหมด (Total Solids: TS) ร้อยละ 2.81 ± 1.69 และค่าของแข็งระเหยง่ายทั้งหมด (Total Volatile Solids: TVS) ร้อยละ 54.57 ± 10.93 แสดงถึงสัดส่วนสารอินทรีย์ที่สูงกว่ากากตะกอน SS อย่างมีนัยสำคัญ โดยกากตะกอน SS มีค่า TS เฉลี่ยเพียงร้อยละ 1.02 ± 0.63 และค่า TVS ร้อยละ 29.17 ± 13.76

ในด้านธาตุอาหาร พบว่ากากตะกอน SS มีปริมาณไนโตรเจนในรูปของค่าที่เคเอ็น (Total Kjeldahl Nitrogen: TKN) สูงกว่ากากตะกอน PS ถึงสามเท่า ขณะที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อ

ไนโตรเจน (C/N ratio) ของกากตะกอน PS สูงถึง 301.25 ซึ่งเกินกว่าช่วงที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน (20:1 ถึง 30:1) อย่างมาก และอาจทำให้จุลินทรีย์ใช้ในไนโตรเจนหมดเร็วก่อนที่คาร์บอนถูกย่อยสลายจนหมด ส่งผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ ตามงานวิจัยของ Lopes et al. (2018)

กากตะกอนทั้งสองชนิดยังมีแคลเซียมและแมกนีเซียมในระดับไม่เป็นพิษต่อระบบย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน และมีค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) ค่อนข้างสูงในรูป HCO_3^- ซึ่งช่วยเพิ่มความสามารถในการตกตะกอนของไอออนบวก เช่น Ca^{2+} และช่วยรักษาเสถียรภาพของระบบในระยะ acidogenesis ขณะเดียวกัน สัดส่วน VFA ต่อ TCOD ของกากตะกอน PS และกากตะกอน SS อยู่ที่ 0.37 และ 0.47 ตามลำดับ บ่งชี้ถึงการมีสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่จุลินทรีย์สามารถย่อยได้รวดเร็ว (Orhon & Cokgor, 1997) โดย Duarte et al. (2021) รายงานว่า สัดส่วน VFA ต่อ SCOD ที่ร้อยละ 30 ถึง 37 ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนได้ร้อยละ 20 ถึง 25 และไม่ก่อให้เกิดการยับยั้ง หากไม่สูงเกินร้อยละ 50 (Magdalena et al., 2019)

เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ เช่น Chakraborty et al. (2019), Kaur et al. (2020) และ Turner et al. (2022) พบว่ากากตะกอนในงานนี้ มีความชื้นเฉลี่ยสูงกว่ามาก โดยเฉพาะกากตะกอน PS ที่มีค่าเกินช่วงร้อยละ 17.50 ถึง 85 ขณะที่กากตะกอน SS มีความชื้นสูงกว่าอยู่ในช่วงร้อยละ 53 ถึง 99 ค่า pH ของกากตะกอน PS ต่ำกว่าค่ากลางที่รายงาน (7.39 โดย Chakraborty et al., 2019) ส่วนค่า TS และค่า TVS ทั้งกากตะกอน PS และกากตะกอน SS อยู่ในระดับต่ำกว่าหลายงานวิจัยก่อนหน้านี้ โดยค่า TS ของกากตะกอน PS เฉลี่ยเพียงร้อยละ 2.81 เทียบกับค่าที่สูงถึงร้อยละ 80 ในบางรายงาน ขณะที่ค่า TVS ของกากตะกอน SS ต่ำกว่าช่วงร้อยละ 65 ถึง 97 อย่างมีนัยสำคัญ

ในด้านค่า C/N ratio พบว่ากากตะกอน PS มีค่าเฉลี่ยสูงเกินไปมาก เมื่อเทียบกับช่วงเหมาะสม (20:1 ถึง 30:1) และยิ่งสูงกว่าช่วง 32:1 ถึง 943:1 ที่ Lopes et al. (2018) และ Kaur et al. (2020) รายงานไว้อย่างมีนัยสำคัญ สะท้อนถึงความไม่สมดุลของธาตุอาหารในกากตะกอนส่วนเกินจากโรงงานกระดาษรีไซเคิล ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการผลิตก๊าซชีวภาพในระดับอุตสาหกรรม ดังนั้นจึงควรพิจารณาการปรับสมดุลธาตุอาหาร หรือการผสมกากตะกอนส่วนเกินทั้งสองชนิดเพื่อให้เหมาะสมต่อการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนต่อไป

ตารางที่ 4.2 ลักษณะกากตะกอนส่วนเกินจากโรงงานกระดาษรีไซเคิลในงานวิจัยนี้

พารามิเตอร์	ประเภทกากตะกอน		
	กากตะกอน PS	กากตะกอน SS	กากตะกอน MS
Moisture (%wt.)	97.21 ± 1.66	99.02 ± 0.59	61.26
pH	6.38 ± 0.54	7.16 ± 0.26	N/A
TCOD (mg/L)	54,994.98 ± 35,292.57	4,437.78 ± 5,093.27	N/A
SCOD (mg/L)	6,330.60 ± 3,848.32	2,594.24 ± 4,168.05	N/A
TS (%wt.)	2.81 ± 1.69 (28,774.33 ± 17,286.29 mg/L)	1.02 ± 0.63 (10,061.67 ± 6,180.56 mg/L)	38.74
TVS (%TS)	54.57 ± 10.93 (16,524.67 ± 11,039.06 mg/L)	29.17 ± 13.76 (3,451.67 ± 2,906.73 mg/L)	59.21
TKN (mg/L)	37.82 ± 15.72	115.80 ± 110.92	N/A
Alkalinity (mg CaCO ₃ /L)	1,170 – 7,380	751.67 – 2,790.5	N/A
Ca (mg/L)	2.07 – 8.17 0.83 – 1.04 (mg/g)	1.13 – 7.40 0.57 – 0.75 (mg/g)	N/A
Mg (mg/L)	0.61 0.067 (mg/g)	0.58 0.063 (mg/g)	N/A
VFA (mg CH ₃ COOH/L)	2,341	1,225.2	N/A
C/N ratio	301.25	18.14	N/A
Higher Heating Value (MJ/kg)	N/A	N/A	7.4

หมายเหตุ N/A = ไม่มีข้อมูลรายงาน

ตารางที่ 4.3 ลักษณะกากตะกอนหลังการผสมที่สัดส่วนผสมต่าง ๆ (PS:SS)

พารามิเตอร์	สัดส่วนผสม (PS:SS)				
	1:0	3:1	1:1	1:3	0:1
Moisture (%)	95.41 ± 0.77	95.65 ± 0.04	97.33 ± 0.08	98.47 ± 0.01	99.70 ± 0.01
pH	6.02 ± 0	6.26 ± 0	6.51 ± 0	6.95 ± 0.01	7.46 ± 0.03
TCOD (mg/L)	68,729 ± 1,574.77	53,265 ± 2,976.03	37,801 ± 5,952.06	22,337 ± 2,976.03	10,310 ± 2,232.02
SCOD (mg/L)	10,774 ± 6,494.04	9,764 ± 583.18	8,754 ± 3,247.02	7,744 ± 583.18	7,407 ± 1,166.36
TS (mg/L)	26,513 ± 127.28	24,661 ± 353.55	22,392 ± 671.75	18,972 ± 176.78	14,513 ± 1,626.35
TVS (mg/L)	16,739 ± 240.42	14,480 ± 176.78	12,878 ± 452.55	10,021 ± 21.21	6,283 ± 664.68
TSS (mg/L)	16,739	10,181	9,514	8,951	8,230
TKN (mg/L)	37.35 ± 2.89	163.39 ± 7.01	154.92 ± 10.73	145.00 ± 4.95	37.64 ± 1.65
Alkalinity (mg CaCO ₃ /L)	7,380 ± 355.07	7,311.67 ± 236.71	4,646.67 ± 118.36	2,186.67 ± 313.14	751.67 ± 118.36
VFA (mg CH ₃ COOH/L)	2,341.18 ± 115.71	2,045.47 ± 67.55	2,579.16 ± 317.17	1,769.28 ± 140.97	1,225.20 ± 52.86
C/N ratio	1,840.35	326.01	243.99	154.04	273.91
TMP (mL CH ₄ /g VS _{fed})	1,437.07	1,284.48	1,027.36	780.16	574.33

หมายเหตุ TMP: Theoretical Methane Potential ที่สภาวะ STP (Metcalf & Eddy, 2003)

จากตารางที่ 4.3 พบว่า การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนผสมกากตะกอน PS:SS (1:0, 3:1, 1:1, 1:3 และ 0:1) ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของกากตะกอนอย่างมีนัยสำคัญ โดยเมื่อเพิ่มสัดส่วนของกากตะกอน SS พบว่า ความชื้นมีแนวโน้มสูงขึ้น ในขณะที่ค่า TCOD, TS และ TVS ซึ่งสะท้อนปริมาณของแข็งและสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ มีแนวโน้มลดลง ค่า pH เปลี่ยนจากกรดเล็กน้อย (การย่อยสลายกากตะกอน PS เชิงเดี่ยว) ไปสู่ค่าที่ใกล้เคียงกลาง (การย่อยสลายกากตะกอน SS เชิงเดี่ยว) ซึ่งอาจส่งผลดีต่อการทำงานของจุลินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน

สำหรับค่า Alkalinity และค่ากรดไขมันระเหยง่าย (Volatile Fatty Acid: VFA) มีแนวโน้มลดลงเมื่อสัดส่วนกากตะกอน SS เพิ่มขึ้น แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงในสมดุลของระบบ

บัพเฟอร์และสารตั้งต้นในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน ส่วนค่า C/N ratio พบว่า ในสัดส่วนผสม 1:3 มีค่าลดต่ำสุดเมื่อเทียบกับสัดส่วนผสมอื่น ๆ แม้ยังไม่อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ แต่ก็สะท้อนถึงความแตกต่างของศักยภาพในการย่อยสลายอย่างมีนัยสำคัญ

ดังนั้น การผสมกากตะกอน PS และกากตะกอน SS ส่งผลโดยตรงต่อลักษณะของ กากตะกอนและอาจมีผลต่อศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งจึงมีการศึกษาต่อในหัวข้อ 4.1.3 เพื่อตรวจสอบกลไกการย่อยสลายทางชีวภาพโดยละเอียด

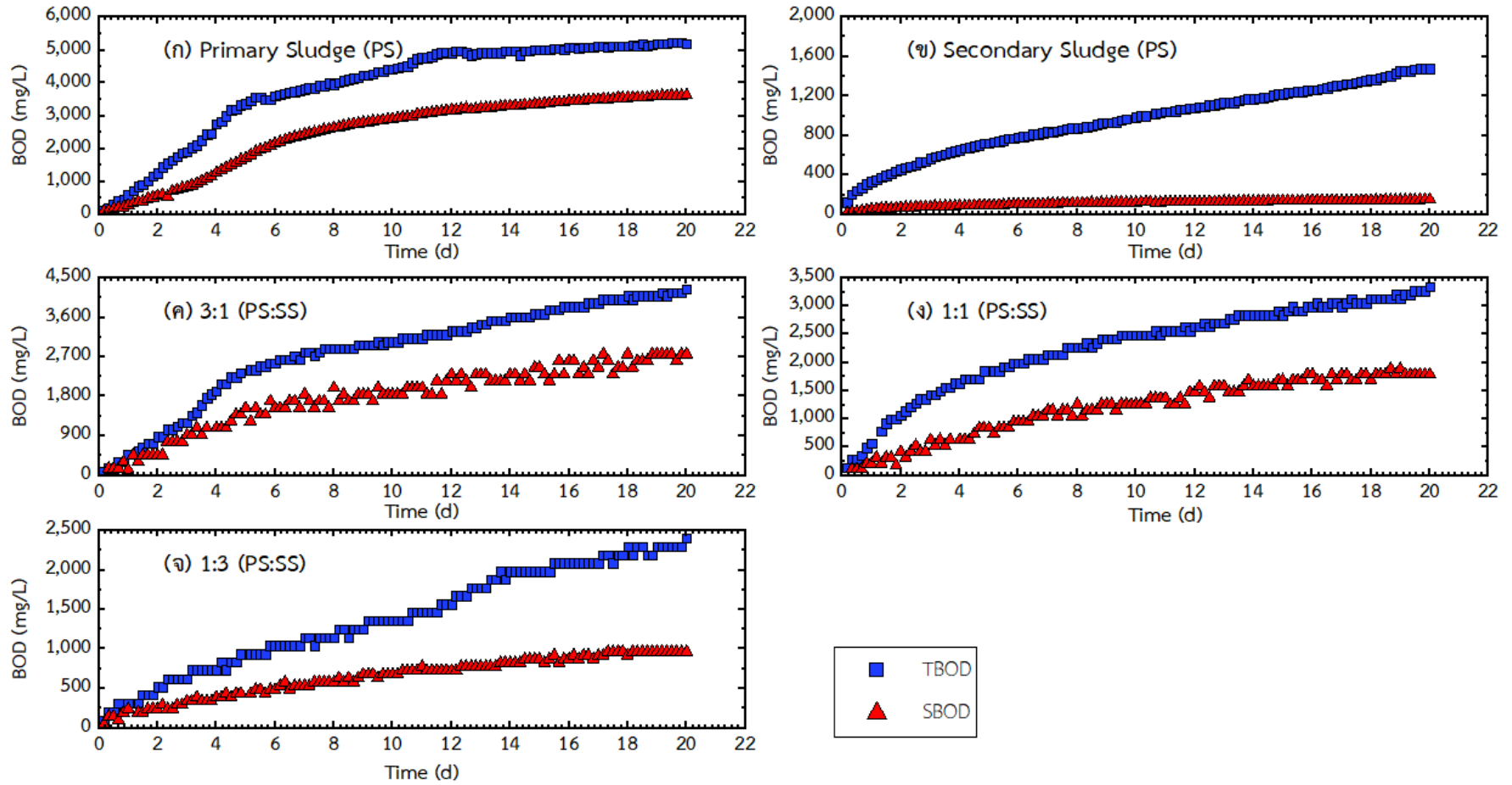
4.1.3 ความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของกากตะกอนส่วนเกิน

การศึกษาความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของสัดส่วนผสมต่าง ๆ ได้จากการวิเคราะห์สัดส่วนซีโอดี (COD Fractions) และการทดสอบค่าบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand: BOD) 20 วัน หรือ BOD_{ultimate} ด้วยวิธี Oxitop Method ซึ่งให้ผลดังนี้

4.1.3.1 บีโอดีของกากตะกอน

จากการวิเคราะห์ BOD₂₀ ด้วยวิธี Oxitop Method ที่สัดส่วนการผสม กากตะกอน PS:SS เท่ากับ 1:0, 3:1, 1:1, 1:3 และ 0:1 พบว่ามีค่า TBOD₂₀ เท่ากับ 5,190; 4,248.64; 3,344.04; 2,401.30 และ 1,475.50 มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L) ตามลำดับ ขณะที่ค่า SBOD₂₀ มีค่า 3,629; 2,763.52; 1,787.80; 967 และ 150 mg/L ตามลำดับ (รูปที่ 4.1)

เมื่อคำนวณอัตราส่วน SBOD₂₀ พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.70, 0.65, 0.57, 0.42 และ 0.10 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าในสัดส่วนผสม 1:0, 3:1 และ 1:1 สารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพส่วนใหญ่อยู่ในรูปสารละลายที่สามารถย่อยสลายได้อย่างรวดเร็ว (Readily Soluble Biodegradable) ขณะที่ในสัดส่วนผสม 1:3 และ 0:1 สารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพอยู่ในรูปอนุภาคที่ต้องใช้เวลาย่อยสลายนานกว่า (Slowly Particulate Biodegradable) ซึ่งสามารถอธิบายสัดส่วนของ COD Fractions โดยละเอียดได้ในหัวข้อ 4.1.3.2



รูปที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงค่าความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมี 20 วัน (BOD_{20}) ของกากตะกอนผสมที่สัดส่วนผสมต่างๆ (PS:SS)

ตารางที่ 4.4 COD fractions ของกากตะกอนผสมที่สัดส่วนผสมต่าง ๆ (PS:SS)

COD Fractions	สัดส่วนผสม (PS:SS)									
	1:0		0:1		3:1		1:1		1:3	
	(mg/L)	(%TCOD)	(mg/L)	(%TCOD)	(mg/L)	(%TCOD)	(mg/L)	(%TCOD)	(mg/L)	(%TCOD)
Total COD	14,900	100	1,783	100	10,527.78	100	7,030.00	100	4,172.52	100
Biodegradable COD	5,190	34.83	1,475.50	82.75	4,248.64	40.36	3,344.04	47.57	2,401.30	57.55
BPCOD	1,561	10.48	1,325.50	74.34	1,485.12	14.11	1,556.24	22.14	1,434.30	34.37
BSCOD	3,629	24.36	150	8.41	2,763.52	26.25	1,787.80	25.43	967.00	23.18
Non-Biodegradable COD	9,710	65.17	307.50	17.25	6,279.14	59.64	3,685.96	52.43	1,771.22	42.45
UPCOD	9,189	61.67	244.50	13.71	6,204.99	58.94	3,584.00	50.98	1,719.51	41.21
USCOD	521	3.50	63	3.53	74.15	0.70	101.96	1.45	51.71	1.24

หมายเหตุ Biodegradable Particulate COD (BPCOD); Biodegradable Soluble COD (BSCOD); Unbiodegradable Particulate COD (UPCOD); Unbiodegradable Soluble COD (USCOD)

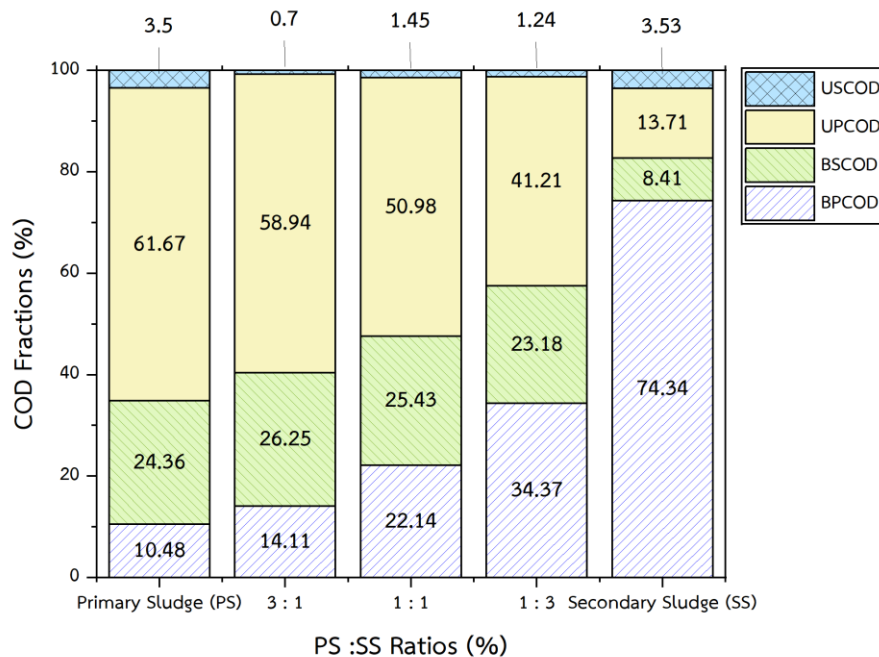
4.1.3.2 สัดส่วนซีโอดี (COD Fractions) ของกากตะกอน

การประเมินสัดส่วนของ COD ในกากตะกอนผสมจากโรงงานกระดาษรีไซเคิลที่สัดส่วนผสมกากตะกอน PS:SS เท่ากับ 1:0, 3:1, 1:1, 1:3 และ 0:1 (ตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.2) พบว่า ค่าอัตราส่วน $TBOD_{20}/TCOD$ เท่ากับ 0.35, 0.40, 0.48, 0.58 และ 0.83 ตามลำดับ แสดงว่าส่วนผสม 1:0, 3:1 และ 1:1 มีสารอินทรีย์ในรูป TCOD ที่ย่อยสลายได้ยากเป็นส่วนใหญ่ ขณะที่ค่า $SBOD_{20}/SCOD$ เท่ากับ 0.87, 0.97, 0.95, 0.95 และ 0.70 ตามลำดับ บ่งชี้ว่าสารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปละลายสามารถย่อยสลายได้ง่ายเป็นส่วนใหญ่ ทั้งนี้ จากงานของ Racho & Pongampornnara (2020) ระบุว่า อัตราส่วน BOD/COD มากกว่า 0.45 ถือว่ามีความสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ดี, 0.30 ถึง 0.45 ค่อนข้างดี, 0.20 ถึง 0.30 ย่อยสลายได้ และน้อยกว่า 0.20 ไม่เหมาะสมต่อการย่อยสลายทางชีวภาพ

ผลการวิเคราะห์ยังพบว่าในสัดส่วนผสม 1:3 และ 0:1 มี Biodegradable COD เท่ากับร้อยละ 57.55 และร้อยละ 82.75 ของ TCOD ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าค่าที่รายงานในวรรณกรรม เช่น Cokgor et al. (2006) (ร้อยละ 25.64 ถึง 57.37) และ Ciaciuch et al. (2017) (ร้อยละ 35) อย่างมีนัยสำคัญ โดยสัดส่วน 1:3 และ 0:1 ประกอบด้วย BSCOD (ย่อยสลายได้เร็ว) ร้อยละ 23.18 และ ร้อยละ 8.41 ของ TCOD และ BPCOD (ย่อยสลายได้ช้า) ร้อยละ 34.37 และ ร้อยละ 74.34 ของ TCOD ซึ่งสูงกว่าค่ารายงานของ Cokgor et al. (2006) (ร้อยละ 12.17 ถึง 14.25) อย่างมีนัยสำคัญ ส่วน COD ที่ไม่สามารถย่อยสลายได้มีเพียง ร้อยละ 42.45 และ ร้อยละ 17.25 ของ TCOD ตามลำดับ ขณะที่ UPCOD ของกากตะกอน PS อยู่ที่ร้อยละ 61.67 อยู่ในช่วงที่รายงานไว้ก่อนหน้านี้ (ร้อยละ 41.71 ถึง 73.43; Cokgor et al., 2006) สะท้อนว่ากากตะกอน PS มีองค์ประกอบสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยากมากกว่ากากตะกอน SS นอกจากนี้ ที่สัดส่วนผสมกากตะกอนที่ 1:1 มี BCOD ที่แตกต่างจาก 1:3 อย่างมีนัยสำคัญ

ดังนั้น การผสมกากตะกอน SS เข้ากับกากตะกอน PS ช่วยลดสัดส่วน COD ที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ และเพิ่มศักยภาพในการย่อยสลายของระบบโดยรวม โดยเฉพาะสัดส่วนผสม 1:3 ที่ให้ Biodegradable COD สูงถึงร้อยละ 57.55 แม้ว่าสัดส่วนผสม 0:1 จะให้ค่า Biodegradable COD สูงสุด แต่ก็อาจมีข้อจำกัดด้านเสถียรภาพและสมดุลสารอาหารสำหรับจุลินทรีย์

อย่างไรก็ตาม สัดส่วนผสม 1:3 เป็นอัตราส่วนที่ใกล้เคียงกับสัดส่วนที่เกิดขึ้นจริงในระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานกระดาษรีไซเคิล (1:1.23; PS:SS) ทำให้ผลการศึกษานี้มีความสอดคล้องกับสภาพการเดินระบบจริง และแม้จะให้ค่า Biodegradable COD เป็นอันดับสอง แต่ถือว่าน่าสนใจอย่างยิ่งในมุมมองของการจัดการกากตะกอนในภาพรวม เนื่องจากสะท้อนศักยภาพที่สามารถนำไปปรับใช้ได้จริงในระดับอุตสาหกรรม



รูปที่ 4.2 สัดส่วนซีโอดีในกากตะกอนผสมอัตราส่วนต่าง ๆ (PS:SS)

4.2 การศึกษาศักยภาพการเกิดก๊าซมีเทนทางชีวเคมี

(Biochemical Methan Potential Test: BMP Test)

การทดสอบ BMP Test ถูกนำมาใช้เพื่อประเมินปริมาณก๊าซชีวภาพที่สามารถผลิตได้จากกากตะกอนส่วนเกินของโรงงานกระดาษรีไซเคิลภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน โดยมุ่งเน้นการวิเคราะห์ผลของสัดส่วนผสมกากตะกอน PS:SS ต่อศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ ข้อมูลที่ได้ยังถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์เชิงจลนพลศาสตร์ เพื่อเปรียบเทียบความเหมาะสมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อธิบายกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน ตลอดจนประยุกต์ค่าพารามิเตอร์ที่ได้ไปใช้ในการออกแบบระบบถังกวนผสมแบบสองขั้นตอน (Two-stage Continuous Stirred Tank Reactor: Two-stage CSTR) ให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

4.2.1 ผลของสัดส่วนผสมต่อศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ

ผลการประเมินศักยภาพการเกิดก๊าซมีเทนจาก BMP Test ที่สัดส่วนผสมกากตะกอน PS:SS เท่ากับ 1:0, 3:1, 1:1, 1:3 และ 0:1 (รูปที่ 4.3) พบว่าปริมาณก๊าซมีเทนสะสม (Cumulative CH₄) เท่ากับ 23,684; 36,394; 38,510; 39,973 และ 32,188 ml CH₄ ตามลำดับ โดยสัดส่วนผสม 1:3 ให้ค่ามีเทนสะสมสูงที่สุดเมื่อเทียบกับสัดส่วนผสมอื่น ๆ

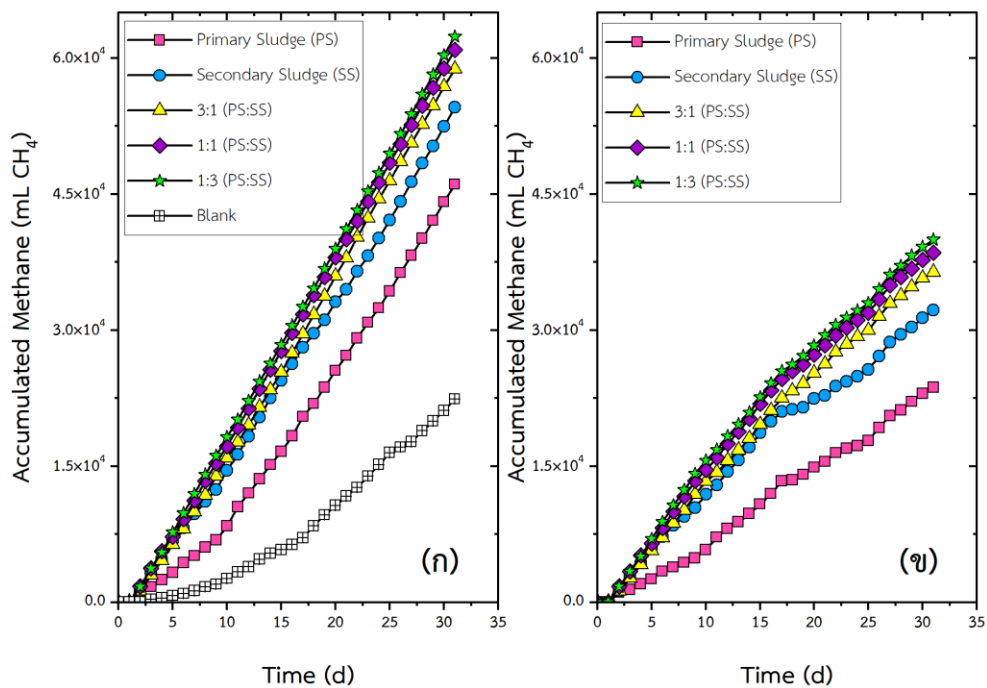
เมื่อพิจารณาผลผลิตมีเทน (Methane Yield) ในหน่วย $\text{ml CH}_4/\text{g VS}_{\text{fed}}$ (ตารางที่ 4.5) พบว่าแต่ละสัดส่วนผสมมีค่า 315.43, 576.96, 689.66, 918.66 และ 1,170.59 ตามลำดับ โดยการย่อยสลายกากตะกอน SS เชิงเดี่ยว (0:1) ให้ค่า Methane Yield สูงที่สุด และมีค่า VS removal ร้อยละ 78.11 ซึ่งสูงกว่าที่รายงานในงานวิจัยของ Saha et al. (2011) และ Lin et al. (2011) ที่อยู่ในช่วงร้อยละ 10 ถึง 73 และสูงกว่าค่าที่รายงานโดย Bayr & Rintala (2012), Veluchamy & Kalamdhad (2017) และ Lopes et al. (2018) (44.8 ถึง 417 ml CH_4 อย่างมีนัยสำคัญ) อย่างไรก็ตาม สัดส่วนผสม 1:3 ก็ให้ค่า Methane Yield และก๊าซมีเทนสะสมสูงกว่าสัดส่วนผสมอื่น ๆ รวมทั้งการย่อยสลายกากตะกอน PS เชิงเดี่ยว

ผลการทดสอบทางสถิติยืนยันว่า ค่าเฉลี่ย Methane Yield ของสัดส่วนผสม 3:1 แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญจากสัดส่วนผสม 1:1 และ 1:3 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ส่วนคู่เปรียบเทียบกับอื่น ๆ ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ขณะเดียวกัน กากตะกอนที่สัดส่วนผสม 1:1 และ 1:3 ไม่แตกต่างกันในด้านประสิทธิภาพการกำจัด TCOD ซึ่งสอดคล้องกับ Sun et al. (2022) ที่รายงานว่า กากตะกอน SS มีศักยภาพการเกิดมีเทนสูงกว่ากากตะกอน PS และการรวมหมักที่สัดส่วนผสมของกากตะกอนส่วนเกินเหมาะสม (ที่ 1:3) ช่วยเสริมศักยภาพการเกิดมีเทนมากกว่าสัดส่วนผสมอื่น ๆ

เมื่อเปรียบเทียบกับค่า TMP (Theoretical Methane Potential) ตามตารางที่ 4.3 พบว่า TMP มีแนวโน้มลดลงเมื่อสัดส่วนกากตะกอน SS เพิ่มขึ้น โดยสัดส่วนผสม 1:0 (PS) ให้ค่า TMP สูงสุด 1,437.07 $\text{ml CH}_4/\text{g VS}_{\text{fed}}$ และลดลงเหลือ 574.33 $\text{ml CH}_4/\text{g VS}_{\text{fed}}$ ที่สัดส่วนผสม 0:1 (SS) ซึ่งสะท้อนว่าแม้ค่า TMP ของกากตะกอน SS จะต่ำกว่ากากตะกอน PS อย่างมีนัยสำคัญ แต่ผลการทดลองกลับพบ Methane Yield สูงขึ้นในบางสัดส่วนผสม โดยเฉพาะ 1:3 และ 0:1 แสดงถึง synergistic effect จากการปรับสมดุลค่า C/N ratio และการมีสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ง่ายในกากตะกอน SS ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการรวมหมัก

อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate: OLR) ที่แตกต่างกันในแต่ละสัดส่วนผสมกากตะกอน PS:SS มีผลต่อศักยภาพการเกิดก๊าซมีเทน โดยสัดส่วนผสมที่มีค่า OLR สูงขึ้นในระดับที่ระบบยังรับภาระได้จะกระตุ้นให้จุลินทรีย์เมทาโนเจนผลิตก๊าซมีเทนได้มากขึ้น เนื่องจากมีปริมาณซับสเตรตหรือสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น แต่เมื่อค่า OLR อยู่ในระดับที่ไม่สมดุลกับสัดส่วนผสมของกากตะกอนหรือศักยภาพของจุลินทรีย์ จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์และการสร้างก๊าซชีวภาพลดลง แสดงให้เห็นว่าการกำหนดค่า OLR ที่เหมาะสมสำหรับแต่ละสัดส่วนผสมเป็นปัจจัยสำคัญต่อการได้ผลผลิตก๊าซมีเทนที่เสถียรและสูงสุดในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน

อย่างไรก็ตาม แม้การทดลองในงานวิจัยนี้ใช้ค่า OLR ค่อนข้างต่ำ (0.2 ถึง 0.54 kg-VS/m³-day) และระยะเวลาที่เก็บ (Hydraulic Retention Time: HRT) เท่ากับ 31 วัน แต่กลับให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายและการผลิตก๊าซมีเทนสูงกว่าในหลายกรณี เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ใช้ค่า OLR สูงกว่า (1 ถึง 3.7 kg VS/m³-day; Bayr & Rintala, 2012) สะท้อนถึงศักยภาพของการร่วมหมักกากตะกอน PS และกากตะกอน SS ที่มีแนวโน้มเสริมฤทธิ์กันในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน



รูปที่ 4.3 ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมจาก BMP Test โดย (ก) แสดงผลผลิตก๊าซมีเทนสะสม และ (ข) แสดงผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมหลังหักค่าจากสภาวะควบคุม

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้ศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนและผลการทดลองจากงานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง

พารามิเตอร์	สัดส่วนผสม (PS:SS) (การศึกษานี้)					สัดส่วนผสม (PS:SS) (งานวิจัยที่ใช้อ้างอิง)				
	1:0	3:1	1:1	1:3	0:1	Bayr & Rintala (2012), Veluchamy & Kalamdhad (2017), Lopes et al. (2018), Bokhary et al. (2021), Bokhary et al. (2022)	Saha et al. (2011)	Hagelqvist (2013)	Bayr & Rintala (2012)	Lin et al. (2011), Karlsson et al. (2011), Elliott & Mahmood (2012), Bayr & Rintala (2012), Lopes et al. (2018)
						1:0	3:2	1:1	2:3	0:1
HRT (d)	31	31	31	31	31	3 -32	21	19	25-31	14 - 30
OLR (kg VS/m ³ -day)	0.54	0.47	0.42	0.32	0.2	1- 3.7	1.98	-	1	1.4 – 18.9
VS removal (%)	46.47	76.11	56.55	12.88	78.11	15.73 - 71	10	50	70	29 – 73
Methane Yield (ml CH ₄ /g VS _{fed})	315.43	576.96	689.66	918.66	1,170.59	44.8-417	55	84	70	100 -519

ตารางที่ 4.6 ค่าเฉลี่ย TCOD และค่าของแข็ง (TS, TVS) ของกากตะกอนผสมก่อนและหลังการทดสอบ BMP Test

สัดส่วนผสม (PS:SS)	TCOD Removal (%)	TS Removal (%)	TVS Removal (%)	pH (Inlet-Outlet)	VFA/Alkalinity (Inlet-Outlet)
1:0	66.94	51.66	46.47	6.02 - 7.75	0.32 - 0.16
3:1	73.79	65.57	76.11	6.26 - 7.63	0.28 - 0.10
1:1	50.83	31.38	56.55	6.51 - 7.56	0.56 - 0.09
1:3	53.62	19.01	12.88	6.95 - 7.48	0.81 - 0.12
0:1	20.44	43.74	78.11	7.46 - 7.90	1.63 - 0.16
Blank	39.39	31.74	7	8.72 - 7.69	0.25 - 1.11

4.2.2 ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์และเสถียรภาพของระบบ BMP test

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบผลิตก๊าซชีวภาพใช้ค่า COD removal และค่า VS removal เป็นหลัก ดังตารางที่ 4.6 โดยค่า TCOD ของสัดส่วนผสมกากตะกอน PS:SS ที่ 1:0, 3:1, 1:1, 1:3 และ 0:1 มีค่าเฉลี่ย 67,903.78, 52,749.14, 37,594.50, 22,439.86 และ 10,652.92 mg/L ตามลำดับ แสดงถึงปริมาณสารอินทรีย์สูงสุดที่สามารถเปลี่ยนเป็นก๊าซชีวภาพได้

ประสิทธิภาพการกำจัด TCOD เฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 66.94, 73.79, 50.83, 53.62 และ 20.44 ตามลำดับ โดย Blank มีค่าร้อยละ 39.39 ซึ่งสูงกว่าการย่อยสลายกากตะกอน SS เชิงเดี่ยว (0:1) แต่ต่ำกว่าทุกสัดส่วนผสมที่มีกากตะกอน PS แสดงให้เห็นว่าการใช้กากตะกอน PS เดี่ยว หรือผสมเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลาย COD ได้ดีกว่า อีกทั้งยังพบว่า TCOD ของสารตั้งต้นลดลงตามสัดส่วนผสมที่ใช้กากตะกอน PS น้อยลง สอดคล้องกับภาวะบรรทุอินทรีย์ที่ลดลง และสัมพันธ์กับ Biodegradable fractions (Sun et al., 2022)

สำหรับค่า TVS removal เฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 46.47, 76.11, 56.55, 12.88 และ 78.11 ตามลำดับ โดยการย่อยสลายกากตะกอน PS เชิงเดี่ยวให้ค่าต่างจากสัดส่วนผสม 1:1 อย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่ 3:1 ไม่ต่างจากการย่อยสลายกากตะกอน SS เชิงเดี่ยว ซึ่งสะท้อนว่าสัดส่วนกากตะกอน SS ที่มากขึ้นช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดค่า TVS เนื่องจากเป็นสารอินทรีย์ที่ระเหยง่าย

ด้านความเสถียรของระบบ พบว่า ค่า pH ก่อนหมักอยู่ในช่วง 6.02 ถึง 7.46 และหลังหมักอยู่ที่ 7.48 ถึง 7.90 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์เหมาะสมต่อการสร้างมีเทน (Veluchamy, 2018; Sawatdeenarunat et al., 2017) ค่า Alkalinity ก่อนหมัก 751.67 ถึง 7,380 mg/L และหลังหมักเพิ่มขึ้นเป็น 3,519.45 ถึง 5,214 mg/L โดยมากกว่าเกณฑ์ 1,000 mg/L ที่แนะนำ แสดงถึงความสามารถของระบบในการรักษาสภาพบัฟเฟอร์ได้ดี

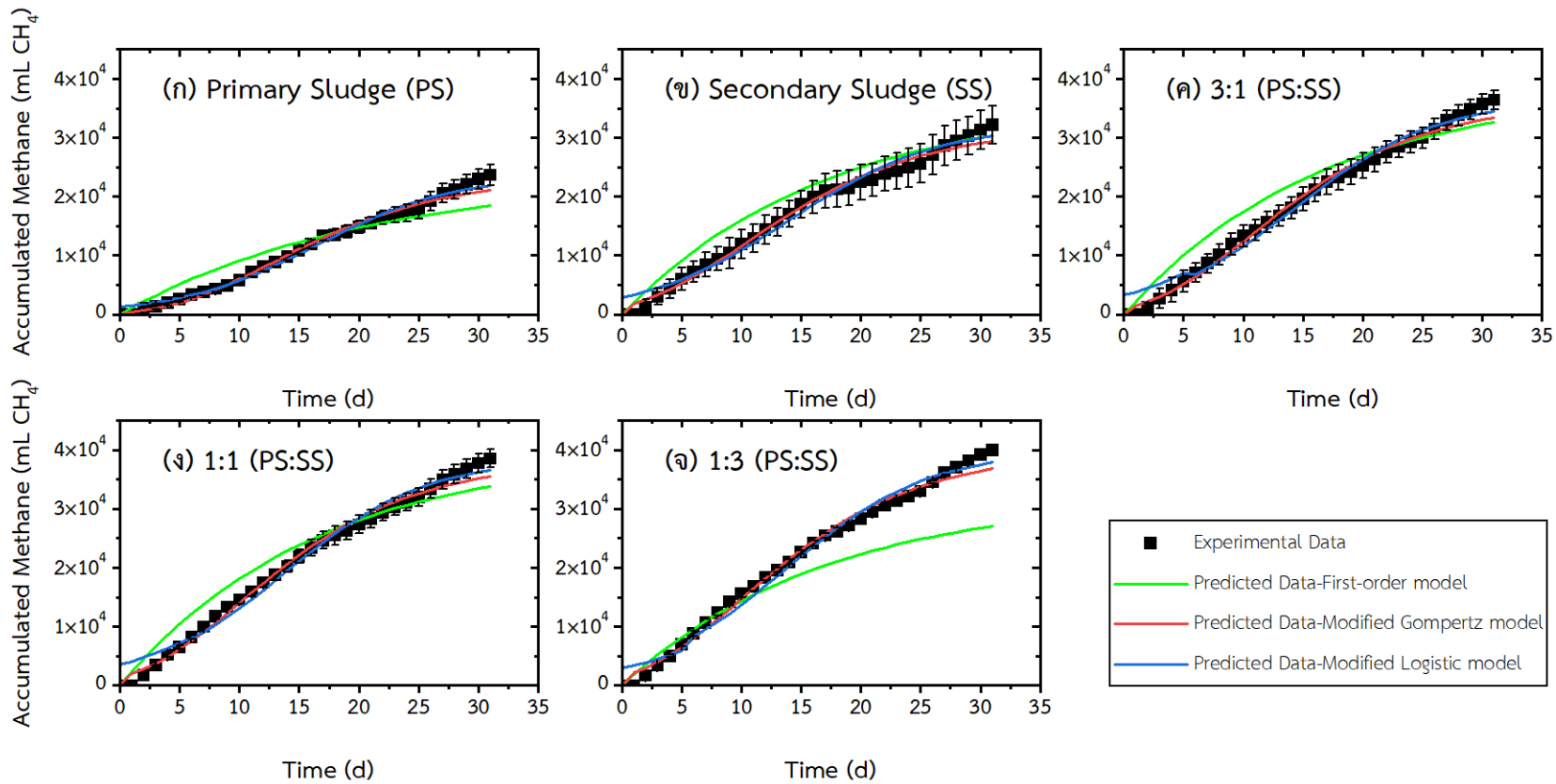
ส่วน VFA ก่อนหมัก 1,225.20 ถึง 2,579.16 mg/L และลดลงหลังหมักเหลือ 368.93 ถึง 1,589.40 mg/L สอดคล้องกับการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพ (Sawatdeenarunat et al., 2017) สัดส่วน VFA/Alkalinity ก่อนหมักอยู่ที่ 0.28 ถึง 1.63 ซึ่งบางสัดส่วนเกิน 0.8 แสดงถึงความเสี่ยงการยับยั้งจุลินทรีย์ แต่หลังหมักลดลงเหลือ 0.09 ถึง 0.16 ซึ่งยังอยู่ในเกณฑ์ที่ดีต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ (Berglund Odhner et al., 2012)

การใช้กากตะกอน PS เดี่ยวหรือผสมช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดค่า COD และค่า TVS ได้ดีกว่าการย่อยสลายกากตะกอน SS เชิงเดี่ยว ระบบมีเสถียรภาพสูงจากค่า pH และบัฟเฟอร์ที่เหมาะสม ส่งผลให้ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพอยู่ในระดับดี

4.2.3 การประเมินเปรียบเทียบแบบจำลองจลนพลศาสตร์จาก BMP Test

การทดสอบศักยภาพการเกิดมีเทนโดยใช้แบบจำลอง Pseudo First-order, Modified Gompertz และ Modified Logistic (ตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.4) พบว่า Modified Gompertz model ให้ผลแม่นยำที่สุด โดยมีค่า R^2 สูงสุด 0.986 ถึง 0.990 และค่า RMSE ต่ำสุด ร้อยละ 2.90 ถึง 3.56 สะท้อนความสอดคล้องกับข้อมูลการทดลองมากกว่าแบบจำลองอื่น ขณะที่ Pseudo First-order ให้ค่า R^2 ต่ำสุด (0.889 ถึง 0.946) และ RMSE สูง (ร้อยละ 6.97 ถึง 10.35) ส่วน Modified Logistic แม้ R^2 ค่อนข้างสูง (0.978 ถึง 0.988) แต่ RMSE ยังมากกว่า Modified Gompertz ในทุกสัดส่วนผสม ดังนั้น Modified Gompertz model จึงเหมาะสมที่สุดในการอธิบายจลนพลศาสตร์การผลิตมีเทนของงานวิจัยนี้

จากผลของ Modified Gompertz พบว่า ค่า Lag phase (λ) ลดลงเมื่อเพิ่มสัดส่วนผสมกากตะกอน SS โดยจาก 4.21 วัน (สัดส่วนผสม 1:0; PS) เหลือ 1.46 วัน (สัดส่วนผสม 0:1; SS) แสดงถึงการปรับตัวของจุลินทรีย์ที่รวดเร็วขึ้นในระบบที่มีกากตะกอน SS สูง ซึ่งสะท้อนศักยภาพของกากตะกอน SS มีเอนไซม์ในการเร่งกระบวนการไฮโดรไลซิสเริ่มต้น กรณีสัดส่วนผสม 1:3 ให้ผลดีที่สุด โดยมี Yield CH_4 สูงสุด 918.66 ml CH_4 /g VSfed ค่า λ เพียง 1.59 วัน และอัตราการผลิตมีเทนสูงสุด (R_m) 1,750 ml CH_4 /d ทั้งนี้เป็นผลจากองค์ประกอบสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ช้า (Slowly Particulate Biodegradable) ซึ่งมีมากในสัดส่วนผสมดังกล่าว จึงเหมาะสมที่สุดในการนำไปประยุกต์สู่ระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ขณะที่สัดส่วนผสมอื่น ๆ เช่น 1:0, 3:1, 1:1 และ 0:1 มี Lag phase ยาวนานกว่า



รูปที่ 4.4 ผลผลิตมีเทนสะสมของกากตะกอนผสมที่สัดส่วนผสมต่าง ๆ ที่ทำนายด้วยโปรแกรม SPSS

ตารางที่ 4.7 ค่าคงที่ทางจลนพลศาสตร์จาก BMP Test ที่สัดส่วนผสมต่าง ๆ

ค่าคงที่ทางจลนพลศาสตร์	สัดส่วนผสม (PS:SS)				
	1:0	3:1	1:1	1:3	0:1
Pseudo First-order model					
CH ₄ Yield (ml CH ₄ /gVS _{fed})	275.78	524.64	633.07	844.71	1,075.55
P (ml CH ₄)	18,465.39	30,388.08	32,611.12	33,860.68	27,029.40
k (d ⁻¹)	0.049	0.058	0.061	0.061	0.059
R ²	0.889	0.931	0.943	0.945	0.946
RMSE (%)	10.35	8.19	7.36	7.19	6.97
Modified Gompertz model					
CH ₄ Yield (ml CH ₄ /gVS _{fed})	315.43	576.96	689.66	918.66	1,170.59
P (ml CH ₄)	21,120.47	33,418.45	35,526.22	36,824.93	29,417.78
R _m (ml CH ₄ /day)	1,029.95	1,614.38	1,702.63	1,750.36	1,366.34
λ (d)	4.212	2.292	1.731	1.590	1.464
R ²	0.986	0.989	0.990	0.989	0.987
RMSE (%)	3.56	3.07	2.90	3.05	3.28

ตารางที่ 4.7 ค่าคงที่ทางจลนพลศาสตร์จาก BMP Test ที่สัดส่วนผสมต่าง ๆ (ต่อ)

ค่าคงที่ทางจลนพลศาสตร์	สัดส่วนผสม (PS:SS)				
	1:0	3:1	1:1	1:3	0:1
Modified Logistic model					
CH ₄ Yield (ml CH ₄ /gVS _{fed})	327.20	594.49	709.47	944.95	1,205.26
P (ml CH ₄)	21,908.21	34,433.82	36,546.73	37,878.94	30,289.10
R _m (ml CH ₄ /day)	1,028.31	1,571.31	1,643.13	1,686.53	1,316.74
λ (d)	5.016	2.824	2.150	1.994	1.852
R ²	0.988	0.985	0.984	0.982	0.978
RMSE (%)	3.39	3.75	3.91	4.13	4.46

4.2.4 การประยุกต์ใช้ค่าจลนพลศาสตร์จาก BMP Test

เพื่อออกแบบระบบ Two-stage CSTR

ผลการวิเคราะห์แบบจำลองจลนพลศาสตร์ชื่อว่า Modified Gompertz model เป็นแบบจำลองที่ให้ความแม่นยำสูงที่สุด โดยมีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.986 ถึง 0.990 และ RMSE ต่ำสุดเพียงร้อยละ 2.90 ถึง 3.56 ซึ่งสะท้อนความสามารถในการทำนายแนวโน้มการผลิตก๊าซมีเทนได้ใกล้เคียงกับค่าจริงมากกว่า Pseudo First-order และ Modified Logistic ที่ให้ค่า R^2 ต่ำกว่า และมี RMSE สูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญ ผลลัพธ์ดังกล่าวสอดคล้องกับรายงานของ Sun et al. (2022) ซึ่งพบว่า Modified Gompertz ให้ความแม่นยำสูงที่สุดในการอธิบายจลนพลศาสตร์ของการผลิตมีเทนจากกากตะกอน โดยมีค่า R^2 มากกว่า 0.98 และ RMSE ต่ำกว่าร้อยละ 5 เช่นเดียวกัน

เมื่อพิจารณาค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากแบบจำลอง พบว่า Lag phase (λ) ลดลงตามการเพิ่มสัดส่วนของกากตะกอน SS โดยจาก 4.21 วัน (การย่อยสลายกากตะกอน PS เชิงเดี่ยว) เหลือเพียง 1.46 วัน (การย่อยสลายกากตะกอน SS เชิงเดี่ยว) แสดงให้เห็นถึงการปรับตัวของจุลินทรีย์ที่รวดเร็วขึ้นในระบบที่มีกากตะกอน SS สูง แนวโน้มนี้สอดคล้องกับงานของ Sedighi et al. (2022) ซึ่งศึกษาการย่อยสลายร่วมของกากตะกอน SS และเศษอาหาร และพบว่า Modified Gompertz สามารถสะท้อนการลดลงของระยะเวลา lag phase ได้ดีกว่า Modified Logistic โดยค่า λ ลดลงจาก 2.13 วัน เหลือเพียง 0.84 วัน

นอกจากนี้ กากตะกอนผสมที่สัดส่วนผสม 1:3 ให้ผลผลิตเด่นที่สุด โดยมีค่า Yield CH_4 สูงสุด 918.66 ml CH_4/g VS_{fed} และมีค่าอัตราการผลิตก๊าซสูงสุด (R_m) 1,750 ml CH_4/day ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Zainal et al. (2022) และ Hossain et al. (2022) ที่รายงานว่า การเพิ่มสัดส่วนสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ง่ายช่วยเพิ่ม Yield CH_4 ได้ใกล้เคียง 900 ml CH_4/g VS_{fed} และยังเร่งกระบวนการผลิตก๊าซในช่วงต้น ขณะที่ Zeynali et al. (2025) ศึกษากากตะกอนเทศบาล พบแนวโน้มใกล้เคียงกัน คือการเพิ่มวัสดุที่ย่อยสลายได้ง่ายทำให้ค่า lag phase ลดลงต่อเนื่อง

โดยสรุป งานวิจัยนี้ยืนยันว่าการใช้ Modified Gompertz model เป็นแนวทางที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการอธิบายกลไกจลนพลศาสตร์การผลิตมีเทนจากกากตะกอนผสม อีกทั้งยังชี้ให้เห็นว่าการเพิ่มสัดส่วนของกากตะกอน SS ไม่เพียงช่วยลดค่า lag phase แต่ยังช่วยเสริมศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนระยะยาว ซึ่งมีความสอดคล้องและสนับสนุนผลจากงานวิจัยก่อนหน้าอย่างมีนัยสำคัญ

4.2.5 การเชื่อมโยงผล BMP Test สู่การกำหนดเงื่อนไขการเดินระบบ

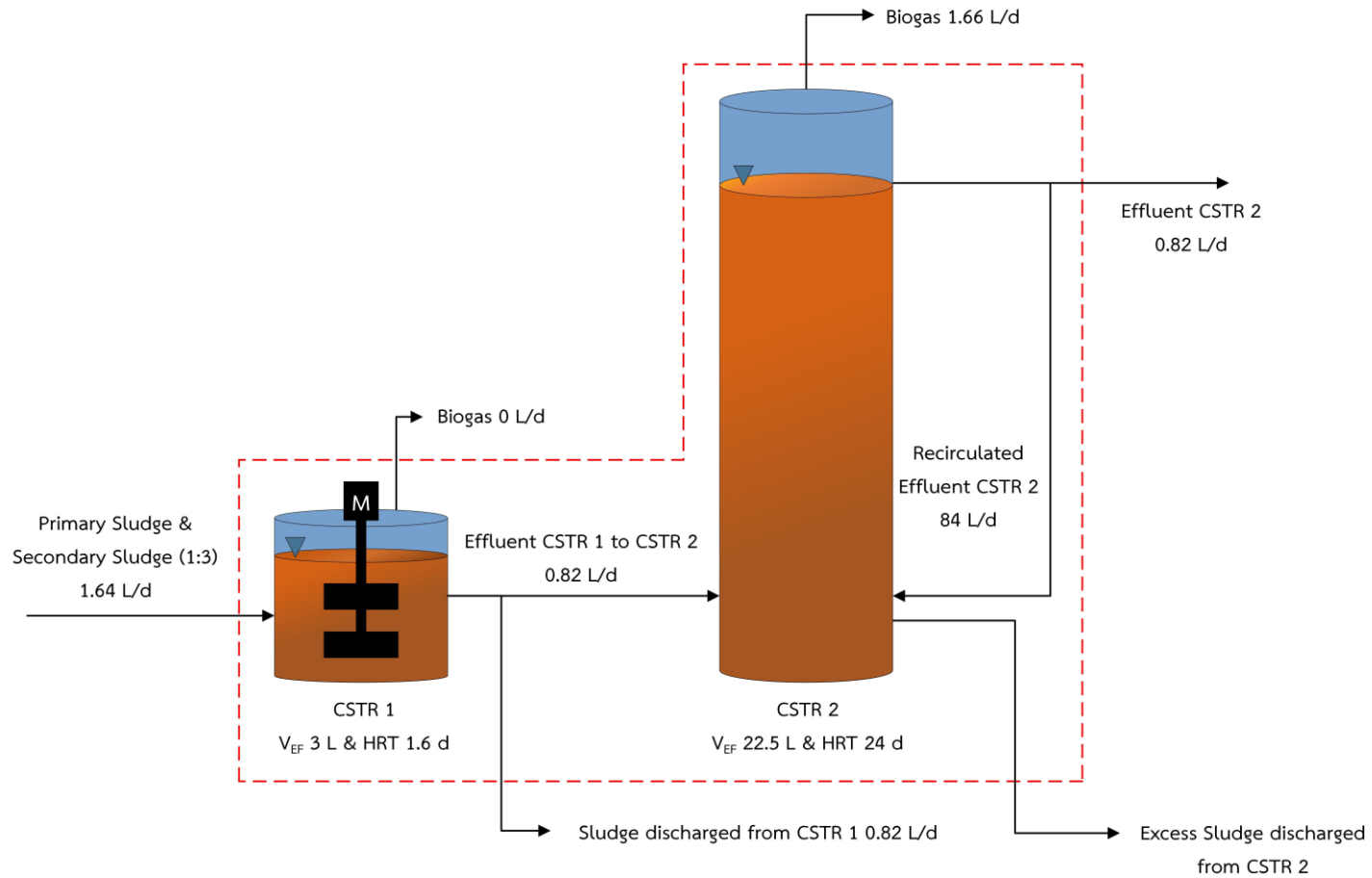
ชุดทดลอง Two-stage CSTR

จากผลการทดสอบศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพโดยวิธี BMP Test พบว่า สัดส่วนผสมกากตะกอน PS:SS ที่ 1:3 มีสมรรถนะที่โดดเด่น โดยให้ค่า Methane Yield สูงสุดที่ 918.66 ml CH₄/g- VS_{fed} และมีค่า COD removal เท่ากับร้อยละ 53.62 ซึ่งสูงกว่าการย่อยสลายกากตะกอน SS เองเดี่ยวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ การเลือกสัดส่วนผสมของกากตะกอนส่วนเกินดังกล่าว จึงมีความเหมาะสมในการนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการออกแบบระบบ Two-stage CSTR แบบต่อเนื่อง เพื่อประเมินประสิทธิภาพในระดับการทำงานจริง

การออกแบบระบบ Two-stage CSTR มีรายละเอียดดังตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.5 โดย CSTR 1 ทำหน้าที่เป็นถัง hydrolysis-acidogenesis มีปริมาตรปฏิกรณ์ 3 L เส้นผ่านศูนย์กลาง 15.24 cm และความสูง 19 cm เดินระบบที่ HRT 1.6 วัน ขณะที่ CSTR 2 ทำหน้าที่ acetogenesis-methanogenesis มีปริมาตรปฏิกรณ์ 22.5 L เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน แต่สูงกว่า (126.81 cm) เดินระบบที่ HRT 24 วัน ซึ่งรายละเอียดแบบการก่อสร้างแสดงในภาคผนวก ข ทั้งระบบถูกออกแบบให้มีค่า OLR เฉลี่ย 0.44 kg VS/m³-day และระยะเวลาเดินระบบทั้งหมด 220 วัน เพื่อจำลองการทำงานของระบบย่อยสลายร่วมแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Co-digestion: AnCoD)

ตารางที่ 4.8 ค่าการเดินระบบ Two-stage CSTR

พารามิเตอร์	สภาวะเดินระบบ	
	CSTR 1	CSTR 2
Feed	สัดส่วนผสม (PS:SS) 1:3	Effluent CSTR 1
Volume reactor (L)	3	22.5
Dimeter (cm)	15.24 (6")	15.24 (6")
Height (cm)	19	126.81
HRT (d)	1.6	24
OLR (kg VS/m ³ -day)	6.65	0.44
	0.44	
Operating days (d)	220	



รูปที่ 4.5 สมดุลอัตราการไหลของการเดินระบบของชุดทดลอง Two-stage CSTR

ลักษณะของกากตะกอนผสมที่สัดส่วนผสม 1:3 ที่ใช้เป็นสารตั้งต้น แสดงในตารางที่ 4.9 โดยมีค่า TCOD เฉลี่ย $42,019.17 \pm 12,888.14$ mg/L และ SCOD เฉลี่ย $23,911.17 \pm 8,304.86$ mg/L ซึ่งสะท้อนถึงศักยภาพของสารอินทรีย์ละลายน้ำที่ย่อยสลายง่ายในระดับสูง ค่า pH อยู่ที่ 6.96 ± 0.16 ใกล้เคียงกับสภาวะเหมาะสมสำหรับการสร้างมีเทน (6.8 ถึง 7.4) และมีค่า Alkalinity เฉลี่ย $2,134.37 \pm 377.81$ mg/L as CaCO_3 ซึ่งเพียงพอในการรักษาสมดุลกรด-ด่างในระบบ นอกจากนี้ ค่า C/N ratio เฉลี่ย 845.27 แม้จะค่อนข้างสูง แต่ไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของหมักมากนัก เนื่องจากกากตะกอนผสมมีองค์ประกอบของสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ง่ายสูง

การออกแบบชุดทดลองแบบต่อเนื่อง Two-stage CSTR โดยใช้ข้อมูลจาก BMP Test เป็นฐานข้อมูลอ้างอิง ช่วยให้สามารถกำหนดค่าออกแบบที่มีความเหมาะสมทั้งด้าน HRT, OLR และสมดุลสารอินทรีย์ ซึ่งสะท้อนถึงการบูรณาการระหว่างการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการและการประยุกต์ใช้จริงในระดับอุตสาหกรรม ทำให้ผลการประเมินที่ได้มีความน่าเชื่อถือและสามารถนำไปใช้สนับสนุนการออกแบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่ยั่งยืนได้

4.3 การเดินระบบต่อเนื่องของชุดทดลอง Two-stage CSTR

จากผลการทดสอบศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพในระดับห้องปฏิบัติการ (BMP Test) ได้ขยายการศึกษาไปสู่การทดลองเดินระบบ Two-stage CSTR ภายใต้การป้อนอาหารแบบกึ่งต่อเนื่อง เพื่อประเมินความเสถียรและประสิทธิภาพของกระบวนการในสภาวะที่ใกล้เคียงกับการใช้งานจริง การศึกษาครอบคลุม (1) การเริ่มเดินระบบและการปรับสภาวะการทำงาน, (2) การติดตามประสิทธิภาพการย่อยสลายและการผลิตก๊าซชีวภาพ, (3) การศึกษาสมดุลมวลสารของระบบ และ (4) การวิเคราะห์โครงสร้างชุมชนจุลินทรีย์ที่มีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน

4.3.1 การเริ่มเดินระบบ Two-stage CSTR

ผลการเดินระบบในช่วง 24 วันแรก สะท้อนว่าระบบ Two-stage CSTR ยังอยู่ในระยะปรับตัว (acclimation phase) โดยค่า pH อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อกระบวนการเมทาโนเจเนซิส (6.8 ถึง 7.4) และค่า Alkalinity มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (1,200 ถึง 1,800 mg CaCO_3 /L) แสดงถึงการสร้างบัฟเฟอร์ที่เพียงพอ ขณะที่ค่า VFA อยู่ในช่วงต่ำถึงปานกลาง (200 ถึง 1,000 mg CH_3COOH /L) และสัดส่วน VFA/Alkalinity < 0.5 (รูปที่ 4.6) ซึ่งว่าระบบยังไม่เกิดภาวะกรดสะสม

ด้านคุณภาพน้ำที่พบว่า TCOD และ SCOD ยังคงสูง (ประมาณ 19,000 ถึง 38,000 และ 9,000 ถึง 19,000 mg/L ตามลำดับ; ตารางที่ 4.9, รูปที่ 4.7) และยังไม่เกิดการผลิตก๊าซชีวภาพ (≈ 0 mL/day) ซึ่งเป็นลักษณะปกติของระยะ start-up ที่จุลินทรีย์กลุ่ม hydrolytic และ acidogenic ต้องปรับตัวและสร้างสมดุลกับจุลินทรีย์กลุ่มเมทาโนเจเน

เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้า เช่น Laiq Ur Rehman et al. (2019) และ Lin et al. (2011) ที่รายงานระยะ start-up 20 ถึง 30 วัน พบว่าระยะเวลาของงานนี้ (~24 วัน) อยู่ในช่วงใกล้เคียงและสอดคล้องกัน โดยอาจได้รับอิทธิพลจากค่า TCOD ที่ค่อนข้างสูง ($\approx 42,019$ mg/L; ตารางที่ 4.9) และสัดส่วนผสมกากตะกอน PS:SS ที่ 1:3 ที่เอื้อต่อการผลิตก๊าซในระยะเวลา แต่ต้องใช้เวลาปรับสมดุลช่วงต้น สามารถสรุปได้ว่าระบบในงานวิจัยนี้มีความเสถียรในระยะเริ่มต้น และพร้อมเข้าสู่ steady state โดยไม่เกิดภาวะยับยั้งจากกรดสะสม ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อการผลิตก๊าซชีวภาพอย่างมีประสิทธิภาพในระยะต่อไป

4.3.2 ประสิทธิภาพระบบ Two-stage CSTR

จากตารางที่ 4.9 และผลการเดินระบบตลอด 220 วัน พบว่าการออกแบบที่แตกต่างกัน ระหว่าง CSTR 1 และ CSTR 2 ส่งผลโดยตรงต่อเสถียรภาพและการผลิตก๊าซชีวภาพ โดย CSTR 1 ได้รับการป้อนสารอินทรีย์ที่มีความเข้มข้นสูง ($OLR = 6.65$ kg TVS/m³-day) และ HRT สั้น (1.6 วัน) ขณะที่ CSTR 2 มีค่า OLR ต่ำกว่ามาก (0.21 kg TVS/m³-day) และ HRT ยาว (24 วัน) ลักษณะดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่า CSTR 1 ทำหน้าที่เป็นถังหมักกรดสำหรับการสลายสารอินทรีย์ขั้นต้น ส่วน CSTR 2 ทำหน้าที่หลักในการปรับเสถียรภาพและการผลิตก๊าซชีวภาพ ทั้งนี้ผลการเดินระบบ ยืนยันว่า CSTR 1 ไม่สามารถผลิตก๊าซได้ ในขณะที่ CSTR 2 แม้เริ่มต้นช้า (lag ~35 วัน) แต่สามารถเข้าสู่การผลิตก๊าซอย่างต่อเนื่อง โดยพบประสิทธิภาพด้านต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

4.3.2.1 ความเป็นกรด-ด่างและบัฟเฟอร์

ค่า pH และสัดส่วน VFA/Alkalinity ช่วยสะท้อนกลไกดังกล่าวได้อย่างมีนัยสำคัญ (รูปที่ 4.6) โดย CSTR 1 มีค่า pH 6.9 ถึง 7.2 ใกล้เคียงกับสภาวะกรด ขณะที่ CSTR 2 มีค่า 7.3 ถึง 7.5 อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อเมทาโนเจน ซึ่งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) สอดคล้องกับงานของ Gensollen et al. (2022) ที่รายงานว่าความแตกต่างของค่า pH ระหว่างสองถัง บ่งบอกกิจกรรมเมตาบอลิซึมที่เฉพาะเจาะจง นอกจากนี้ สัดส่วน VFA/Alkalinity ใน CSTR 1 มีค่าสูงกว่า 1.0 สะท้อนการสะสมกรด ขณะที่ CSTR 2 ลดต่ำกว่า 1 อย่างสม่ำเสมอหลังวันที่ 80 แสดงถึงบัฟเฟอร์เพียงพอ ซึ่งสนับสนุนข้อค้นพบของ Hasan et al. (2018) และ Markphan et al. (2020) ว่าระบบสองขั้นตอนสามารถจัดการภาวะกรดเกินได้ดีกว่าระบบขั้นตอนเดียว

4.3.2.2 ประสิทธิภาพการกำจัดอินทรีย์

สำหรับประสิทธิภาพการกำจัดอินทรีย์ ระบบนี้แสดงผลที่ค่อนข้างน่าพอใจ โดยค่า TVS removal อยู่ในช่วงร้อยละ 84.03 ถึง 99.06 (รูปที่ 4.7ก) แสดงให้เห็นว่าการย่อยสลาย

สารอินทรีย์ของแข็งเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ แม้ว่าจะมีความผันผวนในบางช่วง ขณะที่ค่า TCOD removal เฉลี่ยเพียงร้อยละ 54.28 ± 6.66 (รูปที่ 4.7ข) และผูกผันกับค่าความเข้มข้นน้ำทิ้งที่ยังสูง ($20,553.98 \text{ mg/L}$) สะท้อนถึงข้อจำกัดของระบบที่ยังไม่สามารถลดอินทรีย์ละลายน้ำได้อย่างต่อเนื่อง ส่วนค่า SCOD removal เฉลี่ยร้อยละ 57.10 ± 4.65 (รูปที่ 4.7ค) แสดงถึงการพึ่งพาเสถียรภาพระบบอย่างมีนัยสำคัญ ผลลัพธ์นี้สอดคล้องกับ Donoso-Bravo et al. (2015) ที่ชี้ว่าระบบแบบสองขั้นตอนมีความสามารถในการเพิ่มการสลายอินทรีย์ที่ละลายน้ำหากสามารถควบคุมสภาวะให้เสถียร

4.3.2.3 ธาตุอาหารและสมดุลจุลินทรีย์

ในด้านธาตุอาหาร พบว่าค่า TKN ของ CSTR 1 มีความผันผวนสูง โดยบางช่วงมีค่าเกิน 70 mg/L ขณะที่ CSTR 2 ค่อนข้างคงที่มากกว่า (รูปที่ 4.8) การทดสอบ ANOVA ยืนยันความแตกต่างระหว่างสองถัง ($p < 0.05$) สะท้อนถึงความแตกต่างของกิจกรรมเมตาบอลิซึม นอกจากนี้การสะสม MLVSS ที่สูงกว่า $60,000 \text{ mg/L}$ ในวันที่ 152 ชี้ว่ามีการเพิ่มจำนวนจุลินทรีย์ แต่กลับสัมพันธ์ผูกผันกับอัตราส่วนอาหารต่อจุลินทรีย์ (F/M ratio) ที่ไม่สมดุล ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดการยับยั้งการผลิตก๊าซหากไม่ควบคุมอย่างเหมาะสม (Zhang et al., 2022)

4.3.2.4 การผลิตก๊าซชีวภาพ

ผลผลิตก๊าซชีวภาพ (รูปที่ 4.9) พบว่า CSTR 2 เริ่มผลิตก๊าซหลังจากระยะปรับตัว และเพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุด $3,060 \text{ mL/day}$ ในวันที่ 60 ถึง 127 มีค่าเฉลี่ยการผลิตก๊าซชีวภาพที่ $1,664 \pm 752.23 \text{ mL/day}$ โดยมีค่า Biogas Yield เท่ากับ $4.85 \pm 1.80 \text{ mL/g-TVS}_{\text{removed-day}}$ ก่อนลดลงสู่ค่าเฉลี่ย $435.97 \pm 52.65 \text{ mL/day}$ โดยในช่วงท้ายของการทดลองมีค่า Biogas Yield ลดลง เท่ากับ $1.8 \pm 0.48 \text{ mL/g TVS}_{\text{removed-day}}$ แสดงถึงปัญหาการลดลงของก๊าซในระยะท้ายสอดคล้องกับรายงานของ Zhou et al. (2022) ที่อธิบายว่าความหนาแน่นจุลินทรีย์ที่สูงเกินไปอาจยับยั้งการทำงานของเมทาโนเจนได้

จากการเก็บตัวอย่างแบบ Grab Sampling 2 ครั้งใน 1 ปี พบว่าผลผลิตก๊าซชีวภาพลดลงเมื่อใช้ตัวอย่างจากรอบที่ 2 เนื่องจากมีค่า VFA เฉลี่ยเพียง 769 mg/L ซึ่งต่ำกว่าช่วงวันที่ 30 ถึง 80 ที่มีค่า VFA ประมาณ $1,562 \text{ mg/L}$ และให้ผลผลิตก๊าซสูง ขณะที่ค่า Alkalinity ในช่วงวันที่ 80 ถึง 115 มีค่าเฉลี่ยสูงถึง $2,174 \text{ mg/L}$ จึงอาจสะท้อนว่าระบบอยู่ในช่วงที่จุลินทรีย์กำลังปรับตัวหรือมีภาวะบัฟเฟอร์สูงจนทำให้กระบวนการสร้างก๊าซชะงักลง อย่างไรก็ตาม ผลผลิตก๊าซชีวภาพกลับมาเพิ่มขึ้นอีกครั้งในช่วงวันที่ 115 ถึง 130 โดยมีค่าเฉลี่ย $1,894 \text{ mL biogas/day}$ แสดงถึงการฟื้นตัวของระบบและการกลับมาสมดุลระหว่าง VFA และ Alkalinity อีกครั้ง

การเดินระบบ Two-stage CSTR ในการบำบัดกากตะกอนส่วนเกินจากโรงงานกระดาษรีไซเคิลสามารถเพิ่มเสถียรภาพ ลดความเสี่ยงการสะสมกรด และสนับสนุนการผลิตก๊าซชีวภาพต่อเนื่องได้ แม้ค่า Biogas Yield ยังอยู่ในระดับปานกลาง แต่แนวโน้มสอดคล้องกับรายงานก่อนหน้า (Hasan et al., 2018; Markphan et al., 2020) ที่ยืนยันข้อได้เปรียบของระบบสองขั้นตอนเหนือขั้นตอนเดียว อย่างไรก็ตาม ความผันผวนของ TCOD และปัญหาความไม่สมดุลของค่า F/M ratio ยังคงเป็นข้อจำกัดสำคัญ ซึ่งควรได้รับการปรับปรุงด้วยกลยุทธ์ควบคุมการป้อนสารอินทรีย์หรือการจัดการชีวมวลเพื่อเพิ่มผลผลิตก๊าซและความเสถียรในระยะยาว

4.3.3 ผลกระทบของการสะสมกากตะกอนส่วนเกิน (Excess Sludge Accumulation)

ต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ

หนึ่งในปัจจัยหลักที่อธิบายการลดลงของปริมาณก๊าซชีวภาพในระยะท้ายของการเดินระบบ (รูปที่ 4.8ข) คือการที่ไม่ได้มีการกำจัดกากตะกอนส่วนเกินออกจากระบบอย่างสม่ำเสมอ แม้วาระบบจะเข้าสู่สภาวะคงที่แล้ว แต่ยังคงเดินระบบต่อเนื่องภายใต้เงื่อนไขการควบคุมเช่นเดียวกับช่วงที่ระบบมีเสถียรภาพ เนื่องจากต้องการประเมินความต่อเนื่องของประสิทธิภาพระบบเมื่อไม่มีการระบายกากตะกอนส่วนเกินออกเหมือนในระบบปฏิบัติการจริง และเพื่อให้สามารถสะท้อนผลกระทบจากการสะสมชีวมวลต่อเสถียรภาพและสมรรถนะของกระบวนการได้อย่างชัดเจน โดยพบว่าเกิดการสะสมของชีวมวลในถัง (MLVSS > 60,000 mg/L; ตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.8ข) และเข้าสู่ช่วง endogenous ในช่วงท้ายของการเดินระบบ นอกจากนี้ยังส่งผลกระทบหลายประการ ดังนี้

4.3.3.1 ความไม่สมดุลของค่าอัตราส่วนอาหารต่อจุลินทรีย์ (F/M Ratio)

เมื่อมีการสะสมจุลินทรีย์ในปริมาณสูง แต่ปริมาณอาหารที่ป้อนคงที่ ทำให้ค่า F/M ratio ต่ำกว่าค่าที่เหมาะสม ดังรูปที่ 4.8ข ซึ่งภายใต้สภาวะนี้ จุลินทรีย์จะเข้าสู่ endogenous respiration คือหันไปใช้สารสำรองภายในเซลล์แทน ส่งผลให้กิจกรรมเมตาบอลิซึมลดลงและการผลิตก๊าซมีเทนลดลง (Metcalf & Eddy, 2003)

4.3.3.2 การเกิดการยับยั้งเชิงโครงสร้าง (Mass Transfer Limitation)

การสะสมของชีวมวลที่หนาแน่นเกินไปทำให้เกิด diffusion barrier ซึ่งจำกัดการแพร่ของสารตั้งต้น เช่น VFA และไฮโดรเจน เข้าสู่จุลินทรีย์เมทาโนเจน ผลลัพธ์คือเกิดการยับยั้งในเชิงกายภาพต่อกระบวนการเมทาโนเจเนซิส แม้สารตั้งต้นจะยังมีอยู่ในระบบ

ตารางที่ 4.9 ผลการเดินระบบระบบ Two-stage CSTR ในช่วงที่ระบบมีความเสถียร (วันที่ 60-127)

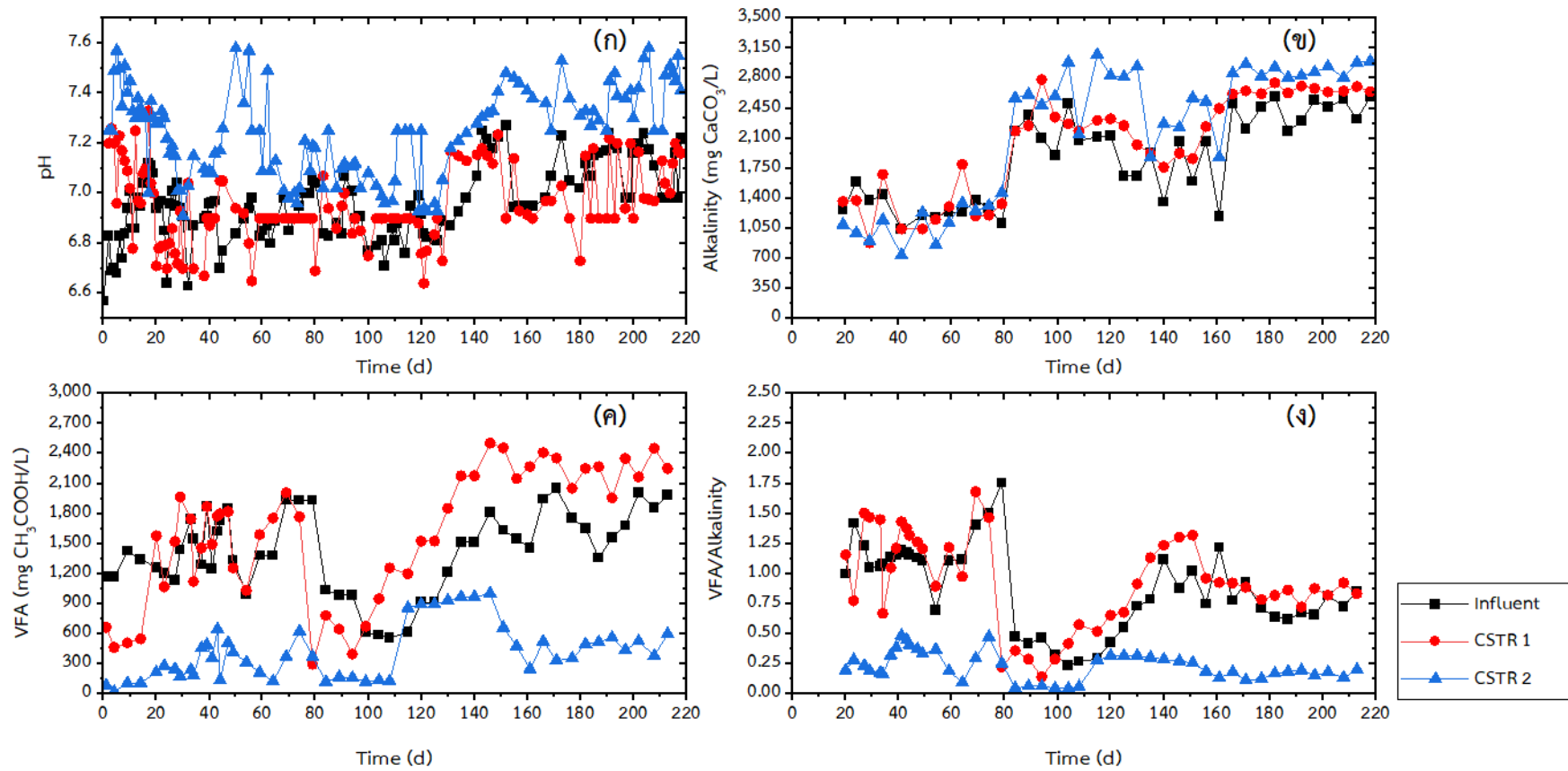
พารามิเตอร์	Influent	Effluent
pH	6.96 ± 0.16	7.25 ± 0.18
TCOD (mg/L)	42,019.17 ± 12,888.14	45,129.25 ± 12,284.27
SCOD (mg/L)	23,911.17 ± 8,304.86	12,585.25 ± 6,138.53
TS (mg/L)	35,469.62 ± 17,193.44	1,922.10 ± 822.10
TVS (mg/L)	10,640.89 ± 5,158.03	576.63 ± 246.63
VDS (mg/L)	1,171.92 ± 644.48	-
Alkalinity (mg/L as CaCO ₃)	2,134.37 ± 377.81	2,317.09 ± 654.69
VFA (mg/L as CH ₃ COOH)	1,460.18 ± 468.68	188.97 ± 104.96
TKN (mg/L)	64.18 ± 22.21	16.61 ± 3.01
C/N ratio	845.27 ± 758.93	2,796.19 ± 852.38
TVS removal (%)	-	91.55 ± 10.63
Biogas Yield (mL biogas/g TVS _{removed} -day)	-	4.85 ± 1.80 (116.98 mL biogas/g TVS _{fed})
Biogas Production (L/day)	-	1.66 ± 0.75

4.3.3.3 การยับยั้งตนเองของจุลินทรีย์ (Self-Inhibition)

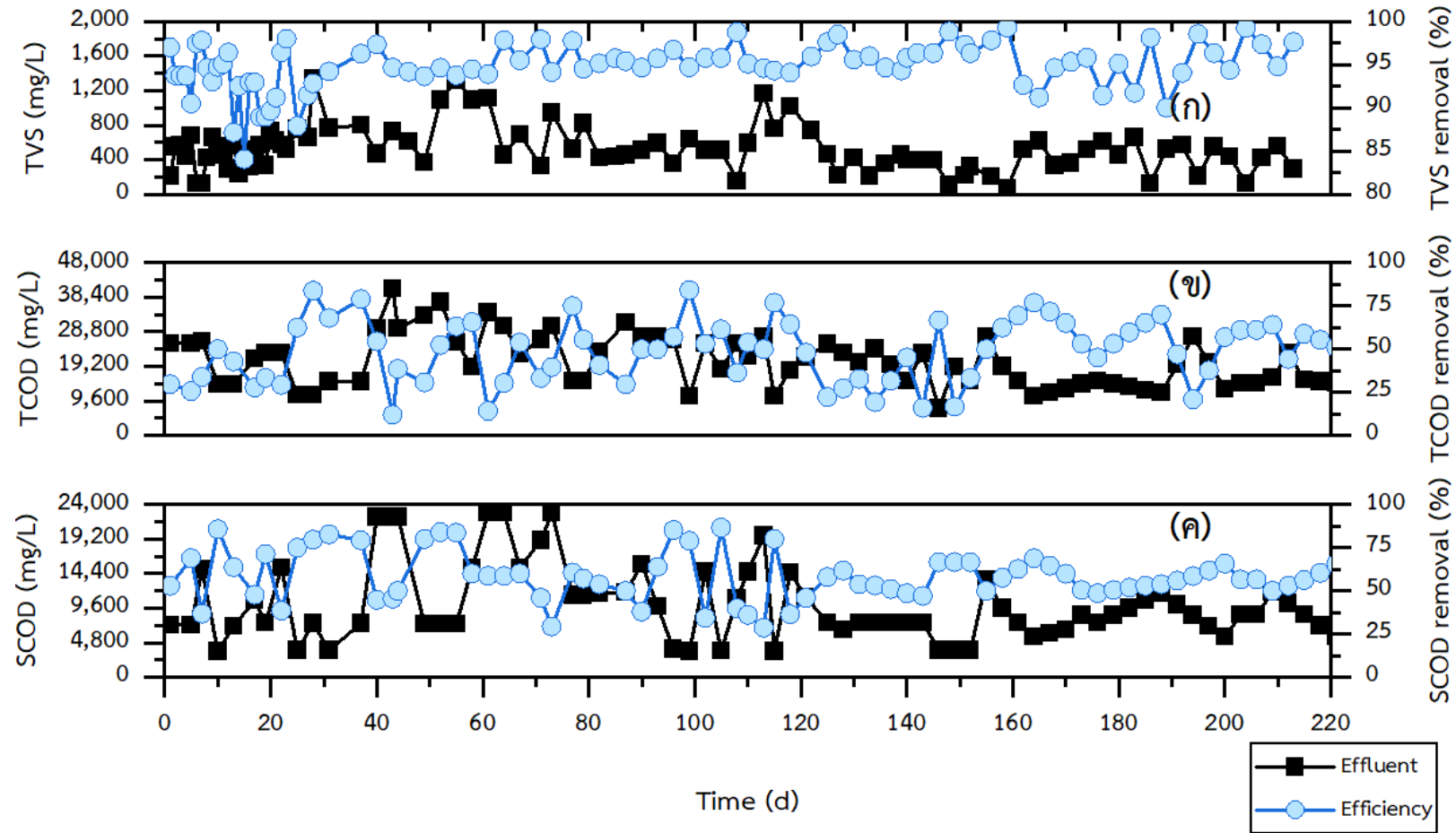
งานวิจัยของ Zhang et al. (2022) ชี้ว่าการมีชีวมวลสะสมมากเกินไป โดยไม่มีการควบคุม อาจทำให้จุลินทรีย์เกิดภาวะ “self-inhibition” เนื่องจากการแข่งขันกันภายใน ชุมชนจุลินทรีย์เอง ส่งผลให้สมดุลระหว่างจุลินทรีย์ acidogenes และ methanogenes ถูกทำลาย และเกิดความไม่เสถียรในกระบวนการผลิตมีเทน

4.3.3.4 ผลกระทบต่ออายุตะกอน (Sludge Retention Time: SRT)

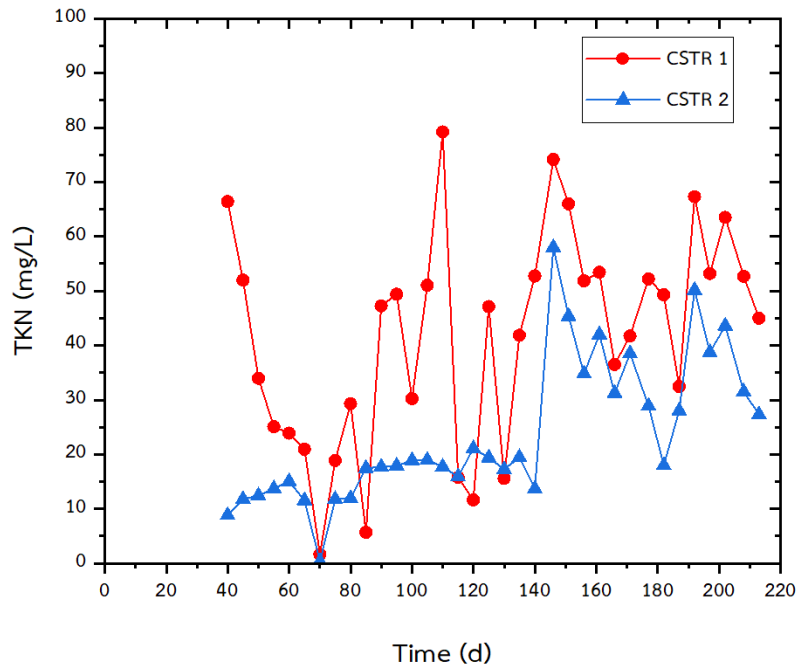
Li et al. (2019) รายงานว่า อายุตะกอน (Sludge Retention Time: SRT) เป็นปัจจัยสำคัญต่อเสถียรภาพของระบบย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน หากไม่มีการกำจัดกากตะกอน ส่วนเกินออกจากระบบ ระบบจะเข้าสู่ภาวะ “overload ทางชีวภาพ” แม้ค่า OLR จะคงที่ สอดคล้องกับที่พบในงานวิจัยนี้ซึ่งแสดงถึงการลดลงของผลผลิตก๊าซในช่วงท้าย แม้ค่าความเข้มข้นอินทรีย์ขาเข้า จะไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ



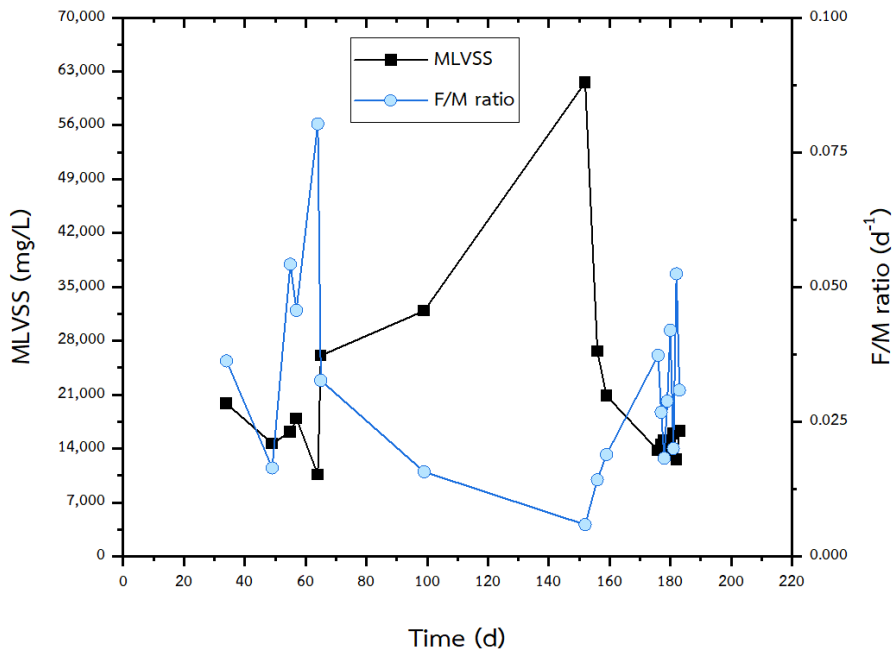
รูปที่ 4.6 ค่าความเสถียรของระบบ Two-stage CSTR ตลอดระยะเวลาการทดลอง ได้แก่ (ก) ค่า pH (ข) ค่า Alkalinity (ค) ค่า VFA และ (ง) ค่า VFA/Alkalinity



รูปที่ 4.7 ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ ได้แก่ (ก) ประสิทธิภาพการกำจัดค่า TVS (ข) ประสิทธิภาพการกำจัดค่า TCOD และ (ค) ประสิทธิภาพการกำจัดค่า SCOD ของระบบ Two-stage CSTR

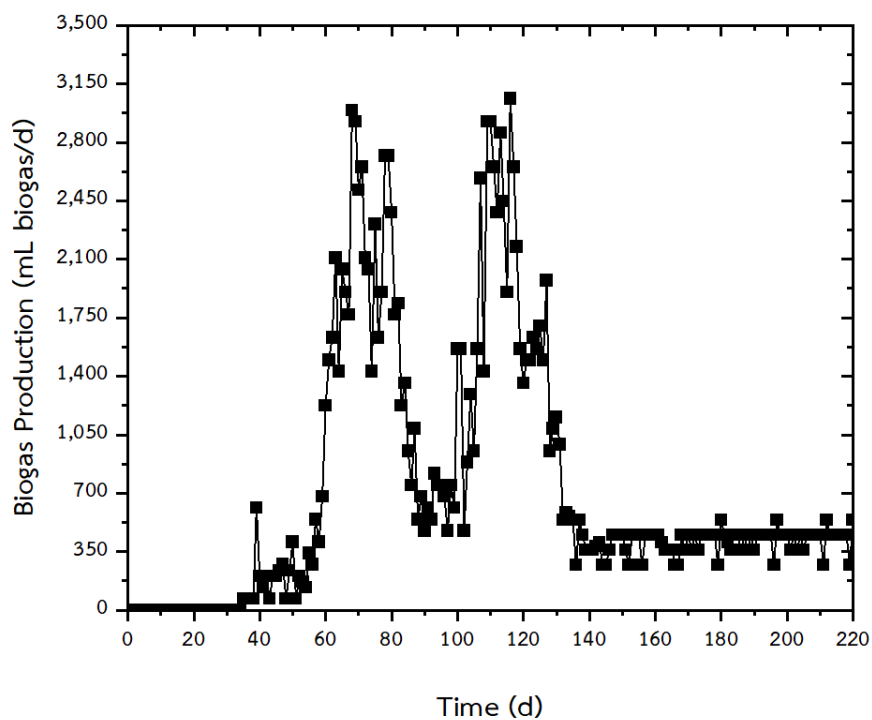


(ก)



(ข)

รูปที่ 4.8 ค่าพารามิเตอร์ด้านสารอาหารในระบบ Two-stage CSTR ได้แก่ (ก) ค่าไนโตรเจนในรูปของค่า TKN และ (ข) ค่าของแข็งแขวนลอยในระบบและอัตราส่วนอาหารต่อจุลินทรีย์ (ค่า MLVSS และ F/M ratio)



รูปที่ 4.9 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จากระบบ Two-stage CSTR

4.3.3.5 ความเสี่ยงต่อการสูญเสียเสถียรภาพระบบในระยะยาว

การสะสม excess sludge ทำให้ความหนืด (viscosity) ของของเหลวในถังสูงขึ้น ส่งผลให้การผสมและการกระจายสารอาหารในระบบด้อยประสิทธิภาพ หากไม่ควบคุมอาจทำให้เกิดภาวะ short-circuit ของการไหล หรือเกิด dead zone ในถัง ซึ่งกระทบต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์และการผลิตก๊าซ

4.3.4 สมดุลมวลสารระบบ Two-stage CSTR

จากตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.10 แสดงผลการวิเคราะห์สมดุลมวลสารอาหารหลัก (C, N และ P) ของระบบ Two-stage CSTR พบลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกันในแต่ละถังปฏิกรณ์ โดยสามารถอธิบายได้ดังนี้

4.3.4.1 คาร์บอน (C balance)

ใน CSTR 1 พบค่าสมดุลคาร์บอนเป็นลบ (-0.21 g C/day) สะท้อนถึงการสูญเสียคาร์บอนบางส่วนผ่านการเปลี่ยนเป็นก๊าซชีวภาพ เช่น CH_4 และ CO_2 และการย่อยสลายอินทรีย์ที่เกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพในขั้นตอนการผลิตกรด (acidogenesis)

ขณะที่ใน CSTR 2 พบการสะสมคาร์บอนสูง ($+2.09 \text{ g C/day}$) ซึ่งบ่งชี้ว่ายังมีสารอินทรีย์ที่ไม่ถูกแปลงเป็นก๊าซชีวภาพอย่างสมบูรณ์ สาเหตุอาจเกิดจาก (1) ค่าความเข้มข้นสารอินทรีย์ที่บ่งชี้สูง (TCOD $42,019 \text{ mg/L}$; ตารางที่ 4.9) หรือ (2) การสะสมสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยาก (slowly biodegradable) ซึ่งสอดคล้องกับผลการผลิตก๊าซชีวภาพในรูปที่ 4.9 ที่แสดงแนวโน้มลดลงในระยะท้าย

4.3.4.2 ไนโตรเจน (N balance)

สมดุลไนโตรเจนใน CSTR 1 ใกล้ศูนย์ (-0.01 g N/day) บ่งชี้ว่ามีการรีไซเคิลไนโตรเจนในระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ใน CSTR 2 พบค่าบวก ($+0.16 \text{ g N/day}$) แสดงถึงการสะสมไนโตรเจนในรูปชีวมวลจุลินทรีย์ ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูล MLVSS ที่สูงกว่า $60,000 \text{ mg/L}$ (รูปที่ 4.8ข) โดยการสะสมไนโตรเจนลักษณะนี้สะท้อนถึงการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ แต่หากไม่มีการควบคุมการกำจัดกากตะกอนส่วนเกินออกจากระบบ อาจทำให้ค่า F/M ratio ลดลงและกีดการผลิตก๊าซในระยะยาว (Metcalf & Eddy, 2003; Zhou et al., 2022)

4.3.4.3 ฟอสฟอรัส (P balance)

สมดุลฟอสฟอรัสใน CSTR 1 มีค่าเล็กน้อยเป็นลบ (-0.01 g P/day) แสดงถึงการนำไปใช้ในการสังเคราะห์เซลล์

ใน CSTR 2 พบค่าบวก ($+0.16 \text{ g P/day}$) สะท้อนถึงการสะสมฟอสฟอรัสในระบบ ซึ่งหากมีการสะสมต่อเนื่องอาจนำไปสู่การตกตะกอน (precipitation) ของสารประกอบฟอสเฟต เช่น struvite หรือ hydroxyapatite และก่อให้เกิดปัญหาการอุดตันของระบบ

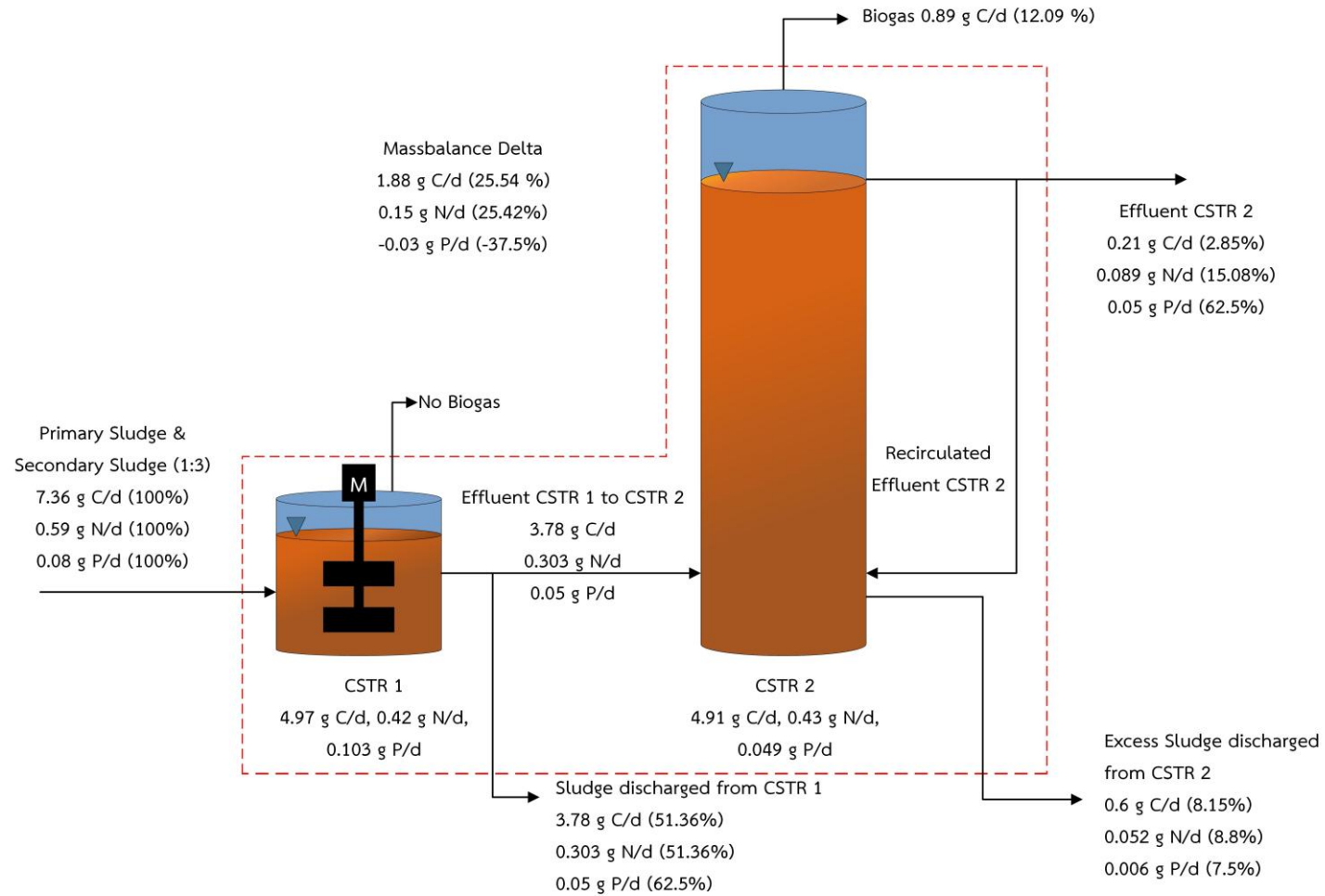
ผลการศึกษาสมดุลมวลสารสะท้อนให้เห็นว่า แม้ระบบ Two-stage CSTR จะสามารถแปลงสารอินทรีย์ได้ในระดับหนึ่ง แต่ยังมีการสะสมคาร์บอนสูงใน CSTR 2 ขณะที่สมดุล N และ P แสดงถึงแนวโน้มการสะสมในรูปชีวมวลมากกว่าการถูกแปลงเป็นก๊าซชีวภาพ สอดคล้องกับค่า C/N ratio ที่สูงมาก (845 ถึง 2,675; ตารางที่ 4.9) ซึ่งไม่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์โปรตีน

จุลินทรีย์ ทำให้จุลินทรีย์ขาดไนโตรเจนและอาจหยุดการเติบโต ส่งผลต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ (Li et al., 2019; Zhang et al., 2022)

เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงคาร์บอนเป็นก๊าซชีวภาพ ควรพิจารณาเพิ่มเติมคือ (1) การปรับค่า C/N ratio ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม (20 ถึง 30) ผ่านการเติมไนโตรเจนเสริม (เช่น urea หรือ ammonium salts) (2) การควบคุม SRT และการกำจัดกากตะกอนส่วนเกินออกจากระบบ เพื่อป้องกันการสะสม N และ P ในรูปชีวมวลมากเกินไป และ (3) การปรับปรุงค่า OLR โดยการลดภาระคาร์บอนใน CSTR 2 หรือใช้ระบบเสริม เช่น biofilm หรือ granular sludge เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ย่อยยากได้

ตารางที่ 4.10 สมดุลมวลสารอาหารของระบบระบบ Two-stage CSTR

สารอาหาร	CSTR 1			CSTR 2			Δ MB ระบบ
	Input	Output	Δ MB	Input	Output	Δ MB	
คาร์บอน (C; g C/day)	7.36	7.56	- 0.21	3.78	1.70	2.09	1.88
ไนโตรเจน (N; g N/day)	0.59	0.61	- 0.01	0.30	0.14	0.16	0.15
ฟอสฟอรัส (P; g P/day)	0.079	0.103	- 0.023	0.051	0.056	- 0.005	- 0.03



รูปที่ 4.10 แผนภาพสมดุลมวลสารอาหารคาร์บอน ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสของระบบ Two-stage CSTR

4.3.5 ผลการวิเคราะห์ชุมชนทางจุลินทรีย์ (Microbial Community)

ผลการแยกและจำแนกจุลินทรีย์ด้วยเทคนิค MALDI-TOF MS (ตารางที่ 4.11 และรูปที่ 4.11) แสดงให้เห็นถึงการจัดชั้นหน้าที่ (functional stratification) ของจุลินทรีย์ระหว่าง CSTR 1 และ CSTR 2 ที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดย CSTR 1 ทำหน้าที่หลักในการ hydrolysis และ acidogenesis ขณะที่ CSTR 2 มีบทบาทเด่นในกระบวนการ acetogenesis และ methanogenesis

4.3.5.1 โครงสร้างชุมชนจุลินทรีย์ใน CSTR 1

ใน CSTR 1 พบว่า *Bacillus cereus* เป็นสายพันธุ์เด่นในทุกสภาวะ (MALDI-TOF score 2.189 ถึง 2.303) สะท้อนถึงบทบาทสำคัญในกระบวนการย่อยสลายเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสจากกากตะกอนกระดาษ ผ่านเอนไซม์ cellulase และ xylanase (Normand et al., 2017; Morel et al., 2018) การบ่มที่ 35 °C ส่งผลให้จำนวนแบคทีเรียเพิ่มขึ้นกว่า 5.6 เท่า (42.00×10^5 CFU/mL เทียบกับ 6.35×10^5 CFU/mL ที่ 28 °C) ซึ่งสอดคล้องกับอุณหภูมิเมโซฟิลิกที่เหมาะสมต่อเอนไซม์ไฮโดรไลติก (Zakavi et al., 2022) และส่งผลให้การสลายตัวของสารอินทรีย์เกิดขึ้นรวดเร็วยิ่งขึ้น

4.3.5.2 โครงสร้างชุมชนจุลินทรีย์ใน CSTR 2

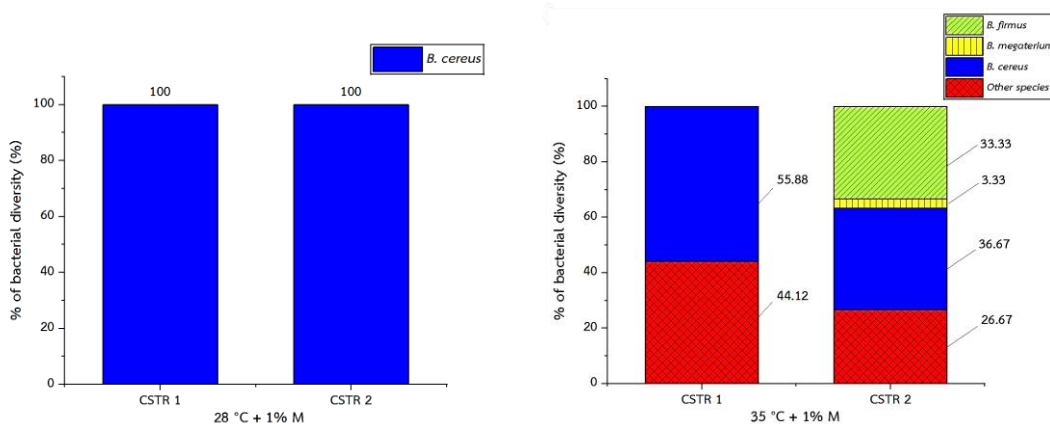
ชุมชนใน CSTR 2 มีความหลากหลายมากขึ้น โดยพบ *Bacillus megaterium* (score 2.232) และ *Bacillus firmus* (score 2.012) ซึ่งมีบทบาทสำคัญในกระบวนการ acetogenesis โดยทำหน้าที่ออกซิไดซ์ VFA ให้เป็น acetate และ H₂ ซึ่งเป็นสารตั้งต้นของ methanogenesis (Hsueh et al., 2014; Mörtelmaier et al., 2019) นอกจากนี้ ยังพบ *Bacillus subtilis* และ *Lactobacillus plantarum* ซึ่งเป็นสายพันธุ์ที่สามารถทนสภาวะเป็นกรด และช่วยปรับสมดุลระบบได้

4.3.5.3 ผลของอุณหภูมิและเมทานอลต่อชุมชนจุลินทรีย์

การบ่มที่ 35 °C ภายใต้การเติมเมทานอล ส่งเสริมการเจริญของ *B. firmus* และ *B. megaterium* ซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับ methylotrophic metabolism โดยจำนวนแบคทีเรียต่อ VSS เพิ่มขึ้น 1.8 เท่า (9.72×10^8 เทียบกับ 1.47×10^8 cells/g VSS ที่ 28 °C) (Khot et al., 2012) การปรับเปลี่ยนดังกล่าวสะท้อนถึงความยืดหยุ่นของชุมชนจุลินทรีย์ในการใช้เมทานอลเป็น co-substrate และสอดคล้องกับรายงานของ Kim et al. (2015) และ Schulthess et al. (2016) ที่พบว่า mesophilic temperature (35 °C) ช่วยเสริมความร่วมมือระหว่าง hydrolytic และ methanogenic guilds ลดการสะสมของ VFA และเพิ่มความเสถียรของระบบ

4.3.5.4 ข้อจำกัดของการวิเคราะห์และแนวทางปรับปรุง

แม้ผลการแยกเชื้อจะแสดงการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างของแบคทีเรีย แต่ไม่สามารถตรวจพบ archaea กลุ่ม methanogen ได้โดยตรง เนื่องจาก MALDI-TOF MS มุ่งเน้นการจำแนกแบคทีเรียเป็นหลัก (Vianna et al., 2021) ส่งผลให้ไม่สามารถระบุสายพันธุ์มีเทนเจน เช่น *Methanosarcina* หรือ *Methanobacterium* ได้อย่างชัดเจน ดังนั้นจึงควรเสริมด้วยการวิเคราะห์ยีนจำเพาะ เช่น *mcrA* หรือการใช้เทคนิค high-throughput sequencing เพื่อประเมินบทบาท methanogen และความสัมพันธ์กับการผลิตก๊าซชีวภาพอย่างแม่นยำ (Schulthess et al., 2016)



(ก) การบ่มที่อุณหภูมิ 28 °C

(ข) การบ่มที่อุณหภูมิ 35 °C

รูปที่ 4.11 ความหลากหลายของจุลินทรีย์ที่แยกได้จากระบบ Two-stage CSTR

ภายใต้สภาวะเต็มเมทานอล โดยใช้เทคนิค MALDI-TOF MS:

(ก) การบ่มที่อุณหภูมิ 28 °C และ (ข) การบ่มที่อุณหภูมิ 35 °C

ตารางที่ 4.11 การแยกเชื้อแบคทีเรีย ลักษณะทางสัณฐานวิทยาและการย้อมแกรม การจำแนกชนิดด้วยเทคนิค MALDI-TOF MS ของระบบ Two-stage CSTR ภายใต้สภาวะการเพาะเลี้ยงที่แตกต่างกัน

ถึง ปฏิบัติการ	สภาวะ การ ทดลอง	Isolate	ชื่อแบคทีเรีย	ลักษณะสัณฐานวิทยา	การย้อมสีแกรม	คะแนน MALDI-TOF MS	แบคทีเรีย ($\times 10^5$ CFU/mL)	จำนวนประชากร ทั้งหมด ($\times 10^5$ CFU/mL)	VSS (g/L)	จำนวนแบคทีเรีย ต่อ gVSS ($\times 10^8$)
CSTR 1	28 °C + 1% M ⁿ	1	<i>B. cereus</i>	โคโลนีใส มีเมือก	+	2.189	5.65 ± 0.21	6.35 ± 0.7	4.32 ± 0.63	1.47
		2	<i>B. cereus</i>	ขุ่น ขอบโคโลนีไม่เรียบ	+	2.303	0.3 ± 0.42			
		3	<i>B. cereus</i>	ขุ่น ขอบใส มีเมือก	+	2.238	0.4 ± 0.14			
	35 °C ^u	7	<i>B. cereus</i>	ขุ่น ขอบโคโลนีไม่เรียบ	+	2.001	2 ± 0.00	42.00 ± 2.2		
		8	<i>S. maltophilia</i>	โคโลนีใส มีเมือก	-	1.997	3 ± 1.24			
		9	<i>B. flexus</i>	โคโลนีใส พื้นผิวด้าน	+	1.899	36 ± 18.38			
		10	<i>B. licheniformis</i>	มีเมือก ใส มีจุดศูนย์กลางไม่เรียบ	+	1.706	1 ± 1.41			
	35 °C + 1% M ⁿ	18	<i>A. schindleri</i>	โคโลนีใส มีเมือก	-	1.715	7.5 ± 4.95	17.00 ± 0.6		3.94
		19	<i>B. cereus</i>	ขุ่น โคโลนีทรงกลม	-	2.204	7 ± 2.83			
		20	<i>B. cereus</i>	ขุ่น ขอบโคโลนีไม่เรียบ	+	2.182	2.5 ± 2.12			
CSTR 2	28 °C + 1% M ⁿ	4	<i>B. cereus</i>	โคโลนีใส มีเมือก	+	2.201	5.6 ± 1.27	6.55 ± 1.7	14.56 ± 1.22	0.45
		5	<i>B. cereus</i>	ขุ่น ขอบโคโลนีไม่เรียบ	+	2.260	0.35 ± 0.07			
		6	<i>B. cereus</i>	ขุ่น ขอบโคโลนีใส	+	2.312	0.6 ± 0.14			
	35 °C ^u	11	<i>B. pumilus</i>	โคโลนีใส มีเมือก	+	1.631	0.5 ± 0.71	8.00 ± 4.0		0.55
		12	<i>B. megaterium</i>	ขุ่น โคโลนีทรงกลม	+	1.516	2.5 ± 0.71			
		13	<i>B. pumilus</i>	โคโลนีใส ทรงกลม	+	1.757	1 ± 0.00			
		14	<i>B. pumilus</i>	โคโลนีใส มีสีเหลือง	-	1.749	1 ± 1.41			
		15	<i>B. subtilis</i>	ขาว มีเมือก	+	1.886	1.5 ± 2.12			
16	<i>L. plantarum</i>	โคโลนีใส จุดศูนย์กลางไม่เรียบ	-	1.475	0.5 ± 0.71					
17	<i>B. licheniformis</i>	โคโลนีใส ทรงกลม พื้นผิวด้าน	-	1.843	1 ± 0.00					

ตารางที่ 4.11 การแยกเชื้อแบคทีเรีย ลักษณะทางสัณฐานวิทยาและการย้อมแกรม การจำแนกชนิดด้วยเทคนิค MALDI-TOF MS ของระบบ Two-stage CSTR ภายใต้สภาวะการเพาะเลี้ยงที่แตกต่างกัน (ต่อ)

ถังปฏิกริยา	สภาวะการทดลอง	Isolate	ชื่อแบคทีเรีย	ลักษณะสัณฐานวิทยา	การย้อมสีแกรม	คะแนน MALDI-TOF MS	แบคทีเรีย ($\times 10^5$ CFU/mL)	จำนวนประชากรทั้งหมด ($\times 10^5$ CFU/mL)	VSS (g/L)	จำนวนแบคทีเรียต่อ gVSS ($\times 10^8$)
CSTR 2 (ต่อ)	35 °C + 1% M ^ก	21	<i>B. subtilis</i>	มีเมือก ใส ขอบโคโลนีไม่เรียบ	-	1.739	4 ± 2.83	15.00 ± 0.8	14.56 ± 1.22	1.03
		22	<i>B. cereus</i>	ขุ่น ทรงกลม พื้นผิวด้าน	+	2.200	5.5 ± 3.54			
		23	<i>B. megaterium</i>	ขุ่น โคโลนีทรงกลม	+	2.232	0.5 ± 0.71			
		24	<i>B. firmus</i>	โคโลนีใส ทรงกลม	-	2.012	5 ± 1.41			
		24	<i>B. firmus</i>	โคโลนีใส ทรงกลม	-	2.012	5 ± 1.41			

หมายเหตุ ^ก เพาะเลี้ยงบนอาหารเลี้ยงเชื้อชนิด nutrient agar (NA) ที่เติมเมทานอลร้อยละ 1 และบ่มที่อุณหภูมิ 28 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

^ข เพาะเลี้ยงบน NA และบ่มที่อุณหภูมิ 35 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และ ^ค เพาะเลี้ยงบน NA ที่เติมเมทานอลร้อยละ 1 และบ่มที่อุณหภูมิ 35 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

4.4 การประเมินศักยภาพการขยายขนาดของระบบ Two-stage CSTR

สู่การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษรีไซเคิล

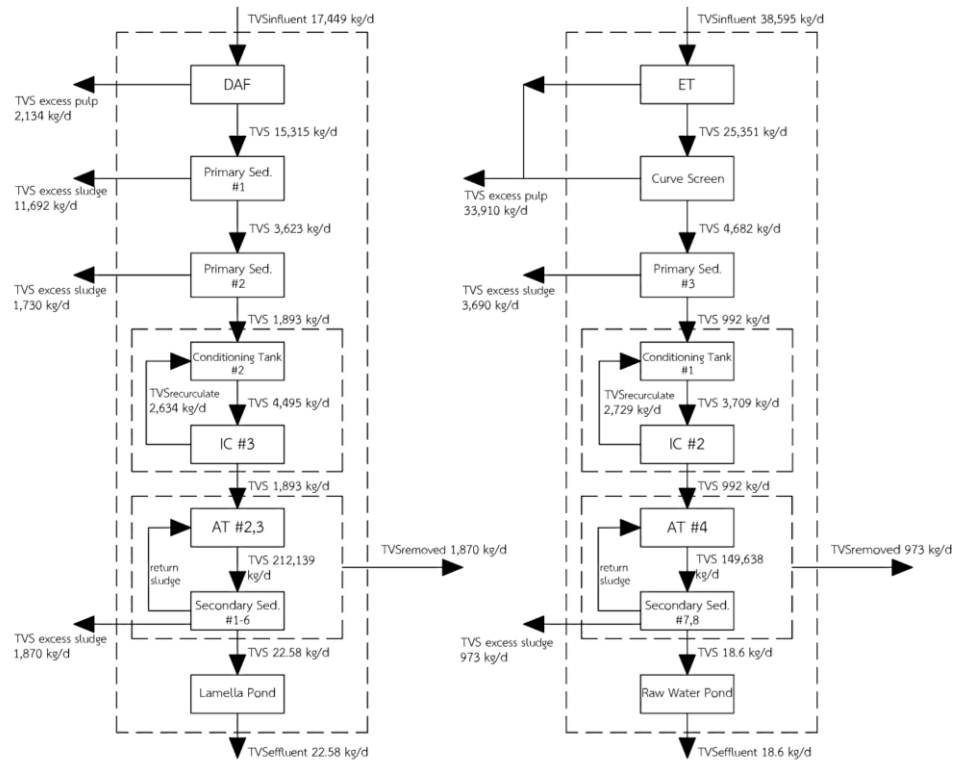
การประเมินศักยภาพการขยายขนาดของระบบ Two-stage CSTR มีความสำคัญต่อการกำหนดศักยภาพในการนำเทคโนโลยีไปใช้ในระดับอุตสาหกรรม โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมผลิตกระดาษรีไซเคิลที่มีการปลดปล่อยกากตะกอนส่วนเกินจำนวนมาก การศึกษาครั้งนี้จึงไม่เพียงมุ่งเน้นการประเมินประสิทธิภาพการย่อยสลายในระดับห้องปฏิบัติการ แต่ยังเชื่อมโยงข้อมูลเชิงปฏิบัติการไปสู่ การจัดการของเสีย การสร้างสมดุลคาร์บอน และการประเมินพลังงานทดแทน

4.4.1 สมดุลมวลอินทรีย์คาร์บอนในระบบบำบัดน้ำเสีย

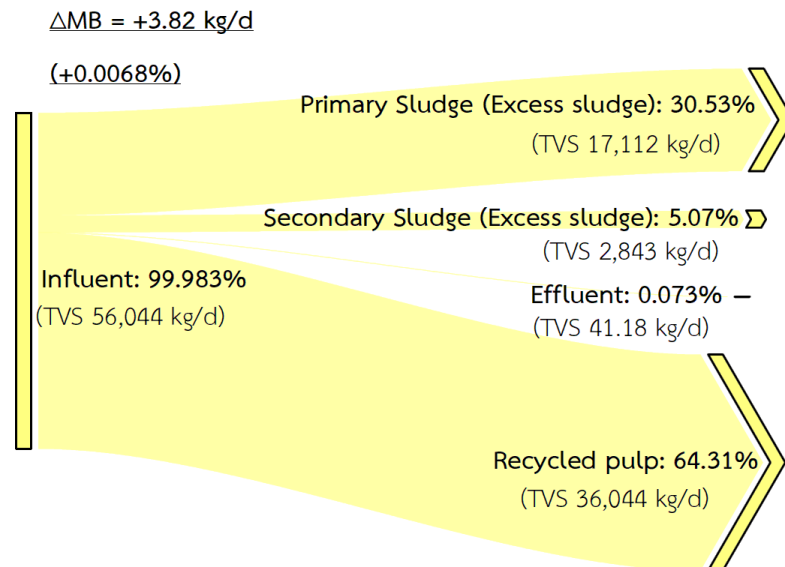
สมดุลมวลสารอินทรีย์คาร์บอนของระบบบำบัดน้ำเสีย ตามที่แสดงในรูปที่ 4.12-4.13 ให้ภาพรวมของการไหลของสารอินทรีย์คาร์บอนภายในโรงงานกระดาษรีไซเคิล และชี้ให้เห็นโอกาสสำคัญในการเพิ่มมูลค่าทรัพยากรสอดคล้องกับแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน (CE) ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนรวมที่เข้าสู่กระบวนการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งแทนด้วยค่า TVS ถูกประเมินไว้ที่ 56,044 กิโลกรัมต่อวัน

สัดส่วนสารอินทรีย์คาร์บอนที่มากที่สุด จำนวน 36,044 กิโลกรัมต่อวัน (ร้อยละ 64.31) มาจากเยื่อกระดาษรีไซเคิล ซึ่งถูกหมุนเวียนกลับเข้าสู่กระบวนการผลิตกระดาษทั้งหมด การนำกลับมาใช้เป็นตัวอย่างที่ดีของการประยุกต์ใช้กลยุทธ์ CE อย่างมีประสิทธิภาพ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากรและลดการพึ่งพาวัตถุดิบใหม่ตามคำแนะนำของ Husgafvel et al. (2018)

สัดส่วนที่สำคัญอันดับสองของสารอินทรีย์คาร์บอนในระบบบำบัดน้ำเสียคือ กากตะกอนส่วนเกิน ซึ่งคิดเป็น 19,955 กิโลกรัมต่อวัน (ร้อยละ 35.60 ของค่า TVS ทั้งหมด) แบ่งออกเป็นกากตะกอน PS ร้อยละ 30.53 และกากตะกอน SS ร้อยละ 5.07 โดยตรวจพบเพียงร้อยละ 0.073 ของค่า TVS ในน้ำทิ้งขั้นสุดท้าย แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพสูงในการแยกของแข็งและของเหลวภายในระบบบำบัดน้ำเสีย ค่าเบี่ยงเบนสมดุลมวลรวม (ΔMB) คำนวณได้เท่ากับร้อยละ +0.0068 ซึ่งสะท้อนถึงความแม่นยำในการประเมินการไหลของมวลและยืนยันความน่าเชื่อถือของโมเดลสมดุลสารอินทรีย์คาร์บอนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ อ้างอิงตามงานวิจัยของ Hakiki et al. (2019)



รูปที่ 4.12 แผนภาพสมดุลของค่า TVS ในระบบบำบัดน้ำเสีย



รูปที่ 4.13 แผนภาพสมดุลของค่า TVS ในระบบบำบัดน้ำเสีย

จากข้อมูลการดำเนินงานระยะยาวที่เก็บรวบรวมระหว่างเดือนเมษายน 2020 ถึง กุมภาพันธ์ 2025 โรงงานผลิตกากตะกอนส่วนเกินรวม 2,841 m³/day หลังผ่านกระบวนการทำชั้นรีดน้ำด้วยสายพาน และอบแห้ง สามารถผลิตกากตะกอนแห้งได้ประมาณ 61.3 เมตริกตันต่อวัน (ton/day) ปัจจุบันกากตะกอนแห้งนี้ยังไม่ได้รับการนำกลับมาใช้ภายในโรงงาน แต่ถูกขนย้ายออกไปกำจัดภายนอก ซึ่งเป็นการพลาดโอกาสในการกู้คืนพลังงานภายใน

หลายงานวิจัยที่ผ่านมาชี้ให้เห็นถึงศักยภาพด้านพลังงานหมุนเวียนของกากตะกอนส่วนเกินจากโรงงานกระดาษรีไซเคิล ตัวอย่างเช่น Fioreze & Silva (2023) แสดงให้เห็นว่าการปรับสภาพเบื้องต้นกากตะกอนด้วยวิธีความร้อนหรือความร้อน-ต่าง สามารถเพิ่มผลผลิตมีเทนได้มากถึง 4.7 เท่าเมื่อเทียบกับกากตะกอนที่ไม่ได้เตรียม โดยเพิ่มปริมาณของค่า BOD ที่ละลายได้และเร่งการผลิตมีเทน (ภายใน 15 ถึง 20 วัน) ในบางกรณี ผลผลิตก๊าซชีวภาพรวมเพิ่มขึ้นมากกว่าร้อยละ 300 ความร้อนเหลือใช้ภายในโรงงานกระดาษรีไซเคิลยังสนับสนุนความเป็นไปได้ทางเศรษฐกิจของกลยุทธ์การเตรียมกากตะกอนเหล่านี้

ในเวลาเดียวกัน Kuo et al. (2023) รายงานผลลัพธ์ที่ดีจากการผสมกากตะกอนส่วนเกินกับของเสียอุตสาหกรรมอื่น ๆ เพื่อผลิต RDF-5 เชื้อเพลิงแข็งคุณภาพสูงที่มีค่าพลังงานใกล้เคียงกับเชื้อเพลิงฟอสซิลทั่วไป แนวทางนี้ช่วยให้สามารถผลิตพลังงานความร้อนภายในโรงงานได้พร้อมทั้งลดการพึ่งพาการฝังกลบ

ความเข้มข้นของค่า TVS สูงของกากตะกอนส่วนเกิน โดยเฉพาะกากตะกอน PS แสดงถึงศักยภาพสูงในการกู้คืนพลังงานผ่านกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน (AD) ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับ Hagelqvist (2013) ซึ่งยืนยันความเป็นไปได้ทางเศรษฐกิจของการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนส่วนเกินของโรงงานกระดาษรีไซเคิลทั้งโดยกระบวนการชีวภาพแบบปกติและแบบกึ่งน้ำ

สรุปได้ว่า สมดุลมวลสารอินทรีย์คาร์บอนอย่างละเอียดไม่เพียงยืนยันการไหลของสารอินทรีย์ภายในระบบบำบัดน้ำเสียเท่านั้น แต่ยังระบุแหล่งของเสียสำคัญ ได้แก่ กากตะกอนส่วนเกินและกากตะกอนแห้ง ว่าเป็นทรัพยากรที่สามารถแปรรูปเป็นก๊าซชีวภาพหรือ RDF การใช้ประโยชน์จากผลการศึกษานี้อาจเร่งกระบวนการเปลี่ยนผ่านสู่ระบบ WTE แบบบูรณาการเพิ่มประสิทธิภาพทั้งด้านสิ่งแวดล้อมและเศรษฐศาสตร์ของโรงงานกระดาษรีไซเคิล

4.4.2 สมดุลพลังงานของโรงงานกระดาษรีไซเคิล: แนวทางในการบูรณาการ

พลังงานหมุนเวียน

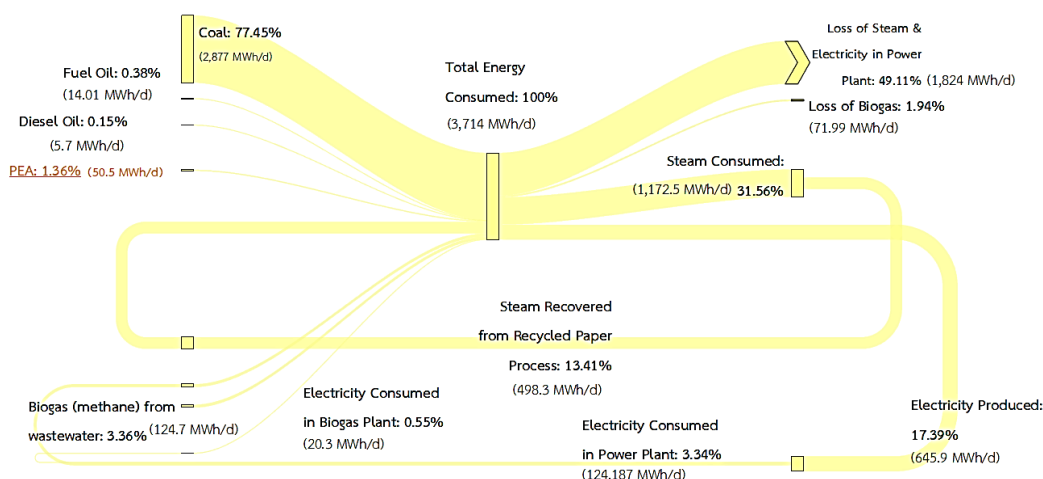
มีการประเมินการไหลของพลังงานในโรงงานผลิตกระดาษรีไซเคิลอย่างครอบคลุมเพื่อวิเคราะห์สภาพพลังงานปัจจุบันและระบุโอกาสในการบูรณาการแหล่งพลังงานหมุนเวียน

ผลลัพธ์ที่นำเสนอในรูปแบบที่ 4.14 และ 4.15 และตาราง 4.12 แสดงให้เห็นถึงระบบพลังงานที่ซับซ้อนซึ่งมีลักษณะสำคัญคือพึ่งพาพลังงานฟอสซิลอย่างสูง เกิดการสูญเสียพลังงานในระดับมาก และยังมีศักยภาพของพลังงานหมุนเวียนที่ไม่ได้ถูกใช้อย่างเต็มที่

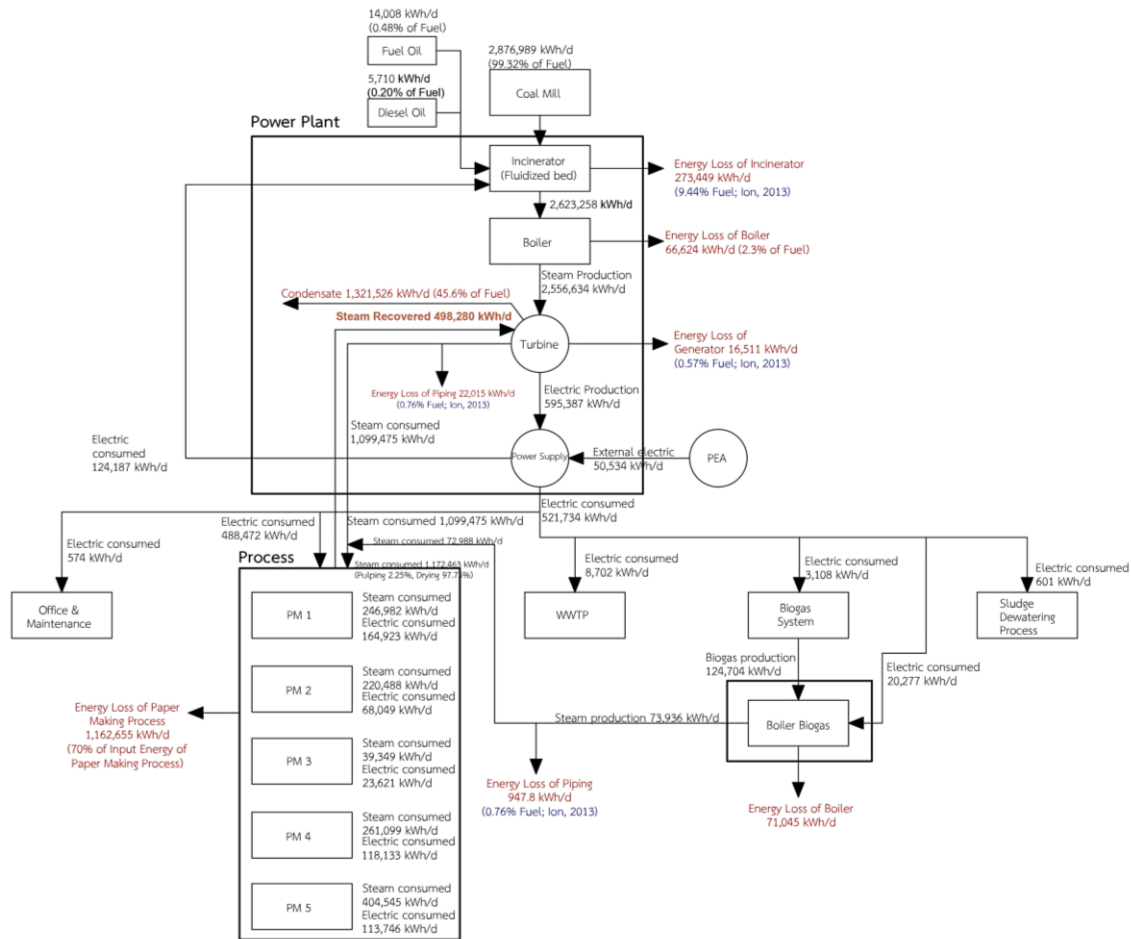
พลังงานที่ใช้ในโรงงานมาจากแหล่งหลักสามประเภท ได้แก่ ไฟฟ้าที่ซื้อจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA) ของประเทศไทย ไฟฟ้าและไอน้ำที่ผลิตโดยโรงไฟฟ้าถ่านหินภายในโรงงาน และพลังงานความร้อนที่กู้คืนจากก๊าซชีวภาพซึ่งผลิตจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียจากพลังงานรวมที่ร้อยละ 77.45 มาจากการเผาไหม้ถ่านหิน หรือเทียบเท่า 2,877 เมกะวัตต์ชั่วโมงต่อวัน (MWh/day) โดยอ้างอิงจากการใช้ถ่านหิน 221,983 ton/year น้ำมันเตา (462,818 L/year) และดีเซล (206,020 L/year) มีสัดส่วนเพิ่มขึ้นอีกร้อยละ 0.38 (14.01 MWh/day) และร้อยละ 0.15 (5.7 MWh/day) ตามลำดับ

ถ่านหินที่ใช้ในโรงงานเป็นถ่านหินซับบิทูมินัสจากอินโดนีเซีย โดยมีค่าพลังงานความร้อนปกติระหว่าง 4,100 ถึง 5,300 kcal/kg (Belkin & Tewalt, 2007) สำหรับถ้อยถ่านหินที่ใช้ในโรงงานกระดาษรีไซเคิลนี้มีค่าเฉลี่ยประมาณ 4,070 kcal/kg (ตามการทดสอบของโรงงาน)

ค่าพลังงานความร้อนของน้ำมันเตาและดีเซลที่ใช้ในโรงงานอยู่ที่ประมาณ 11.05 kWh/L และ 10.1 kWh/L ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับค่ามาตรฐานที่รายงานโดย U.S. Environmental Protection Agency (2015) ที่ระบุว่าพลังงานของน้ำมันเตาและดีเซลอยู่ที่ประมาณ 10.69 kWh/L



รูปที่ 4.14 แผนภาพการไหลของพลังงานในโรงงานกระดาษรีไซเคิล



รูปที่ 4.15 แผนภาพสมดุลพลังงานในโรงงานกระดาษรีไซเคิล

แม้ว่าจะมีแหล่งพลังงานหลากหลาย แต่โรงงานยังคงพึ่งพาพลังงานฟอสซิลอย่างสูง ซึ่งส่งผลกระทบต่อคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของโรงงาน รูปแบบนี้สะท้อนแนวโน้มในอุตสาหกรรมที่กว้างขึ้น ซึ่งรายงานโดย International Energy Agency (IEA) พบว่า ประสิทธิภาพพลังงานในอุตสาหกรรม กระดาษทั่วโลกตกลงเฉลี่ยร้อยละ 1 ต่อปีตั้งแต่ปี 2010 (IEA, 2023)

โรงไฟฟ้าภายในพื้นที่ ซึ่งใช้ไฟฟ้า 124.2 MWh/day สำหรับการดำเนินงานภายใน (คิดเป็นร้อยละ 3.34 ของการใช้ไฟฟ้าทั้งหมด) ผลิตไฟฟ้าได้ 646 MWh/day (ร้อยละ 17.39) และ ไอน้ำ 1,531 ton/day โดยมีไอน้ำที่กู้คืนจากกระบวนการผลิตกระดาษรีไซเคิลจำนวน 498.3 MWh/day (เทียบเท่า 694 ton/day) ถูกนำกลับมาใช้ผลิตไฟฟ้า คิดเป็นร้อยละ 13.41 ของการใช้พลังงานรวม แสดงให้เห็นถึงการจัดการกู้คืนความร้อนที่มีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในอุตสาหกรรมนี้ที่กระบวนการอบกระดาษใช้พลังงานมากถึงร้อยละ 70 ของการใช้พลังงานทั้งหมด (IEA, 2023)

อย่างไรก็ตาม การสูญเสียพลังงานยังคงเป็นปัญหาสำคัญ โรงไฟฟ้าภายในพื้นที่คิดเป็นร้อยละ 49.11 ของการสูญเสียพลังงานทั้งหมด ขณะที่สายการผลิตกระดาษมีการสูญเสียพลังงาน สูงถึงร้อยละ 70 ของพลังงานป้อนเข้า หรือประมาณ 1,163 MWh/day ซึ่งมาจากไอน้ำ 940 ton/day และไฟฟ้า 488.5 MWh/day ตัวเลขเหล่านี้สะท้อนถึงความจำเป็นเร่งด่วนในการปรับปรุง ประสิทธิภาพพลังงาน

ระบบผลิตก๊าซชีวภาพบำบัดน้ำเสีย 22,428 m³/day และผลิตก๊าซชีวภาพ 15,444 m³/day โดยมีความเข้มข้นของมีเทนสูงถึงร้อยละ 80.97 หรือเทียบเท่า 12,505.18 m³/day ของ CH₄ ระบบนี้สามารถผลิตไอน้ำ 103 ton/day โดยใช้ไฟฟ้าเพียง 20.3 MWh/day (ร้อยละ 0.55) การสูญเสียพลังงานจากระบบก๊าซชีวภาพอยู่ในระดับต่ำ เพียงร้อยละ 1.94 ของพลังงานรวม ที่ใช้ในโรงงาน ผลลัพธ์เหล่านี้สอดคล้องกับ Larsson et al. (2015) ซึ่งเน้นถึงศักยภาพของน้ำเสีย ความเข้มข้นสูงจากโรงงานกระดาษรีไซเคิลในการผลิตก๊าซชีวภาพปริมาณมากเมื่อมีการจัดการ ที่เหมาะสม

แม้ว่าจะมีการผลิตพลังงานในพื้นที่อย่างมีนัยสำคัญ โรงงานยังคงนำเข้าไฟฟ้า 50.5 MWh/day (ร้อยละ 1.36 ของการใช้ไฟฟ้าทั้งหมด) จากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA) ส่งผลให้เกิดค่าใช้จ่ายประจำปีประมาณ 65.7 ล้านบาท แม้ว่าการพึ่งพาไฟฟ้าภายนอกนี้จะไม่สูงมาก แต่การ ค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวข้องเน้นถึงความจำเป็นในการขยายระบบพลังงานหมุนเวียนภายในพื้นที่เพื่อช่วยลดต้นทุนการดำเนินงานและเพิ่มความเป็นอิสระด้านพลังงาน

ตารางที่ 4.12 สรุปการใช้พลังงานและการกู้คืนพลังงานภายใต้สถานการณ์การดำเนินงานต่าง ๆ ของโรงงาน

ลำดับ	ขอบเขตของระบบ	kWh/day							
		พลังงานขาเข้า			พลังงานขาออก			พลังงาน ที่ถูกกู้คืน กลับมาใช้ (Recovered energy)	พลังงานสะสม (Energy accumulated)
		เชื้อเพลิง (Fuel)	พลังงานจาก ภายนอก (External)	ผลรวม พลังงานขา เข้าระบบ	พลังงานที่ใช้ (Output of useful)	พลังงาน สูญเสีย (Output of loss)	ผลรวม พลังงานขา ออกระบบ		
(ก) สถานการณ์ปัจจุบันของโรงงาน									
1	โรงไฟฟ้า (Power Plant)	2,896,707	50,534	2,947,241	1,745,396	1,700,125	3,445,521	498,280	0
2	โรงไฟฟ้าก๊าซชีวภาพจากน้ำเสีย (Biogas Power Plant – Wastewater)	144,981	-	144,981	72,988	71,993	144,981	-	0
3	กระบวนการผลิตกระดาษรีไซเคิล (Recycled Paper Process)	1,660,935			498,281	1,162,655	1,660,935	-	0
(ข) สถานการณ์ที่ 1: การผลิตเชื้อเพลิงขยะ (RDF Production)									
1	โรงไฟฟ้า (Power Plant)	2,940,813	85,550	3,026,363	1,786,012	1,738,631	3,524,643	498,280	0
2	โรงไฟฟ้าก๊าซชีวภาพจากน้ำเสีย (Biogas Power Plant – Wastewater)	144,981	-	144,981	72,988	71,993	144,981	-	0
3	โรงงานผลิต RDF จากกากตะกอน ส่วนเกิน (RDF Plant – Excess Sludge)	126,006	-	126,006	44,106	81,900	126,006	-	0

ตารางที่ 4.12 สรุปการใช้พลังงานและการกู้คืนพลังงานภายใต้สถานการณ์การดำเนินงานต่าง ๆ ของโรงงาน (ต่อ)

ลำดับ	ขอบเขตของระบบ	kWh/day							
		พลังงานขาเข้า			พลังงานขาออก			พลังงาน ที่ถูกกู้คืน กลับมาใช้ (Recovered energy)	พลังงานสะสม (Energy accumulated)
		เชื้อเพลิง (Fuel)	พลังงานจาก ภายนอก (External)	ผลรวม พลังงานขา เข้าระบบ	พลังงานที่ใช้ (Output of useful)	พลังงาน สูญเสีย (Output of loss)	ผลรวม พลังงานขา ออกระบบ		
(ข) สถานการณ์ที่ 1: การผลิตเชื้อเพลิงขยะ (RDF Production) (ต่อ)									
4	กระบวนการผลิตกระดาษรีไซเคิล (Recycled Paper Process)	1,660,935			498,281	1,162,655	1,660,935	-	0
(ค) สถานการณ์ที่ 2: การผลิตเชื้อเพลิงก๊าซชีวภาพ (Biogas Production)									
1	โรงไฟฟ้า (Power Plant)	2,983,476	54,421	3,037,897	1,766,363	1,769,814	3,536,177	498,280	0
2	โรงไฟฟ้าก๊าซชีวภาพจากน้ำเสีย (Biogas Power Plant – Wastewater)	144,981	-	144,981	72,988	71,993	144,981	-	0
3	โรงไฟฟ้าก๊าซชีวภาพจากกากตะกอน ส่วนเกิน (Biogas Power Plant – Excess Sludge)	109,722	-	109,722	86,769	22,953	109,722	-	0
4	กระบวนการผลิตกระดาษรีไซเคิล (Recycled Paper Process)	1,660,935			498,281	1,162,655	1,660,935	-	0

หมายเหตุ ระบบดำเนินงานภายใต้สภาวะคงที่ (steady-state) โดยไม่มีการสะสมพลังงาน

4.4.3 แนวทางการจัดการพลังงานในอุตสาหกรรมกระดาษรีไซเคิล

ผลการศึกษาในส่วนก่อนหน้าสะท้อนให้เห็นถึงความซับซ้อนโดยธรรมชาติของระบบพลังงานในโรงงานกระดาษรีไซเคิล โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านการสร้างสมดุลระหว่างประสิทธิภาพพลังงานกับการบูรณาการพลังงานหมุนเวียน แม้ว่าโรงงานจะได้นำมาตรการที่นำขึ้นชมมาใช้ เช่น การกู้คืนไอน้ำและการผลิตก๊าซชีวภาพภายในพื้นที่ แต่การวิเคราะห์ยังพบการสูญเสียพลังงานอย่างมีนัยสำคัญ และความพึงพอใจพลังงานฟอสซิลยังคงมีอยู่ ปัญหาเหล่านี้สะท้อนแนวโน้มทั่วไปในอุตสาหกรรมและเน้นย้ำถึงความจำเป็นเร่งด่วนในการดำเนินมาตรการที่มุ่งปรับปรุงทั้งด้านสิ่งแวดล้อมและเศรษฐศาสตร์

เพื่อสนับสนุนการเปลี่ยนผ่านสู่ความยั่งยืนในอนาคต จึงมีการเสนอทิศทางเชิงกลยุทธ์หลายประการ ซึ่งรวมถึงการลดการสูญเสียพลังงานตลอดกระบวนการผลิต โดยเน้นเป็นพิเศษที่การเพิ่มประสิทธิภาพในหน่วยผลิตไฟฟ้าและขั้นตอนการอบกระดาษซึ่งใช้พลังงานสูงพร้อมกันนี้ ควรเพิ่มการบูรณาการแหล่งพลังงานหมุนเวียนให้มากขึ้น โดยเฉพาะการเพิ่มศักยภาพในการกู้คืนพลังงานจากระบบก๊าซชีวภาพภายในโรงงาน นอกจากนี้ ควรมีความพยายามระยะยาวในการสำรวจเส้นทางการเพิ่มมูลค่าของเสียขั้นสูง เช่น การนำเทคโนโลยีไบโอรีไฟน์เนอรี (biorefinery) มาใช้เพื่อแปรรูปกากตะกอนกระดาษให้เป็นสารชีวเคมีและวัสดุชีวภาพมูลค่าสูง (Bajpai, 2015) มาตรการเหล่านี้รวมกันแล้วจะช่วยให้เกิดแนวทางครบวงจรในการปรับปรุงทั้งประสิทธิภาพด้านสิ่งแวดล้อมและการใช้ทรัพยากรภายในโรงงาน

นอกจากนี้ ยังแนะนำให้มีการดำเนินการประเมินวงจรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA) ของระบบพลังงานของโรงงานอย่างครอบคลุม เพื่อให้เข้าใจภาพรวมของการแลกเปลี่ยนด้านสิ่งแวดล้อมตลอดห่วงโซ่คุณค่าพลังงาน และสอดคล้องกับคำแนะนำของหน่วยงานพลังงานระหว่างประเทศ (International Energy Agency: IEA, 2023) ในการเพิ่มความโปร่งใสของข้อมูลและการติดตามคาร์บอนฟุตพริ้นท์ในอุตสาหกรรมกระดาษรีไซเคิล

มาตรการเหล่านี้มีความสำคัญโดยเฉพาะสำหรับการบรรลุเป้าหมายการปล่อยก๊าซสุทธิเป็นศูนย์ (Net Zero Emissions: NZE) ภายในปี 2050 ซึ่งต้องมีการปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงานมากกว่าระดับปัจจุบันถึงสองเท่าภายในปี 2030

4.4.3.1 แนวทางการจัดการพลังงาน

เพื่อส่งเสริมแนวปฏิบัติเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy: CE) ในการดำเนินงานในอุตสาหกรรม มีการเสนอสองสถานการณ์การผลิตพลังงานจากของเสีย (Waste-to-Energy: WTE) สำหรับการเพิ่มมูลค่าจากตะกอนส่วนเกินที่เกิดจากการผลิตกระดาษรีไซเคิล

สถานการณ์ที่ 1: การผลิตเชื้อเพลิงขยะ (Refuse-derived Fuel: RDF) จากกากตะกอนส่วนเกิน

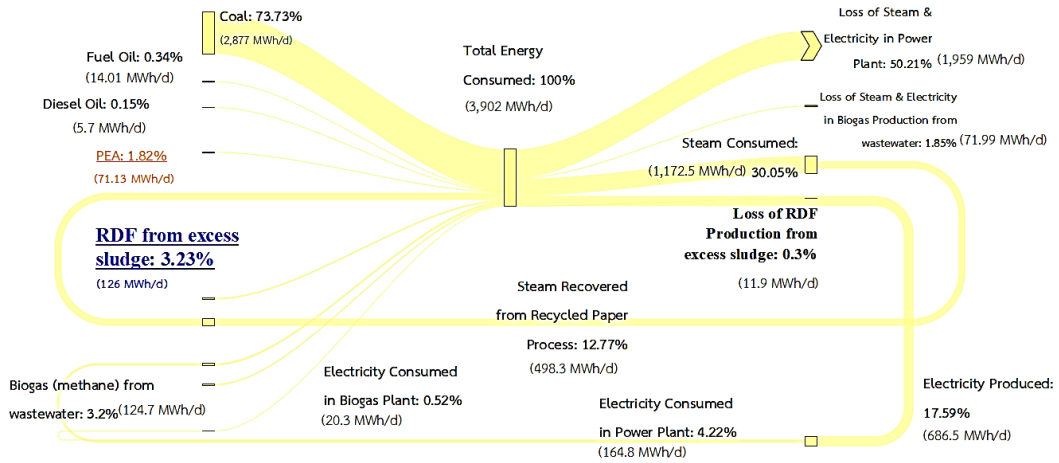
สำหรับสถานการณ์ที่ 1 (การผลิตเชื้อเพลิง RDF จากกากตะกอนส่วนเกิน) พิจารณากากตะกอนรีดน้ำปริมาณ 61.3 ton/day โดยมีค่าพลังงานสูงสุดเฉลี่ย (Higher Heating Value: HHV) เท่ากับ 7.4 MJ/kg เป็นวัตถุดิบเชื้อเพลิง RDF ถูกเผาไหม้ในหม้อไอน้ำแบบ fluidised-bed เพื่อผลิตพลังงานความร้อน ซึ่งต่อมาถูกแปลงเป็นไฟฟ้าด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าภายในโรงงาน

ตามการประเมินสมดุลพลังงาน (รูปที่ 4.16ก และ 4.17; ตาราง 4.12ข) กระบวนการนี้ให้ผลผลิตไฟฟ้าสุทธิเท่ากับ 600,987 kWh/day (การใช้ไฟฟ้าภายนอก 85,550 kWh/day รวมเป็นการใช้ไฟฟ้าทั้งหมด 686,537 kWh/day) อย่างไรก็ตาม การดำเนินการตามสถานการณ์นี้ทำให้ความต้องการไฟฟ้าภายนอกเพิ่มขึ้นร้อยละ 69.28 หรือเทียบเท่า 35,010 kWh/day ส่งผลให้ต้นทุนการซื้อไฟฟ้าประจำปีเพิ่มขึ้นประมาณ 46 ล้านบาท

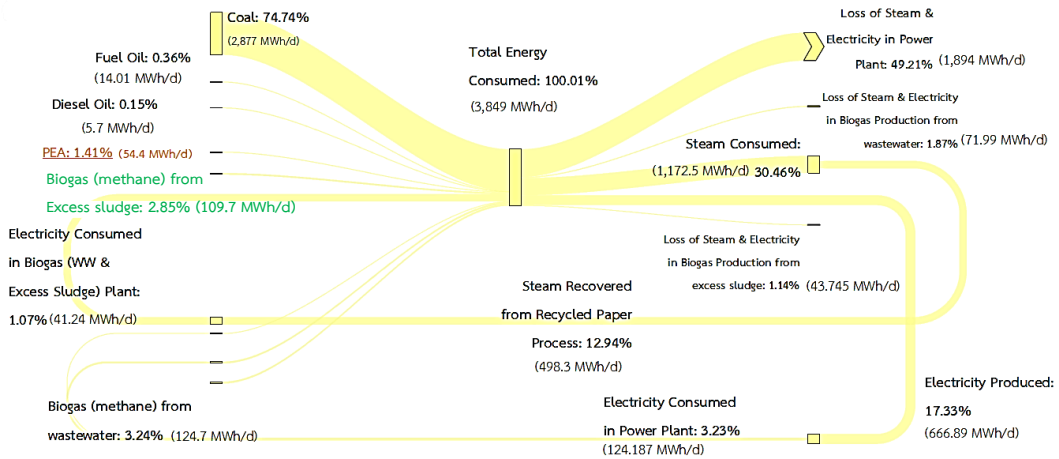
สถานการณ์ที่ 2: การผลิตเชื้อเพลิงก๊าซชีวภาพ (Biogas Production) จากกากตะกอนส่วนเกิน

สำหรับสถานการณ์ที่ 2 (การผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนส่วนเกิน) ผ่านกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน: AD) ประเมินศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยใช้กากตะกอนดิบ 2,841 m³/day ในสัดส่วนผสมกากตะกอน PS:SS ที่ 1:3 ส่งผลให้ปริมาณการผลิตมีเทนประมาณ 11,002.8 m³/day โดยอัตราการผลิตมีเทนเท่ากับ 918.66 mL CH₄/g VS_{fed} ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม ซึ่งรายงานโดย Nammana et al. (2025) อย่างไรก็ตาม การศึกษาของ Lin et al. (2011), Bayr & Rintala (2012) และ Lopes et al. (2018) ชี้ว่าอัตราการผลิตมีเทนจากกากตะกอนโรงงานกระดาษมักอยู่ระหว่าง 230 ถึง 519 mL CH₄/g VS_{fed} โดยอ้างอิงทั้งจากข้อมูลของ Nammana et al. (2025) และค่ามาตรฐานจากวรรณกรรม จึงใช้ค่าอัตราการผลิตมีเทนเฉลี่ยเท่ากับ 582 mL CH₄/g VS_{fed} สำหรับการประเมินนี้

มีเทนที่ผลิตได้ถูกเผาไหม้เพื่อสร้างไอน้ำ ซึ่งต่อมาใช้ผลิตไฟฟ้า ตามที่แสดงในรูปที่ 4.16ข และ 4.18; และตาราง 4.12ค กระบวนการนี้ให้ผลผลิตไฟฟ้าสุทธิเท่ากับ 612,467 kWh/day (การใช้ไฟฟ้าภายนอก 54,421 kWh/day รวมเป็นการใช้ไฟฟ้าทั้งหมด 666,888 kWh/day) อย่างไรก็ตาม สถานการณ์นี้ทำให้ความต้องการไฟฟ้าภายนอกเพิ่มขึ้นร้อยละ 7.70 หรือเทียบเท่า 3,887 kWh/day ส่งผลให้ต้นทุนประจำปีเพิ่มขึ้นประมาณ 5.1 ล้านบาท

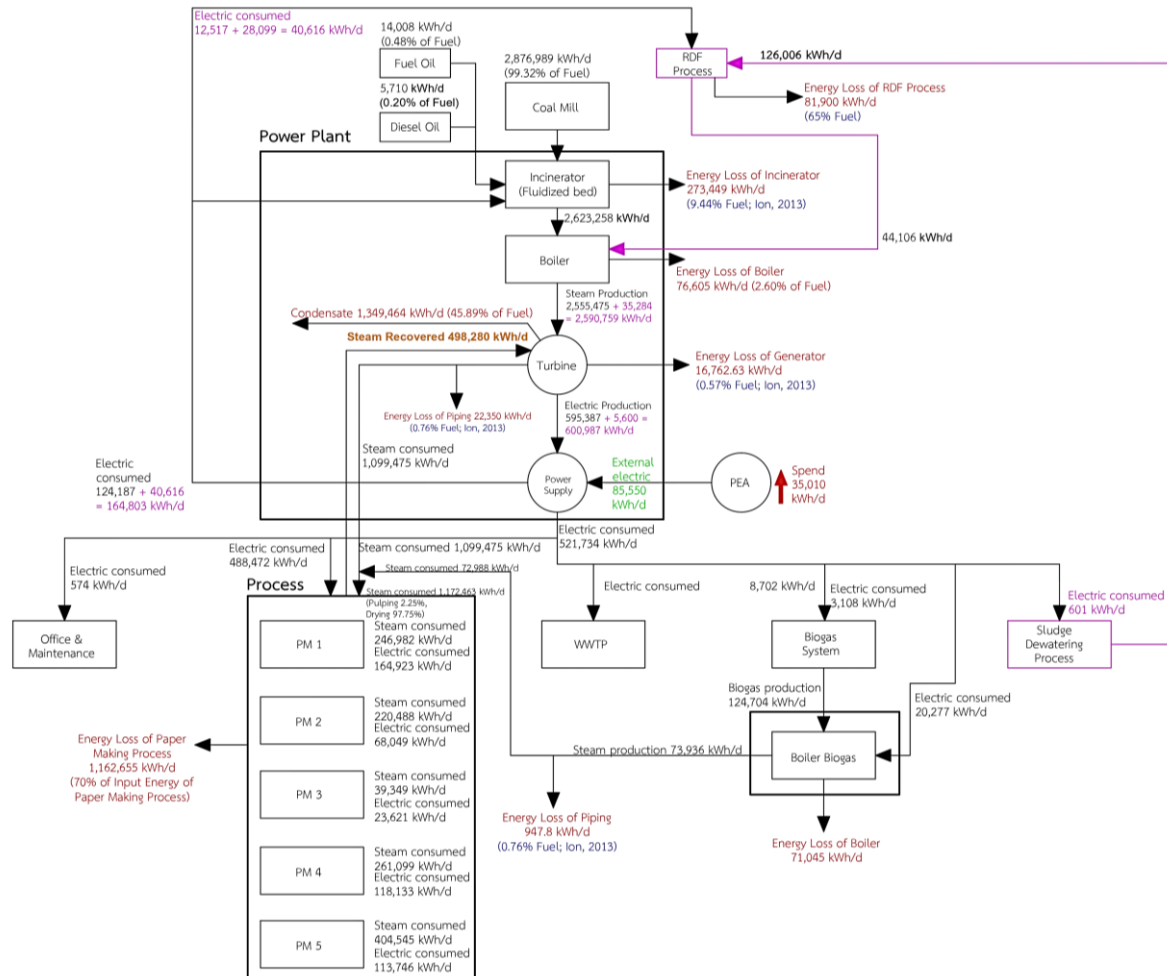


(ก) สถานการณ์ที่ 1

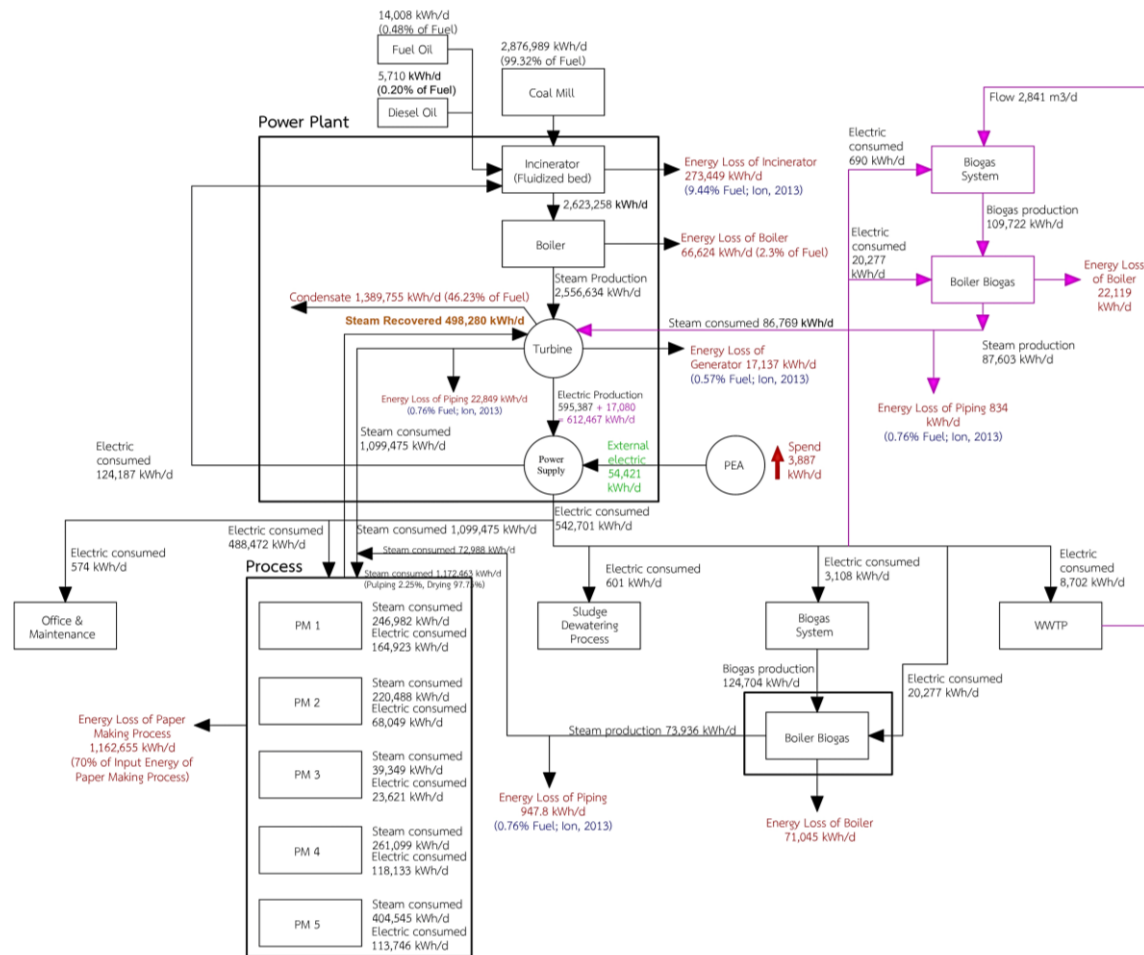


(ข) สถานการณ์ที่ 2

รูปที่ 4.16 แผนภาพสมดุลพลังงานระหว่าง (ก) สถานการณ์ที่ 1 (การผลิตเชื้อเพลิงขยะ) และ (ข) สถานการณ์ที่ 2 (การผลิตก๊าซชีวภาพ)



รูปที่ 4.17 แผนภาพสมดุลพลังงานในโรงงานกระดาษรีไซเคิลในสถานการณ์ที่ 1 (การผลิตเชื้อเพลิง RDF)



รูปที่ 4.18 แผนภาพสมดุลพลังงานในโรงงานกระดาษรีไซเคิลในสถานการณที่ 2 (การผลิตก๊าซชีวภาพ)

4.4.3.2 ลักษณะของเชื้อเพลิงและศักยภาพด้านพลังงาน

ลักษณะของเชื้อเพลิงและศักยภาพด้านพลังงาน แสดงถึงแนวทางการฟื้นฟูพลังงานอย่างยั่งยืนจากกากตะกอนส่วนเกินของโรงงานกระดาษรีไซเคิล สถานการณ์หลัก 2 แนวทาง ได้แก่ การผลิตเชื้อเพลิง RDF และการผลิตก๊าซชีวภาพผ่านกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน ทั้งสองทางเลือกมีศักยภาพด้านพลังงานสูง และช่วยลดการพึ่งพาพลังงานฟอสซิลพร้อมเพิ่มความเป็นอิสระด้านพลังงานของโรงงาน การวิเคราะห์เปรียบเทียบผลผลิตพลังงานของแต่ละทางเลือกตามอัตราการเกิดกากตะกอนส่วนเกิน ความเข้มข้นของค่า TVS และประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปเป็นพลังงาน ทั้งในรูปค่าความร้อนของ RDF และอัตราการผลิตมีเทนด้วยกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยสนับสนุนด้วยผลการศึกษาและข้อมูลจากเอกสารอ้างอิงที่เกี่ยวข้อง

สถานการณ์ที่ 1: ศักยภาพการผลิตเชื้อเพลิงขยะ (RDF Fuel Potential)

จากการประเมินปริมาณกากตะกอนรีตอร์ตอร์วัน พบว่าปริมาณกากตะกอนอยู่ที่ประมาณ 61.3 ton/day (หลังรีตอร์ตอร์) สามารถได้ผลิตภัณฑ์ RDF ที่ 21.5 ton/day โดยมีค่าความร้อนจำเพาะ (calorific value) วัดได้ 7.4 เมกะจูล/กิโลกรัม จากข้อมูลด้านพลังงานนี้ พลังงานรวมที่สามารถฟื้นฟูจากกากตะกอนมีค่าเท่ากับประมาณ 158,782 เมกะจูล/วัน หรือ 44,106 kWh/day ซึ่งสะท้อนถึงศักยภาพสูงในการฟื้นฟูพลังงานจากกากตะกอนเมื่อผ่านกระบวนการผลิตเป็น RDF ซึ่งค่าดังกล่าวสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Kuo et al. (2023) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ทางเทคนิคในการผลิตเชื้อเพลิง RDF-5 คุณภาพสูงจากกากตะกอนของโรงงานกระดาษรีไซเคิล ปริมาณพลังงานที่ได้แสดงถึงศักยภาพที่น่าสนใจในการทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลบางส่วนในระบบเผาไหม้อุตสาหกรรม

สถานการณ์ที่ 2: ศักยภาพการผลิตเชื้อเพลิงก๊าซชีวภาพ (Biogas Fuel Potential)

จากกากตะกอนส่วนเกินที่ใช้ มี 2 ชนิด ได้แก่ กากตะกอน PS และ กากตะกอน SS โดยมีปริมาณเฉลี่ยประมาณ 1,273 m³/day และ 1,568 m³/day ตามลำดับ ทำให้ปริมาณกากตะกอนรวมเข้าสู่ระบบย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนเท่ากับ 2,841 m³/day โดยส่วนผสมนี้มีความเข้มข้นของค่า TVS เท่ากับ 6,651 mg/L จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.2 ศักยภาพการเกิดก๊าซมีเทนจากส่วนผสมนี้เท่ากับ 582 mL CH₄/g VS_{fed} (ค่าเฉลี่ยจากงานวิจัยนี้และงานวิจัยอื่น ๆ) ทำให้มีปริมาณการผลิตมีเทนประมาณ 11,002.8 m³/day เมื่อค่าความร้อนจำเพาะของมีเทนเท่ากับ 35.9 MJ/m³ (The Engineering ToolBox, 2008) ดังนั้น ศักยภาพพลังงานรวมประมาณ 394,984 MJ/day ซึ่งปัจจุบันโรงงานกระดาษรีไซเคิลสามารถผลิตไฟฟ้าได้ประมาณ

595,387 kWh/day การบูรณาการเชื้อเพลิงทางเลือกจากของเสีย (RDF และก๊าซชีวภาพ) เข้ากับระบบผลิตไอน้ำ (Steam Production) จึงเป็นโอกาสสำคัญในการเพิ่มการผลิตไฟฟ้า ผลผลิตไอน้ำและไฟฟ้าแต่ละสถานการณ์สรุปไว้ในตารางที่ 4.13 ซึ่งแสดงให้เห็นภาพรวมของการผลิตพลังงานรายวันจาก RDF และก๊าซชีวภาพ

4.4.4 การประเมินด้านเทคโนโลยีและเศรษฐศาสตร์: ความเป็นไปได้ของทางเลือก

การผลิตพลังงานจากกากตะกอน

การประเมินด้านเทคโนโลยีและเศรษฐศาสตร์นี้ กำหนดระยะเวลาโครงการที่ 20 ปี เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ทางการเงินและความยั่งยืนของสองสถานการณ์การผลิตพลังงานจากของเสีย (Waste-to-Energy: WTE) สำหรับการเพิ่มมูลค่ากากตะกอนส่วนเกินจากโรงงานกระดาษรีไซเคิล ได้แก่ สถานการณ์ที่ 1 (การผลิตเชื้อเพลิง RDF) และสถานการณ์ที่ 2 (การผลิตก๊าซชีวภาพผ่านกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน) มีผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.13 แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ที่สำคัญระหว่างผลตอบแทนทางเศรษฐกิจในระยะสั้น การปฏิบัติตามข้อกำหนดด้านสิ่งแวดล้อม และความยั่งยืนในระยะยาว

ตารางที่ 4.13 การเปรียบเทียบทางเศรษฐศาสตร์ระหว่างสถานการณ์ที่ 1 (การผลิตเชื้อเพลิง RDF) และสถานการณ์ที่ 2 (การผลิตก๊าซชีวภาพ)

รายการ	มูลค่า (บาท)	
	สถานการณ์ที่ 1	สถานการณ์ที่ 2
เงินลงทุนการก่อสร้างเริ่มต้น	55,170,000	69,612,000
รายได้จากการขายไฟฟ้าต่อปี	7,358,400	22,443,100
มูลค่าการฝังกลบที่ลดได้ต่อปี	11,187,250	2,125,580
ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานต่อปี	14,317,700	1,256,900
การเพิ่มขึ้นของค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานต่อปีจาก APCS	3,676,900	-
รายได้สุทธิต่อปี	551,050	23,311,780
ระยะเวลาคืนทุนแบบง่าย (ปี)	100.11	3.0
มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV, 20 ปี @ 8%)	5,410,430	159,276,220
อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR)	> 100%	33.38%

ตารางที่ 4.13 การเปรียบเทียบทางเศรษฐศาสตร์ระหว่างสถานการณ์ที่ 1 (การผลิตเชื้อเพลิงขยะ) และสถานการณ์ที่ 2 (การผลิตก๊าซชีวภาพ) (ต่อ)

รายการ	มูลค่า (บาท)	
	สถานการณ์ที่ 1	สถานการณ์ที่ 2
กากตะกอนส่วนเกินขาเข้า	22,385 metric tons/year	2,841 m ³ /day
การผลิตเชื้อเพลิงขยะ (RDF) หรือ ก๊าซชีวภาพ (Biogas)	7,831.9 metric tons/year	11,002.8 m ³ CH ₄ /day
การผลิตไอน้ำ (Steam)	40 metric tons/day	122 metric tons/day
การเทียบเท่าไฟฟ้า	5,600 kWh/day	17,080 kWh/day
การใช้พลังงาน	40,610 kWh/day	20,967 kWh/day
ความต้องการใช้ไฟฟ้าจากแหล่งภายนอก	+35,010 kWh/day (เพิ่มขึ้น)	+3,887 kWh/day (เพิ่มขึ้น)

หมายเหตุ (1) APCS ย่อมาจาก Air Pollution Control Systems (ระบบควบคุมมลพิษทางอากาศ)

(2) เครื่องหมาย '+' แสดงถึงความต้องการไฟฟ้าเพิ่มเติมหรือการซื้อไฟฟ้าภายนอกของระบบ

(3) กำหนดขนาดถังปฏิกรณ์เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพประมาณ 4,946 m³ ที่ค่า OLR 3.82 g VS/L-day (Sani et al., 2022)

สำหรับสถานการณ์ที่ 1 (การผลิตเชื้อเพลิง RDF) มีข้อได้เปรียบด้านต้นทุนเริ่มต้นที่ต่ำ โดยต้องใช้งบลงทุนเริ่มต้น 55.2 ล้านบาท และให้ผลตอบแทนภายในอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) ที่มากกว่าร้อยละ 100 ซึ่งมีความผิดปกติ เนื่องจากผลกำไรรายปีที่ต่ำมาก และมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) 5.4 ล้านบาทตลอดอายุโครงการ รายได้สุทธิต่อปีก่อนหักภาษีประมาณ 551,050 บาท โดยส่วนใหญ่เกิดจากการขายไฟฟ้าที่ผลิตจากการเผาไหม้ RDF ปริมาณ 5,600 ton/year ซึ่งแปลงมาจากกากตะกอนรีดน้ำ 22,385 ton/year (พรรษา ลิบลับ, 2565) อย่างไรก็ตาม กระบวนการนี้ต้องใช้ไฟฟ้าปริมาณ 35,010 kWh/day ซึ่งต้องจัดหาจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ส่งผลให้ต้นทุนการดำเนินงานสูงขึ้นและเพิ่มการพึ่งพาแหล่งพลังงานภายนอก

นอกจากนี้ การผลิตและเผาไหม้ RDF ยังก่อให้เกิดความกังวลด้านสิ่งแวดล้อมอย่างรุนแรง โดยการเผาไหม้ของกากตะกอนรีดน้ำสามารถปลดปล่อยมลพิษ เช่น ฝุ่นละออง (PM) ไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) ซัลเฟอร์ออกไซด์ (SO_x) โลหะหนัก และไดออกซิน (Ledakowicz et al., 2019; Pérez-Gálvez et al., 2016) การศึกษานี้ไม่ได้รวมต้นทุนเงินลงทุนและค่าใช้จ่ายดำเนินงานเพิ่มเติมสำหรับระบบควบคุมมลพิษทางอากาศ (APCS) หรือเทคโนโลยีการเผาไหม้ขั้นสูงที่จำเป็น

เพื่อให้เป็นไปตามข้อกำหนดด้านสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะเรื่องการปลดปล่อยไดออกซิน หากรวมต้นทุนเหล่านี้ ข้อได้เปรียบทางเศรษฐศาสตร์ของสถานการณ์ RDF อาจลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

ในทางตรงข้าม สถานการณ์ที่ 2 การผลิตก๊าซชีวภาพต้องใช้เงินลงทุนเริ่มต้นสูงถึง 69.6 ล้านบาท โดยคำนวณจากขนาดถึงปฏิบัติการเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ 4,946 ลูกบาศก์เมตร และต้นทุนการก่อสร้าง 385.6 ดอลลาร์สหรัฐ/ลูกบาศก์เมตร หรือประมาณ 14,074 บาท/ลูกบาศก์เมตร (Lim et al., 2021; Sani et al., 2022) แม้ว่าจะมีค่าใช้จ่ายเริ่มต้นสูง แต่ระบบก๊าซชีวภาพให้ IRR ที่แข่งขันได้ถึงร้อยละ 33.38 และมีรายได้สุทธิต่อปี 23 ล้านบาท ซึ่งเกิดจากต้นทุนดำเนินงานต่ำเพียง 1.26 ล้านบาทต่อปี ระยะเวลาคืนทุน 3 ปี และ NPV 159 ล้านบาท สะท้อนถึงความน่าสนใจทางการเงินในระยะยาว นอกจากนี้ ความต้องการไฟฟ้าภายนอกยังต่ำเพียง 3,887 kWh/day ทำให้ลดการพึ่งพาแหล่งพลังงานภายนอก

ในมิติด้านสิ่งแวดล้อม ระบบก๊าซชีวภาพให้ข้อได้เปรียบอย่างมีนัยสำคัญ สามารถลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยตรงผ่านการกักเก็บมีเทนจากกากตะกอน และลดปริมาณของเสียที่จะฝังกลบได้ นอกจากนี้ กากหรือของเหลือจากการย่อยสลายก๊าซชีวภาพ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ทางการเกษตรหรือการปรับปรุงดินได้ เพื่อเป็นการส่งเสริมการหมุนเวียนทรัพยากรคุณภาพสูง สอดคล้องกับหลักเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) และเป้าหมายโครงสร้างพื้นฐานที่สามารถปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (IEA, 2023)

สรุปได้ว่า แม้การผลิต RDF จากกากตะกอนส่วนเกินจากโรงงานกระดาษรีไซเคิล อาจเหมาะสมกับการดำเนินงานระยะสั้นเนื่องจากลงทุนเริ่มต้นต่ำแต่มีระยะเวลาคืนทุนที่นานกว่าอายุโครงการ ซึ่งการผลิตก๊าซชีวภาพเป็นทางเลือกที่ยั่งยืนและมั่นคงทางเศรษฐศาสตร์ในระยะยาว โดยเฉพาะในบริบทอุตสาหกรรมที่มีกากตะกอนเพียงพอ ความสามารถทางเทคนิค และแรงจูงใจด้านนโยบายสภาพภูมิอากาศ ระบบผลิตก๊าซชีวภาพมีศักยภาพสูงกว่าในการสร้างความมั่นคงด้านพลังงาน (Energy Security) ความเป็นกลางทางคาร์บอน (Carbon Neutrality) และการฟื้นฟูทรัพยากร (Resource Recovery) การประเมินเปรียบเทียบนี้ชี้ให้เห็นถึงความจำเป็นของการวิเคราะห์เชิงเทคโนโลยีและเศรษฐศาสตร์ควบคู่กับการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมเมื่อเลือกเส้นทาง WTE สำหรับการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม

4.4.5 การพิจารณาการควบคุมมลพิษทางอากาศและผลกระทบต่อความเป็นไปได้ทางเศรษฐกิจของเชื้อเพลิง RDF

การวิเคราะห์ด้านเทคโนโลยีและเศรษฐศาสตร์เพื่อประเมินต้นทุนการดำเนินงานภายใต้ข้อกำหนดด้านสิ่งแวดล้อมสำหรับสถานการณ์ที่ 1 (การผลิตเชื้อเพลิง RDF) พิจารณาถึงระบบควบคุมมลพิษทางอากาศ (Air Pollution Control Systems: APCS) ซึ่งแตกต่างจากสถานการณ์ที่ 2 (การผลิตเชื้อเพลิงก๊าซชีวภาพ) เนื่องจากการเผาไหม้ก๊าซชีวภาพโดยทั่วไปมีความสะอาดและควบคุมได้ง่ายกว่า การเผาไหม้เชื้อเพลิงขยะซึ่งเป็นของเสียที่มีความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน และประกอบด้วยสารปนเปื้อนจำนวนมาก เช่น โลหะหนัก คลอรีน และสารอินทรีย์ ซึ่งเป็นสารตั้งต้นของไดออกซิน จำเป็นต้องใช้ระบบ APCS อย่างครบวงจร เช่น ถุงกรองฝุ่น (Bag Filters) เครื่องดักจับมลพิษแบบเปียกหรือแบบแห้ง (Wet or Dry Scrubbers) การดักจับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon Injection) และระบบ Selective Catalytic Reduction Units เพื่อลดการปลดปล่อยฝุ่นละออง (PM) ไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) ซัลเฟอร์ออกไซด์ (SO_x) โลหะหนัก และไดออกซินออกสู่สิ่งแวดล้อม (Ledakowicz et al., 2019; Pérez-Gálvez et al., 2016)

ในทางตรงกันข้าม ก๊าซชีวภาพซึ่งมีมีเทน (CH_4) เป็นองค์ประกอบหลักถือเป็นเชื้อเพลิงที่สะอาดกว่าและมีลักษณะใกล้เคียงกับก๊าซธรรมชาติ แม้ว่าจะมีสิ่งเจือปนเล็กน้อย เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) และซิลอกเซน (Siloxane) แต่สามารถกำจัดได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วยเทคโนโลยีปรับปรุงสภาพเบื้องต้นที่มีต้นทุนต่ำ เช่น การดักจับด้วยเหล็กฟองน้ำ (Sponge Iron) หรือถ่านกัมมันต์ รวมถึงระบบทำความเย็นและควบแน่น (Cooling-Condensation Systems) ซึ่งหลังผ่านการบำบัดแล้ว ก๊าซชีวภาพสามารถเผาไหม้ในหม้อไอน้ำได้โดยไม่ต้องติดตั้งระบบ APCS ที่มีต้นทุนสูง ดังที่ Neuwahl et al. (2019) ระบุไว้ในเอกสารเทคนิค Best Available Techniques (BAT) ของคณะกรรมการการยุโรปสำหรับระบบบำบัดของเสียว่า “การเผาไหม้ก๊าซชีวภาพในเครื่องยนต์ก๊าซหรือหม้อไอน้ำถือเป็นกระบวนการสะอาดและมีการปลดปล่อยมลพิษต่ำ ระบบควบคุมมลพิษทางอากาศมักไม่จำเป็น หากมีการกำจัดกำมะถันและปรับปรุงสภาพก๊าซก่อนการเผาไหม้”

ผลกระทบต่อด้านเศรษฐศาสตร์จากความแตกต่างทางเทคนิคนี้สะท้อนให้เห็นว่าสถานการณ์ที่ 1 ซึ่งผลิตเชื้อเพลิงขยะต้องเผชิญกับต้นทุนเงินลงทุนเริ่มต้นสูงชันราวร้อยละ 50 (Amann, 2012) เพื่อรองรับการติดตั้งระบบควบคุมมลพิษ นอกจากนี้ ต้นทุนการดำเนินงานยังปรับเพิ่มขึ้นเพื่อครอบคลุมค่าบำรุงรักษาและวัสดุสิ้นเปลืองของระบบ APCS โดยประเมินอยู่ที่ 146 ถึง 183 บาทต่อของเสียหนึ่งเมตริกตันที่เผาไหม้ (Neuwahl et al., 2019) ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.13 โดยสะท้อนให้เห็นถึงความเป็นไปได้น้อยด้านเศรษฐศาสตร์ของการนำกากตะกอนส่วนเกินจากโรงงานกระดาษรีไซเคิลมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงขยะเมื่อพิจารณาเงื่อนไขด้านสิ่งแวดล้อม