

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาค่าเพิ่มมูลค่าของเสียและการพัฒนาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนจากกากตะกอนส่วนเกินด้วยระบบย่อยสลายร่วมแบบไม่ใช้ออกซิเจนในอุตสาหกรรมกระดาษรีไซเคิล มีขั้นตอนการศึกษาดังรูปที่ 3.1 และรายละเอียดของแต่ละขั้นตอน ดังต่อไปนี้

Secondary Data	เก็บข้อมูลเบื้องต้น ในอุตสาหกรรมกระดาษรีไซเคิล	<ul style="list-style-type: none"> ○ Paper Making Process ○ Wastewater Treatment Plant (WWTP) ○ Waste Sludge Management ○ Power Generation ○ Excess Sludge Generate ○ Organic Carbon in WWTP
Primary Data	เก็บตัวอย่าง/วิเคราะห์องค์ประกอบ ในกากตะกอนส่วนเกิน	<ul style="list-style-type: none"> ○ Physical/Chemical Characteristic ○ Biodegradability
Laboratory scale experiments	ศึกษาสัดส่วนผสมกากตะกอน (PS:SS) ที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ	<ul style="list-style-type: none"> ○ BMP Test ○ BMP Kinetics
	ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพ ด้วยระบบ Two-stage CSTR	<ul style="list-style-type: none"> ○ System Efficiency ○ C, N, P Mass Balance ○ Microbial Community
Feasibility of Scale-up	ประเมินศักยภาพการขยายขนาด ของระบบ Two-stage CSTR ในอุตสาหกรรมกระดาษรีไซเคิล	<ul style="list-style-type: none"> ○ Organic Carbon Balance ○ Energy Balance ○ Renewable Energy Scenarios and Evaluation Indicators ○ Techno-economic Analysis

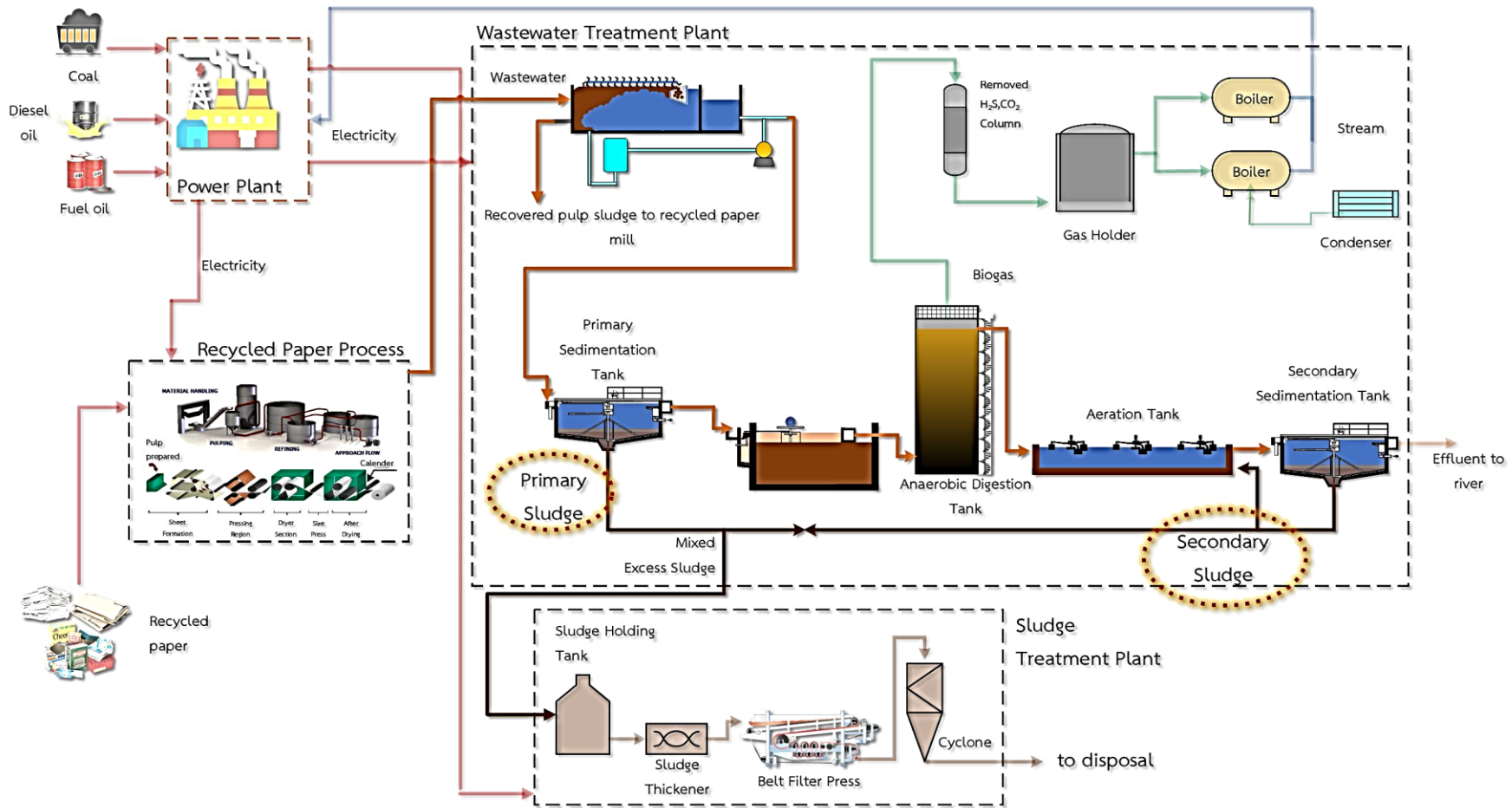
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการศึกษา

3.1 การเก็บข้อมูลเบื้องต้นในโรงงานกระดาษรีไซเคิล

การศึกษานี้มีการเก็บข้อมูลเบื้องต้นของโรงงานกระดาษรีไซเคิลแห่งหนึ่งในประเทศไทย ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมครบวงจรทั้งต้นน้ำ กลางน้ำ และปลายน้ำ โดยมีการผลิตกระดาษจากกระดาษใช้แล้ว เช่น กระดาษลัง มาผ่านกระบวนการตีเยื่อ และผลิตเป็นกระดาษลอนลูกฟูก กระดาษสำหรับทำผิวกล่อง และแกนกระดาษ เพื่อผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป ได้แก่ กล่องกระดาษและถุงกระดาษสำหรับบรรจุอาหารสัตว์ เป็นต้น และมีกำลังการผลิต 2,500 ตันต่อวัน โรงงานดังกล่าวใช้พลังงานทั้งไฟฟ้าและพลังงานความร้อน (Steam: ไอน้ำ) โดยเชื้อเพลิงหลัก ประกอบด้วย ถ่านหิน น้ำมันเตา และน้ำมันดีเซล โดยมีการใช้เชื้อเพลิงเพิ่มเติมเป็นก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียภายในโรงงาน อีกทั้งยังมีการซื้อไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) โดยมีปริมาณการใช้ไฟฟ้ารวมตลอดทั้งปีเท่ากับ 18,445 เมกะวัตต์ ชั่วโมง ซึ่งข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาคั้งนี้เป็น ข้อมูลทุติยภูมิ (Secondary Data) โดยโรงงานจากโรงงานกระดาษรีไซเคิลดังกล่าว ซึ่งครอบคลุมระยะเวลา 1 ปี (2566) โดยเก็บข้อมูล 4 หมวดหลัก เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการเลือกช่วงเวลาในการเก็บตัวอย่างกากตะกอนส่วนเกินเพื่อวิเคราะห์ลักษณะเบื้องต้นในหัวข้อที่ 3.2 และเป็นข้อมูลสนับสนุนการประเมินศักยภาพการขยายขนาดของระบบ Two-stage CSTR ในหัวข้อที่ 3.7 มีรายละเอียดดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 การเก็บข้อมูลเบื้องต้นในโรงงานกระดาษรีไซเคิล

หมวดหมู่ของข้อมูล	รายการข้อมูลที่เก็บรวบรวม	วัตถุประสงค์การใช้ข้อมูล
กระบวนการผลิตกระดาษรีไซเคิล	<ul style="list-style-type: none"> - จำนวนและประเภทของหน่วยกระบวนการ - ชนิดและปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ - การใช้พลังงานของแต่ละหน่วยปฏิบัติการ 	เพื่อสนับสนุนการประเมินสมดุลพลังงานในโรงงาน
ระบบบำบัดน้ำเสีย	<ul style="list-style-type: none"> - จำนวนและประเภทของหน่วยบำบัด - อัตราการไหลในระบบ - ชนิดและปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ - การใช้พลังงานของแต่ละหน่วยบำบัด - ค่า COD, TVS และ TS ของของเสียในระบบ 	เพื่อสนับสนุนการประเมินสมดุลอินทรีย์คาร์บอนในระบบบำบัดน้ำเสีย/สมดุลพลังงานในโรงงาน
การจัดการกากตะกอน	<ul style="list-style-type: none"> - อัตราการเกิดกากตะกอนส่วนเกิน - หน่วยบำบัดกากตะกอน - การใช้พลังงานของแต่ละหน่วย - ค่า TVS และ TS ในแต่ละขั้นตอน 	เพื่อสนับสนุนการประเมินสมดุลอินทรีย์คาร์บอนในระบบบำบัดน้ำเสีย/สมดุลพลังงานในโรงงาน
การผลิตพลังงาน	<ul style="list-style-type: none"> - จำนวนและประเภทของหน่วยผลิตพลังงาน - ชนิดและปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ - ปริมาณพลังงานที่ผลิตได้ - การใช้พลังงานในแต่ละหน่วยผลิตและในส่วนสำนักงาน 	เพื่อสนับสนุนการประเมินสมดุลพลังงานในโรงงาน



รูปที่ 3.2 แผนผังระบบบำบัดน้ำเสียและแหล่งกำเนิดกากตะกอนส่วนเกิน

3.2 การเก็บตัวอย่างกากตะกอนส่วนเกินจากโรงงานกระดาษรีไซเคิล

กากตะกอนส่วนเกินจากโรงงานกระดาษรีไซเคิลที่ใช้ในการศึกษานี้ ได้ทำการเก็บตัวอย่างกากตะกอนปฐมภูมิ (Primary Sludge: PS) ซึ่งเป็นกากตะกอนส่วนเกินที่เกิดจากถังตกตะกอนขั้นต้นของระบบบำบัดน้ำเสีย และกากตะกอนทุติยภูมิ (Secondary Sludge: SS) ซึ่งเป็นกากตะกอนส่วนเกินที่เกิดจากถังตกตะกอนทางชีวภาพ (ถังตกตะกอนขั้นที่สอง) ของระบบตะกอนเร่ง (Activated Sludge: AS) จากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานกระดาษรีไซเคิล เป็นจำนวน 2 ครั้งในปี พ.ศ. 2566 (เดือนมีนาคมและสิงหาคม) แบบจ้วง (Grab Sampling) ดังรูปที่ 3.2 เพื่อศึกษาลักษณะของกากตะกอนส่วนเกินเป็นข้อมูลปฐมภูมิ โดยเก็บรักษาตัวอย่างด้วยการควบคุมอุณหภูมิที่ 4°C ก่อนทำการวิเคราะห์ลักษณะกากตะกอนทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ ซึ่งมีพารามิเตอร์ในการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 3.2 และวิธีการวิเคราะห์อ้างอิงจาก Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (American Public Health Association, American Water Works Association, & Water Environment Federation, 2012)

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ในการวิเคราะห์ลักษณะกากตะกอนส่วนเกิน

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์
pH	pH meter
COD (TCOD, SCOD)	Open Reflux Method
BOD ₂₀ (TBOD ₂₀ , SBOD ₂₀)	Oxitop [®] Method
Alkalinity	Titration Method
Ca, Mg	AAS Method
TKN	Kjeldahl Method
TS	Dried at 103 - 105 °C
VS	Ignited at 550 °C
TSS	Dried at 103 - 105 °C
TDS	Dried at 103 - 105 °C, TDS meter
VFA	Titration Method
Higher Heating Value	Bomb Calorimeter Method

3.3 การศึกษาสัดส่วนผสมของกากตะกอนส่วนเกินที่เหมาะสม

สัดส่วนการผสมของกากตะกอนส่วนเกินเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเกิดก๊าซชีวภาพในระบบย่อยสลายร่วมแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Co-digestion: AnCoD) เนื่องจากความแตกต่างของกากตะกอนส่วนเกินซึ่งเป็นสารตั้งต้นทั้งสองชนิด โดยกากตะกอน PS มีปริมาณสารอินทรีย์สูง โครงสร้างหลักเป็นเซลลูโลส และมีธาตุอาหารในตะกอนต่ำ ขณะที่กากตะกอน SS มีปริมาณสารอินทรีย์ต่ำกว่ากากตะกอน PS แต่มีธาตุอาหารสูงกว่าและมีโครงสร้างโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่ซับซ้อนน้อยกว่า ดังนั้น การศึกษาขั้นตอนนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินสัดส่วนผสมกากตะกอนของส่วนเกินทั้งสองชนิดซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการผลิตก๊าซชีวภาพที่เหมาะสม โดยการแปรเปลี่ยนสัดส่วนผสมกากตะกอน PS:SS จำนวน 3 ค่าคือ 3:1, 1:1 และ 1:3 (โดยปริมาตร) โดยอ้างอิงสัดส่วนผสมจากการศึกษาของ Sun et al. (2022) และทำการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ จากนั้นทำการศึกษาศักยภาพการเกิดก๊าซมีเทนทางชีวเคมี (Biochemical Methan Potential Test: BMP Test) ของกากตะกอนผสมเปรียบเทียบกับการย่อยสลายของกากตะกอนเชิงเดี่ยว รวมทั้งประเมินความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพโดยการวิเคราะห์สัดส่วนซีโอดี (COD Fractions) ของกากตะกอนผสมเปรียบเทียบกับการย่อยสลายของกากตะกอนเชิงเดี่ยว เพื่ออธิบายความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ โดยรายละเอียดพารามิเตอร์ที่ใช้ในการเดินระบบ BMP test แสดงดังตารางที่ 3.3 และ 3.4 และลักษณะหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ใน BMP Test แสดงดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการเดินระบบแบบกะ

พารามิเตอร์	ชุดการทดลองที่ 1	ชุดการทดลองที่ 2	ชุดการทดลองที่ 3	ชุดการทดลองที่ 4	ชุดการทดลองที่ 5	ชุดควบคุม (Blank)
สัดส่วนผสมกากตะกอน (PS:SS)	1:0	3:1	1:1	1:3	0:1	-
หัวเชื้อจุลินทรีย์ (g VS/L) ^ก	2	2	2	2	2	2
pH	7 ± 0.1	7 ± 0.1	7 ± 0.1	7 ± 0.1	7 ± 0.1	7 ± 0.1
อุณหภูมิ (°C)	35 ± 5.0	35 ± 5.0	35 ± 5.0	35 ± 5.0	35 ± 5.0	35 ± 5.0
V _{reactor} (L)	4	4	4	4	4	4
HRT (days) ^ข	31	31	31	31	31	31
จำนวนซ้ำ	3	3	3	3	3	3

หมายเหตุ ^ก อ้างอิงจาก Rajput & Sheikh (2019) และ ^ข อ้างอิงจาก Bary & Rintala (2012)

ตารางที่ 3.4 องค์ประกอบของสารตั้งต้นใน BMP Test ของกากตะกอนที่สัดส่วนผสมต่าง ๆ (PS:SS)

สัดส่วนผสม (PS:SS)	Primary Sludge (ml)	Secondary Sludge (ml)	Seed (ml)	Dilute Water (ml)	ปริมาตรรวม (ml)
1:0	980	0	80	2,940	4,000
3:1	980	326.67	80	2,613.33	4,000
1:1	980	980	80	1,960	4,000
1:3	980	2,940	80	0	4,000
0:1	0	980	80	2,940	4,000

การวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อเปรียบเทียบสัดส่วนผสมของกากตะกอนส่วนเกินที่เหมาะสม ดำเนินการโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA: Single Factor) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยใช้เกณฑ์พิจารณาค่าความน่าจะเป็น (p-value) เพื่อประเมินความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติภายในกลุ่ม โดยอ้างอิงจากการศึกษาของ Janke et al. (2018) และการวิเคราะห์ข้อมูลผลการผลิตมีเทนเฉลี่ยจากสัดส่วนผสมกากตะกอน PS:SS ที่ 3:1, 1:1 และ 1:3 ถูกเปรียบเทียบโดยใช้สถิติแบบ t-test สำหรับข้อมูลแบบจับคู่เปรียบเทียบ (paired two-sample t-test) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยใช้เกณฑ์พิจารณาค่า p-value เพื่อทดสอบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างกลุ่มทดลอง และประเมินผลของอัตราส่วนการผสมตะกอนที่มีต่อศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ

ตารางที่ 3.5 ลักษณะจุลินทรีย์ (Seed) ที่ใช้ใน BMP Test

พารามิเตอร์	ค่า
pH	8.72 ± 0.02
TCOD (mg/L)	122,400 ± 91.92
SCOD (mg/L)	96,600 ± 282.84
TS (mg/L)	130,530 ± 7,948
TVS (mg/L)	101,475 ± 6,173
TSS (mg/L)	29,055
Alkalinity (mg CaCO ₃ /L)	9,635 ± 205
VFA (mg CH ₃ COOH/L)	2,378.06 ± 31.43

จุลินทรีย์ (Seed) ที่ใช้ในการทดลอง เก็บมาจากมูลสุกรในฟาร์มเลี้ยงสุกรของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยมีค่า pH 8.72 ± 0.02 และอัตราส่วน VS/TS เท่ากับ 0.78 แสดงถึงความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของสารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปแข็ง ปริมาณกรดไขมันระเหยง่าย

(VFA) เท่ากับ 2,378 มิลลิกรัมของกรดอะซิติกต่อลิตร ($\text{mg CH}_3\text{COOH/L}$) และค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) เท่ากับ 9,635 มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L) ซึ่งอัตราส่วน VFA/Alkalinity อยู่ที่ 0.25 อยู่ในช่วงเหมาะสมสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยไม่จำเป็นต้องเติมสารเคมีเสริม ดังนั้น มูลสุกรนี้จึงถูกใช้เป็นหัวเชื้อสำหรับ BMP Test เพื่อประเมินศักยภาพการเกิดก๊าซมีเทนทางชีวเคมีได้

3.3.1 การศึกษาสัดส่วนสารอินทรีย์ (COD fractions)

การวิเคราะห์ค่า COD fractions ทำการศึกษาโดยการค่าซีโอดีทั้งหมด (Total Chemical Oxygen Demand: TCOD) แบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก โดยอ้างอิงการศึกษาของ Orhon & Cokgor (1997) คือ (1) ย่อยสลายทางชีวภาพได้ (Biodegradable COD: BCOD) และ (2) ย่อยสลายทางชีวภาพไม่ได้ (Unbiodegradable COD: UCOD) ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังตารางที่ 3.6 และมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 3.6 วิธีการคำนวณ COD Fractions

COD Fractions		วิธีการคำนวณ
1. Total COD (TCOD)		TCOD
1.1	Biodegradable COD (BCOD)	TBOD ₂₀
1.1.1	Biodegradable Soluble COD (BSCOD)	SBOD ₂₀
1.1.2	Biodegradable Particulate COD (BPCOD)	BCOD - BSCOD = TBOD ₂₀ - SBOD ₂₀
2.1	Unbiodegradable COD (UCOD)	TCOD - BCOD = TCOD - TBOD ₂₀
2.1.1	Unbiodegradable Soluble COD (USCOD)	SCOD - SBOD ₂₀
2.1.2	Unbiodegradable Particulate COD (UPCOD)	UCOD - USCOD = TCOD - TBOD ₂₀ - (SCOD - SBOD ₂₀)

(1) Biodegradable COD (BCOD) ทำการวิเคราะห์โดยการหาค่าความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมีที่ละลายน้ำ (Biochemical Oxygen Demand: BOD) 20 วันในตะกอนส่วนเกินด้วยอุปกรณ์ OxiTOP-C® ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคของ Respirometric Method เพื่อให้เกิดความแม่นยำในการวิเคราะห์ค่า BOD ค่า BCOD ในการศึกษาถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ (1) ค่าซีโอดีที่ย่อยสลายได้เร็วหรือส่วนที่ละลายน้ำ (Biodegradable Soluble COD: BSCOD) โดยการวิเคราะห์ค่า BOD 20 วันของตัวอย่างตะกอนส่วนเกินที่ละลายน้ำและ (2) ค่าซีโอดีที่ย่อยสลายได้ช้าหรือสัดส่วนที่ไม่ละลายน้ำ (Biodegradable Particulate COD: BPCOD) โดยการวิเคราะห์ค่า TBOD 20

วันของตัวอย่างตะกอนส่วนเกินลบด้วย BOD 20 วันของตัวอย่างตะกอนส่วนเกินที่ละลายน้ำ (TBOD₂₀-SBOD₂₀)

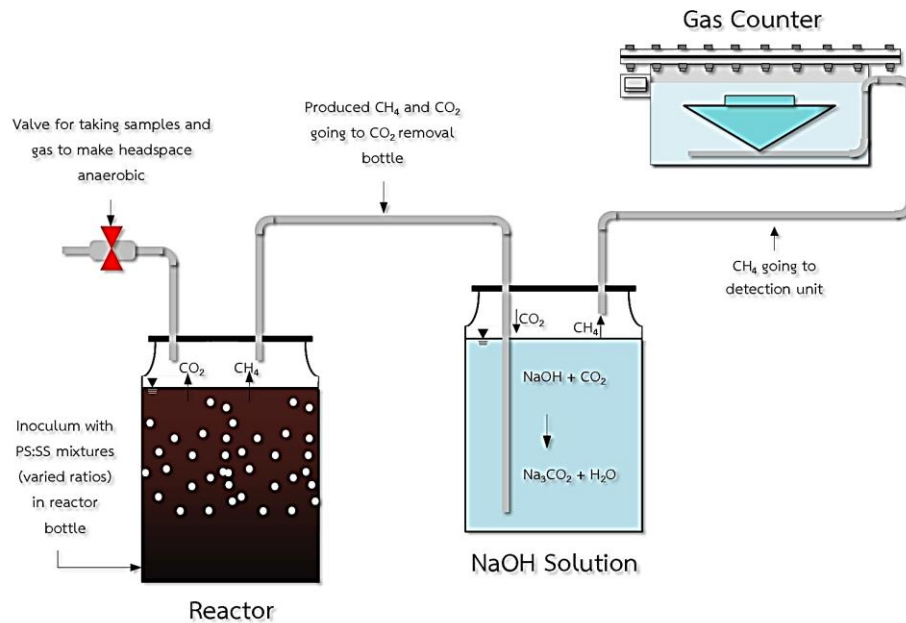
(2) Unbiodegradable COD (UCOD) คำนวณหาจากค่า TCOD - BCOD แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ (1) ค่าซีโอดีที่ย่อยสลายทางชีวภาพไม่ได้ส่วนที่ละลายน้ำ (Unbiodegradable Soluble COD: USCOD) คำนวณจาก SCOD-SBOD₂₀ และ (2) ค่าซีโอดีที่ย่อยสลายไม่ได้ส่วนที่ไม่ละลายน้ำ (Unbiodegradable Particulate COD: UPCOD) คำนวณจาก UCOD-USCOD

3.3.2 การศึกษาศักยภาพการเกิดก๊าซมีเทนทางชีวเคมี

(Biochemical Methan Potential Test: BMP Test)

การศึกษา BMP Test เป็นการประเมินศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพหรือก๊าซมีเทนจากกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนของสารตั้งต้นที่ใส่ลงไป โดยเป็นวิธีที่มีต้นทุนต่ำ และสามารถทำซ้ำเพื่อเปรียบเทียบศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของสารตั้งต้นหรือสภาวะการทดลองที่แตกต่างกันได้อย่างถูกต้อง ทำให้สามารถบ่งบอกสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการออกแบบระบบย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนได้ ซึ่งในการศึกษา BMP Test ของงานวิจัยนี้ อ้างอิงวิธีการจาก Veluchamy (2018) ในสารตั้งต้นจากอุตสาหกรรมเดียวกัน โดยใช้ถังปฏิกรณ์ชีวภาพขนาด 5 L ปริมาตรการทำงาน 4 L ซึ่งประกอบด้วย ปริมาตรน้ำ จุลินทรีย์ และน้ำกลั่น (ชุดการทดลองละ 3 ซ้ำ) โดยคำนวณตามปัจจัยที่ศึกษา ปรับค่า pH ก่อนเริ่มการทดลองให้เป็น 7 ± 0.1 ด้วย HCl หรือ NaOH และใช้ NaHCO₃ เป็นบัฟเฟอร์ จากนั้นใช้ก๊าซไนโตรเจนไล่ออกซิเจนในถังปฏิกรณ์เป็นเวลา 3 นาที เพื่อสร้างสภาวะไร้ออกซิเจน ถึงปฏิกรณ์จะเชื่อมต่อกับถังที่บรรจุสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 1.5 N ซึ่งทำหน้าที่ดูดซับ CO₂ และ H₂S โดยก๊าซชีวภาพที่แทนที่สารละลาย NaOH นี้จะเป็นตัวแทนของก๊าซมีเทน (CH₄) ทั้งนี้ถังปฏิกรณ์ทั้งหมดบ่มในห้องควบคุมอุณหภูมิที่ 35 ± 5 °C (mesophilic) และเขย่าถังปฏิกรณ์นาน 1 นาที ก่อนทำการวัดปริมาตรก๊าซด้วยวิธีแทนที่สารละลาย NaOH ด้วยเครื่องวัดปริมาตรก๊าซชีวภาพ (Gas Counter) แสดงดังรูปที่ 3.3 ผลของ BMP Test จะวัดปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในแต่ละวันได้อย่างแม่นยำ

ผลการทดลองที่ได้สามารถนำมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นในแต่ละวันได้ สำหรับการวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ (kinetic) ของการผลิตก๊าซมีเทนสะสมนี้ อ้างอิงจากการศึกษาของ Veluchamy & Kalamdhad (2017) โดยใช้แบบจำลองจลนพลศาสตร์ Modified Gompertz (Lay et al., 1996) ซึ่งเหมาะสมสำหรับการศึกษาศักยภาพการเกิดก๊าซมีเทนทางชีวเคมีจาก BMP Test ดังสมการที่ 3.1



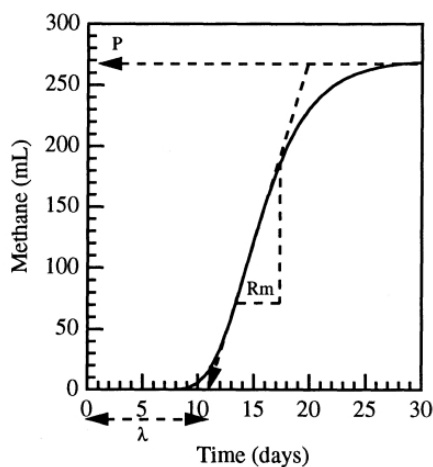
รูปที่ 3.3 การติดตั้งชุดทดลอง BMP Test

ซึ่งจากรูปที่ 3.4 เป็นกราฟแสดงการผลิตก๊าซมีเทนสะสม (แกน y, M) ณ เวลาใด ๆ (แกน x, t) โดยที่อัตราสูงสุดของการผลิตก๊าซมีเทน (R_m) หาได้จากความชันของกราฟ ศักยภาพของการเกิดก๊าซมีเทน (P) หาได้จากการผลิตก๊าซมีเทนสะสมสูงสุด และระยะเวลา Lag phase (λ) ที่แสดงถึงระยะเวลาของขั้นตอนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) หาได้จากกราฟพล็อตเส้นความชันตัดกับแกน x นอกจากนี้ ยังสังเกตได้ว่าจุดตัดของเส้นแกน P และ R_m เมื่อพล็อตลงมาที่แกน x จะเป็นเวลาที่เริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ในการผลิตมีเทน

แบบจำลองจลนพลศาสตร์ Modified Gompertz:

$$M(t) = P * \exp \{ -\exp [(R_m * e / P) (\lambda - t) + 1] \} \quad (3.1)$$

โดยที่	M(t)	คือ	ปริมาณการผลิตก๊าซมีเทนสะสม (mL)
	t	คือ	เวลาสะสมในการผลิตก๊าซมีเทน (d)
	P	คือ	ศักยภาพการเกิดก๊าซมีเทนสะสมสูงสุด (mL CH ₄),
	R_m	คือ	อัตราสูงสุดของการผลิตก๊าซมีเทน (mL CH ₄ d ⁻¹)
	λ	คือ	ระยะเวลา Lag phase (d)
	e	คือ	ค่าคงที่ (2.71)



รูปที่ 3.4 Modified Gompertz Model
(Lay et al., 1996)

นอกจากนี้ ยังมีการเปรียบเทียบแบบจำลองอื่น ๆ ได้แก่ แบบจำลองจลนพลศาสตร์ Modified Logistic (Zwietering et al., 1990) และแบบจำลองจลนพลศาสตร์ลำดับที่หนึ่ง (Pseudo First-order) (Bernat et al., 2017) ดังสมการที่ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ เพื่อประเมินความเหมาะสมในการอธิบายพฤติกรรมการผลิตมีเทน และเปรียบเทียบความสามารถในการประมาณค่าพารามิเตอร์จลนพลศาสตร์ที่สำคัญของแต่ละแบบจำลอง

แบบจำลองจลนพลศาสตร์ Modified Logistic:

$$M(t) = P / \{ 1 + \exp [(4 * R_m / P) (\lambda - t) + 2] \} \quad (3.2)$$

โดยที่	M(t)	คือ	ปริมาณการผลิตก๊าซมีเทนสะสม (mL)
	t	คือ	เวลาสะสมในการผลิตก๊าซมีเทน (d)
	P	คือ	ศักยภาพการเกิดก๊าซมีเทนสะสมสูงสุด (mL CH ₄),
	R _m	คือ	อัตราสูงสุดของการผลิตก๊าซมีเทน (mL CH ₄ d ⁻¹)
	λ	คือ	ระยะเวลา Lag phase (d)
	e	คือ	ค่าคงที่ (2.71)

แบบจำลองจลนพลศาสตร์ Pseudo First-order:

$$M(t) = P * [1 - \exp^{-kt}] \quad (3.3)$$

โดยที่	M(t)	คือ	ปริมาณการผลิตก๊าซมีเทนสะสม (mL)
	t	คือ	เวลาสะสมในการผลิตก๊าซมีเทน (d)
	k	คือ	ค่าคงที่ของปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง (d ⁻¹)

การปรับเส้นโค้งและประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองในงานวิจัยนี้ดำเนินการโดยใช้ซอฟต์แวร์ SPSS เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ โดยการประเมินความเหมาะสมของแต่ละแบบจำลองทำโดยพิจารณาค่าของค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (R²) และค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองของข้อผิดพลาด (Root Mean Square Error: RMSE) เพื่อวัดความแตกต่างระหว่างค่าที่ได้จากแบบจำลองกับค่าจริง โดยค่าสัมประสิทธิ์ R² ใช้เพื่อประเมินความสอดคล้องของข้อมูลระหว่างแบบจำลองและผลการทดลอง ขณะที่ RMSE ใช้เพื่อวัดความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ในหน่วยเดียวกับข้อมูล (Sánchez et al., 2021)

นอกจากนี้ ปริมาณก๊าซมีเทน (BMP) ที่ผลิตได้จากสารตั้งต้น ถูกคำนวณโดยการหักลบปริมาณก๊าซมีเทนที่ผลิตจากหัวเชื้อออกจากปริมาณก๊าซที่ผลิตได้จากระบบที่มีการเติมทั้งสารตั้งต้นและหัวเชื้อร่วมกัน (Elsayed et al., 2016; Xue et al., 2019) ดังสมการที่ 3.4

$$BMP = \frac{CH_4 \text{ production}_{\text{สารตั้งต้น+หัวเชื้อ}} - CH_4 \text{ production}_{\text{หัวเชื้อ}}}{VS_{fed} * V} \quad (3.4)$$

โดยที่	BMP	คือ	ศักยภาพการเกิดก๊าซมีเทนทางชีวเคมี (mL CH ₄ /g VS _{fed})
	CH ₄ production _{สารตั้งต้น+หัวเชื้อ}	คือ	ปริมาณการผลิตมีเทนสะสมสูงสุดในชุดการทดลองที่มีทั้งสารตั้งต้นและหัวเชื้อ (mL CH ₄)
	CH ₄ production _{หัวเชื้อ}	คือ	ปริมาณการผลิตมีเทนสะสมสูงสุดในชุดการทดลองที่มีเพียงหัวเชื้อ หรือ Blank (mL CH ₄)
	VS _{fed}	คือ	ความเข้มข้นของค่า TVS ในสารตั้งต้น (g VS _{fed} /L)
	V	คือ	ปริมาตรการทำงานของถังปฏิกิริยา (L)

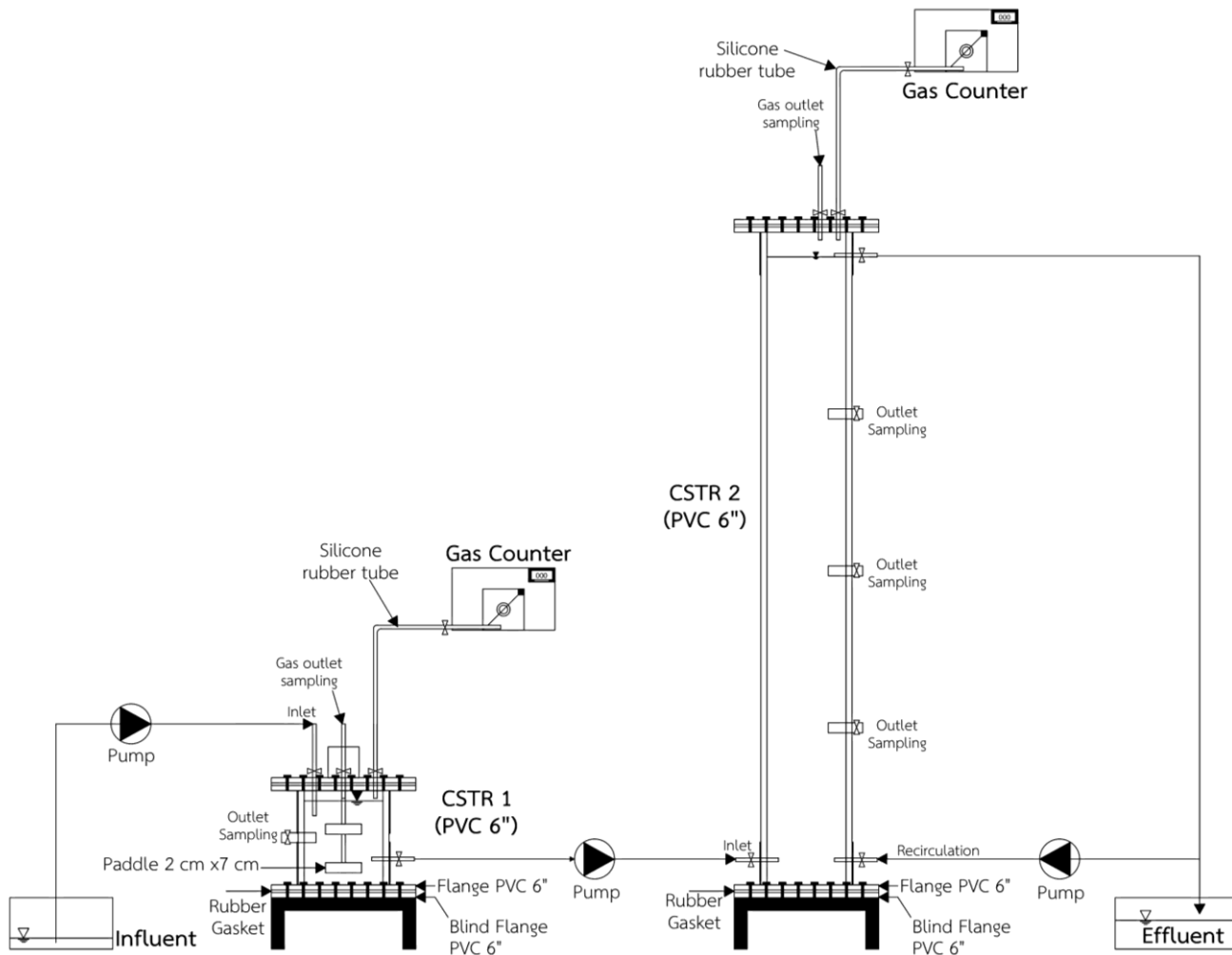
3.4 การเดินระบบถังกวนสมบูรณ์แบบสองขั้นตอน

(Two-stage Continuous Stirred Tank Reactor: Two-stage CSTR)

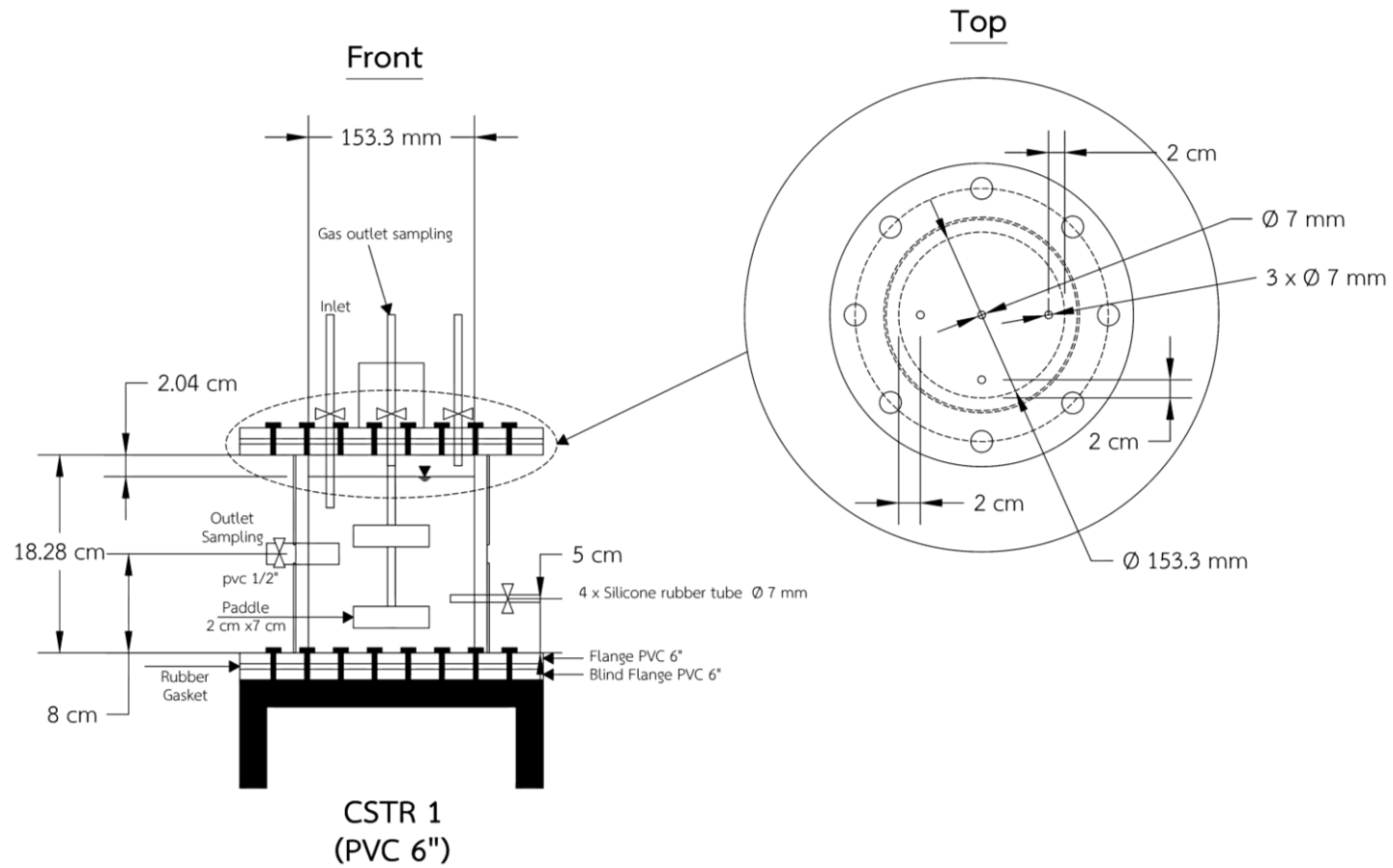
การติดตั้งชุดทดลองระบบ Two-stage CSTR เพื่อทดสอบการเดินระบบกึ่งต่อเนื่อง แสดงดังรูปที่ 3.5-3.8 ระบบประกอบด้วย CSTR จำนวน 2 ถัง ได้แก่ CSTR 1 ขนาด 3 ลิตร (L) สำหรับการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนในขั้นตอนที่ 1 โดยทำหน้าที่หลักในการไฮโดรไลซิส และ CSTR 2 ขนาด 22.5 L สำหรับการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนในขั้นตอนที่ 2 โดยทำหน้าที่ในการผลิต CH_4 โดยป้อนกากตะกอนที่ออกจาก CSTR 1 เข้าสู่ถัง CSTR 2 ซึ่ง CSTR 1 ติดตั้งระบบกวนด้วยใบพัดแบนแบบ 2 แฉก (flat paddle, 2 blades impeller) เพื่อให้เกิดการผสมอย่างสม่ำเสมอ ส่วน CSTR 2 ใช้ระบบหมุนเวียนภายนอกด้วยปั๊ม (External recirculation system; Appels et al., 2008) ซึ่งหมุนเวียนน้ำที่บางส่วนกลับเข้าสู่ถัง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการสัมผัสระหว่างจุลินทรีย์กับสารตั้งต้น ลดความเสี่ยงของการแยกชั้น และเพิ่มเสถียรภาพของกระบวนการสร้าง CH_4

การเริ่มต้นเดินระบบดำเนินการโดยการเติมหัวเชื้อที่ชนิดที่ทำงานในสถานะที่ไม่ใช้ออกซิเจนในปริมาณร้อยละ 10 ของปริมาตรใช้งานของแต่ละถัง ตามคำแนะนำของ Hobson & Wheatley (1993) โดย CSTR 1 และ CSTR 2 มีปริมาตรใช้งานเท่ากับ 3.0 และ 22.5 L ตามลำดับ จึงเติมหัวเชื้อในปริมาณ 0.3 และ 2.25 L ตามลำดับ หัวเชื้อดังกล่าวได้มาจากกากตะกอนของระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากโรงงานแปรรูปมันสำปะหลังแห่งหนึ่งในจังหวัดนครราชสีมา

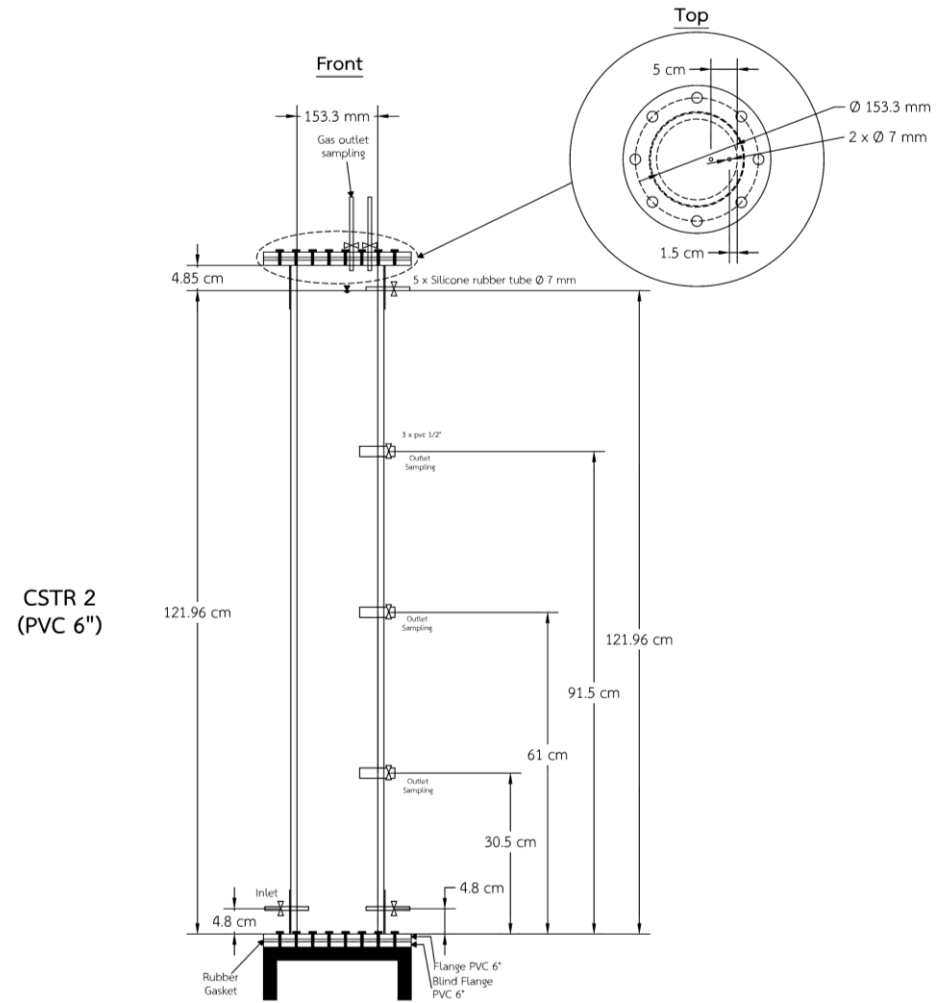
ระบบทดลองดำเนินการภายใต้โหมดการป้อนอาหารแบบกึ่งต่อเนื่อง (semi-continuous feed) โดยทำการป้อนและระบายน้ำเสียออกจากถังในปริมาณเท่ากันทุกวัน เพื่อรักษาระยะเวลากักเก็บ (Hydraulic Retention Time: HRT) ให้คงที่ โดยป้อนกากตะกอนผสมเข้า CSTR 1 และระบายกากตะกอนวันละ 1.640 L ส่วน CSTR 2 ป้อนกากตะกอนผสมที่ออกจาก CSTR 1 ซึ่งผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิสแล้ว และระบายกากตะกอนวันละ ในปริมาณ 820 มิลลิลิตรต่อวัน โดยสำหรับการระบายของเหลวออกจาก CSTR 2 จะระบายออกเฉพาะส่วนที่เป็น supernatant หลังจากปล่อยให้ตกตะกอนในระบบเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และทำการเก็บข้อมูลระบบในสถานะเสถียรนานกว่า 60 วัน และเดินระบบต่ออีกเป็นระยะเวลาประมาณ 90 วัน ในช่วงที่ระบบเข้าสู่ช่วง Dead Phase เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายลดลง ซึ่งช่วงที่เสถียรทำการคำนวณค่าเฉลี่ยกับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เพื่อตั้งขีดจำกัดควบคุม (UCL, LCL) ตามหลัก Shewhart Control Chart จากนั้นประเมินความเสถียรของระบบโดยตรวจสอบว่าข้อมูลอยู่ในขีดจำกัดควบคุมหรือไม่ หากมีค่าที่เกินขีดจำกัดหรือรูปแบบผิดปกติถือว่าระบบไม่เสถียร ตามการศึกษาของ Alcantara et al. (2017)



รูปที่ 3.5 แผนภาพ P&I (Piping and Instrumentation Diagram) ของระบบ Two-stage CSTR



รูปที่ 3.6 แบบหน้าตัดตั้ง CSTR 1 ของระบบ Two-stage CSTR



รูปที่ 3.7 แบบหน้าตัดถัง CSTR 2 ของระบบ Two-stage CSTR



รูปที่ 3.8 การติดตั้งชุดทดลองระบบ Two-stage CSTR

ผลผลิตมีเทน (CH_4 yield) หน่วยมิลลิลิตรต่อกรัมของค่า TVS ที่ป้อน ($\text{mL CH}_4/\text{g VS}$) ถูกกำหนดจากปริมาณการผลิตมีเทนต่อหน่วยมวลของสารอินทรีย์ (Wang et al., 2020) โดยคำนวณตามสมการที่ 3.5

$$\text{CH}_4 \text{ yield} = \frac{\text{CH}_4 \text{ production}}{\text{VS} * \text{Q}} \quad (3.5)$$

โดยที่	CH_4 yield	คือ	ผลผลิตมีเทน ($\text{mL CH}_4/\text{g VS}_{\text{fed}}$)
	CH_4 production	คือ	ปริมาณการผลิตมีเทนรายวัน ($\text{mL CH}_4/\text{day}$)
	VS	คือ	ความเข้มข้นของค่า TVS ในสารตั้งต้น ($\text{g VS}_{\text{fed}}/\text{L}$)
	Q	คือ	อัตราการไหลของระบบ (L/day)

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการเดินระบบแสดงดังตารางที่ 3.7 และใช้สัดส่วนผสมของกากตะกอนที่เหมาะสมซึ่งได้จากการศึกษาในหัวข้อ 3.3 การวิเคราะห์ทางสถิติใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (ANOVA: Single Factor) เพื่อทดสอบความแตกต่างของข้อมูลระหว่าง CSTR 1 และ CSTR 2 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยใช้เกณฑ์พิจารณาค่าความน่าจะเป็น (p-value)

โดยอ้างอิงจากการศึกษาของ Janke et al. (2018) นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์ชุมชนจุลินทรีย์ จาก CSTR 1 และ CSTR 2 ในหัวข้อ 3.6

ตารางที่ 3.7 ค่าการเดินระบบ Two-stage CSTR

พารามิเตอร์	CSTR 1	CSTR 2
สัดส่วนผสม (PS:SS)	ค่าที่เหมาะสมจากหัวข้อ 3.3	
อุณหภูมิ (°C)	อุณหภูมิบรรยากาศ	
OLR	ค่าที่เหมาะสมจากหัวข้อ 3.3	
V _{reactor} (L)	3	22.5
HRT (day)	ระยะเวลา Lag phase ของสัดส่วนผสมกากตะกอน PS:SS ที่เหมาะสมจากหัวข้อ 3.3.1	ระยะเวลาที่เป็นจุดตัดของ P และ R _m ของสัดส่วนผสมกากตะกอน PS:SS ที่เหมาะสมจากหัวข้อ 3.3.1
หน้าที่การทำงาน	Hydrolysis - Acidogenesis	Acetogenesis - Methanogenesis

การศึกษาสมดุลมวลสารในระบบ AnCoD ทำการศึกษาสมดุลมวลของคาร์บอน ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส ในช่วงที่ระบบมีความเสถียร โดยทำการประเมินการย่อยสลายทั้งในรูปของแข็งและของเหลวอ้างอิงแนวทางจากการศึกษาของ Muhayodin et al. (2021) ซึ่งนำเทคนิคการศึกษาสมดุลมวลสารในระบบ AnCoD มาประเมินกลไกในการย่อยสลายของระบบ AnCoD และการศึกษาสมดุลมวลสารสามารถใช้ประเมินคาร์บอนที่สามารถเปลี่ยนเป็นก๊าซชีวภาพได้ อีกทั้งยังสามารถประเมินธาตุอาหารหลัก (N P) ที่ออกจากระบบ AnCoD เพื่อใช้ในประโยชน์ในการต่อยอดงานวิจัยและจัดทำแนวทางการนำธาตุอาหารกลับมาใช้ประโยชน์ต่อไป โดยสมดุลมวล ดังสมการที่ 3.6-3.11

$$M_{in} = M_{out} + \Delta MB \quad (3.6)$$

$$M_{in} = (Q_{PS:SS})(X_{PS:SS}) \quad (3.7)$$

$$M_{out} = (Q_{SD,dis})(X_{SD,dis}) + (Q_{LD,dis})(X_{LD,dis}) + (Q_{BG})(X_{BG}) \quad (3.8)$$

$$\Delta MB = (Q_{SD,CSTR1})(X_{SD,CSTR1}) + (Q_{LD,CSTR1})(X_{LD,CSTR1}) + (Q_{SD,CSTR2})(X_{SD,CSTR2}) + (Q_{LD,CSTR2})(X_{LD,CSTR2}) \quad (3.9)$$

$$X_{SD,dis} = \% (C \text{ or } N \text{ or } P) * TS * \% \text{Solid,Separate} \quad (3.10)$$

$$X_{LD,dis} = (C \text{ or } N \text{ or } P; \text{ mg/L}) \% \text{Liquid,Separate} \quad (3.11)$$

โดยที่ M_{in} คือ อัตราการไหลมวลของสารทั้งหมดที่เข้าสู่ระบบ (L/day)

M_{out} คือ อัตราการไหลมวลของสารทั้งหมดที่ออกจากระบบ (L/day)

ΔMB	คือ	การเปลี่ยนแปลงของมวลชีวมวลภายในระบบ (มักเกิดจากการย่อยสลายหรือการสะสมของสารอินทรีย์ภายในระบบ (L/day)
$Q_{PS,SS}$	คือ	อัตราการไหลของกากตะกอนผสม (PS:SS) ที่เข้าสู่ระบบ (L/day)
$X_{PS,SS}$	คือ	ความเข้มข้นของคาร์บอน หรือธาตุอาหาร จากกากตะกอนผสมที่เข้าสู่ระบบ (g/L)
$Q_{SD,dis}$	คือ	อัตราการไหลของ Solid Digestate (SD) ที่ออกจากระบบ (L/day)
$X_{SD,dis}$	คือ	ความเข้มข้นของคาร์บอน หรือธาตุอาหาร จาก Solid Digestate (SD) ที่ออกจากระบบ (g/L)
$Q_{LD,dis}$	คือ	อัตราการไหลของ Liquid Digestate (LD) ที่ออกจากระบบ (L/day)
$X_{LD,dis}$	คือ	ความเข้มข้นของคาร์บอน หรือธาตุอาหาร จาก Liquid Digestate (LD) ที่ออกจากระบบ (g/L)
Q_{BG}	คือ	อัตราการไหลมวลของก๊าซชีวภาพ (Biogas: BG) ที่ผลิตได้จากระบบ (L/day)
X_{BG}	คือ	ความเข้มข้นของคาร์บอน หรือธาตุอาหาร ในก๊าซชีวภาพ (g/L) มีค่าเท่ากับ 0.5357 มาจาก ปริมาณก๊าซ CH_4 และ CO_2 1 L ที่สภาวะ STP มีค่าประมาณ 0.536 g C (จากที่สภาวะ STP (0°C, 1 atm) ก๊าซ 1 mol มีปริมาตร ≈ 22.4 L; Wang et al., 2014)
$Q_{SD,CSTR1}$	คือ	อัตราการไหลของ Solid Digestate (SD) ที่ออกจาก CSTR 1 (L/day)
$X_{SD,CSTR1}$	คือ	ความเข้มข้นของคาร์บอน หรือธาตุอาหาร จาก Solid Digestate (SD) ใน CSTR 2 (g/L)
$Q_{LD,CSTR1}$	คือ	อัตราการไหลของ Liquid Digestate (LD) ที่ออกจาก CSTR 1 (L/day)
$X_{LD,CSTR1}$	คือ	ความเข้มข้นของคาร์บอน หรือธาตุอาหาร จาก Liquid Digestate (LD) ใน CSTR 2 (g/L)
$Q_{SD,CSTR2}$	คือ	อัตราการไหลของ Solid Digestate (SD) ที่ออกจาก CSTR 1 (L/day)
$X_{SD,CSTR2}$	คือ	ความเข้มข้นของคาร์บอน หรือธาตุอาหาร จาก Solid Digestate (SD) ใน CSTR 2 (g/L)
$Q_{LD,CSTR2}$	คือ	อัตราการไหลของ Liquid Digestate (LD) ที่ออกจาก CSTR 1 (L/day)
$X_{LD,CSTR2}$	คือ	ความเข้มข้นของคาร์บอน หรือธาตุอาหาร จาก Liquid Digestate (LD) ใน CSTR 2 (g/L)

3.5 พารามิเตอร์ในการวิเคราะห์

พารามิเตอร์ในการวิเคราะห์ แสดงดังตารางที่ 3.8 วิธีการวิเคราะห์จากอ้างอิงจาก Standard methods for examination of water and wastewater (American Public Health Association, American Water Works Association, & Water Environment Federation, 2012)

ตารางที่ 3.8 พารามิเตอร์ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์	ความถี่	
		BMP Test	Two-stage CSTR
pH	pH meter	วันแรกและวัน สุดท้าย	ทุกวัน
COD (TCOD, SCOD)	Open Reflux Method		ทุก 3 วัน
BOD ₂₀ (TBOD ₂₀ , SBOD ₂₀)	Oxitop® Method	วันแรก	-
Alkalinity	Titration Method	วันแรกและวัน สุดท้าย	ทุก 3 วัน
TKN	Kjeldahl Method	วันแรก	ทุก 5 วัน
TS, TSS	Dried at 103 – 105 °C	วันแรกและวัน สุดท้าย	ทุก 3 วัน
VS	Ignited at 550 °C		
TDS	Dried at 103 – 105 °C, TDS meter		
VFA	Titration Method		ทุก 3 วัน
ปริมาณก๊าซชีวภาพ	การแทนที่น้ำ, Gas Counter	ทุกวัน	ทุกวัน
C, N	CHN Analyzer 628 (สำหรับ Solid sample), Multi N/C 3100 analyzers (สำหรับ Liquid sample)	-	ช่วงที่ระบบมี ความเสถียร (วันที่ 60-127)
P	Perchloric Acid Digestion และ Vanadomolybdophosphoric Acid Colorimetric Method		

3.6 การวิเคราะห์ชุมชนจุลินทรีย์ (Microbial Community)

การวิเคราะห์ชุมชนจุลินทรีย์ ทำการเก็บตัวอย่างจุลินทรีย์ที่ผสมกับกากตะกอนในระบบ Two-stage CSTR ในช่วงท้ายของการทดลอง และนำไปเจือจางต่อเนื่องแบบซีรี่ส์ตั้งแต่ 10^0 ถึง 10^9 จากนั้นจึงเพาะเลี้ยงจุลินทรีย์ด้วยเทคนิค spread plate บนอาหารวุ้น (Nutrient Agar: NA) โดยทำซ้ำแต่ละความเข้มข้น 2 ซ้ำ ตามวิธีของ Madigan et al. (2020) งานเพาะเลี้ยงถูกบ่มที่อุณหภูมิ 35°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดโคโลนีจุลินทรีย์ สำหรับการศึกษารายละเอียดของเมทานอลในเป็นแหล่งคาร์บอน ได้ทำการเพาะเลี้ยงจุลินทรีย์อีกชุดหนึ่งในอาหาร NA ที่เติมเมทานอลร้อยละ 1 เพื่อส่งเสริมการเจริญเติบโตของแบคทีเรียเมทานอโทรฟิกและเมทิลโทรฟิก (Waturangi et al., 2011) การบ่มเพาะชุดทดลองทั้งสองกระทำที่อุณหภูมิ 28°C และ 35°C เพื่อเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่แตกต่างกันต่อความหลากหลายและการเจริญของจุลินทรีย์

หลังการบ่มเพาะเชื้อจุลินทรีย์ เลือกงานเพาะเลี้ยงที่มีโคโลนีแยกตัวชัดเจนเพื่อนำไปแยกเชื้อบริสุทธิ์ (single colony) จากนั้นบันทึกลักษณะทางสัณฐานของโคโลนี (morphology) และทำการตรวจสอบเบื้องต้นของจุลินทรีย์ด้วยวิธีการย้อมแกรม จากนั้นนำมาตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงเพื่อศึกษารูปร่างและลักษณะเซลล์ (Gibbs & Hayes, 1998)

สำหรับการระบุชนิดของจุลินทรีย์ในระดับสายพันธุ์ ดำเนินการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค MALDI-TOF MS ตามวิธีของ Zakavi et al. (2022) ประมวลผล mass spectrum profile ด้วยซอฟต์แวร์ Flexcontrol v. 3.4 วิเคราะห์ Protein mass fingerprint ในช่วงความคลาดเคลื่อนน้ำหนักโมเลกุลที่ 300 ppm แล้วส่งถ่ายข้อมูล protein mass fingerprint มายังซอฟต์แวร์ Maldi Biotyper Realtime Classification (RTC) v.4.0 เปรียบเทียบเทียบกับ mass fingerprint ของตัวอย่างกับฐานข้อมูล โดยการแปลผลการระบุชนิดพิจารณาจากคะแนนที่ได้ โดยคะแนน 2.000 ถึง 3.000 หมายถึงการระบุสายพันธุ์ (species) ที่มีความเชื่อมั่นสูง คะแนน 1.700 ถึง 1.999 หมายถึงการระบุในระดับสกุล (genus) และคะแนนต่ำกว่า 1.699 ถือว่าไม่น่าเชื่อถือ ซึ่งจะพิจารณาเฉพาะตัวอย่างที่ได้คะแนน ≥ 2.000 เท่านั้นว่าได้รับการระบุชนิดในระดับสกุลหรือสายพันธุ์อย่างมั่นใจ ข้อมูลความหลากหลายและความอุดมสมบูรณ์ของจุลินทรีย์ถูกนำเสนอในรูปแบบตารางและกราฟเพื่อเปรียบเทียบผลของเมทานอลและอุณหภูมิการบ่มต่อโครงสร้างของชุมชนจุลินทรีย์

3.7 การประเมินศักยภาพการขยายขนาดของระบบ Two-stage CSTR

สู่การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษรีไซเคิล

การศึกษานี้ดำเนินการเก็บข้อมูลเบื้องต้นจากในโรงงานผลิตกระดาษรีไซเคิล ในหัวข้อที่ 3.1 เพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลสำหรับการประเมินความเป็นไปได้ในการขยายขนาดระบบ Two-stage CSTR

จากระดับห้องปฏิบัติการไปสู่ระดับอุตสาหกรรม โดยข้อมูลเบื้องต้นที่นำมาประเมินเป็นสมมูลมวลอินทรีย์คาร์บอนในระบบบำบัดน้ำเสียและสมมูลพลังงานของโรงงานนั้นสามารถสะท้อนบริบทของแนวทางในการนำกากตะกอนส่วนเกินมาใช้ประโยชน์เป็นพลังงานหมุนเวียนในโรงงาน นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์ทั้งด้านเทคโนโลยี เศรษฐศาสตร์ และผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมเบื้องต้นเพื่อกำหนดแนวทางพัฒนาเทคโนโลยีที่ยั่งยืนและเหมาะสมต่อบริบทของอุตสาหกรรมกระดาษรีไซเคิลในประเทศไทย

3.7.1 การวิเคราะห์สมมูลอินทรีย์คาร์บอนและพลังงาน

การวิเคราะห์สมมูลอินทรีย์คาร์บอนและสมมูลพลังงานของโรงงาน เพื่อระบุการใช้แหล่งพลังงานและการผลิตพลังงาน ตลอดจนจุดกำเนิดของเสียในแต่ละหน่วยบำบัด โดยพิจารณาทั้งสมดุลขาเข้าและขาออก รวมถึงศักยภาพในการนำกลับมาใช้หรือรีไซเคิลใหม่ โดยอ้างอิงการศึกษาสมมูลมวลของ Himmelblau & Riggs (2012)

3.7.1.1 สมมูลมวลอินทรีย์คาร์บอน

การประเมินสมมูลมวลของอินทรีย์คาร์บอนภายในระบบบำบัดน้ำเสียในรูปของแข็งอินทรีย์ ซึ่งแสดงโดยปริมาณของแข็งระเหยง่ายทั้งหมด (Total Volatile Solids: TVS) ทั้งในน้ำเสียและกากตะกอน เนื่องจากค่า TVS เป็นตัวบ่งชี้ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอน การคำนวณใช้หลักการสมมูลมวลดังสมการ (3.12) และ (3.13) (Himmelblau & Riggs, 2012):

$$\sum_{in} M_i - \sum_{out} M_e = 0 \quad (3.12)$$

โดยที่ M_i คือ อัตราการไหลของค่า TVS ที่ทางเข้า (kg/day)
 M_{out} คือ อัตราการไหลของค่า TVS ที่ทางออก (kg/day)

สำหรับสมการทั่วไปของสมมูลมวลและพลังงานดังนี้:

$$\text{Accumulation} = \text{Input} - \text{Output} + \text{Generation} - \text{Consumption} \quad (3.13)$$

โดยที่ค่า TVS ในแต่ละแหล่งกำเนิดถูกคำนวณโดยการนำค่าความเข้มข้นของค่า TVS (มวล/ปริมาตร) คูณกับอัตราการไหลของกระแส (ปริมาตร/เวลา) เพื่อให้ได้ค่าอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ของค่า TVS สำหรับใช้ในการวิเคราะห์สมมูลมวล

3.7.1.2 สมดุลพลังงาน

การวิเคราะห์สมดุลพลังงานครอบคลุมทั้งระบบบำบัดน้ำเสียและกระบวนการผลิต เพื่อระบุความต้องการพลังงาน ประเมินศักยภาพการกู้คืนพลังงานในระบบ และเลือกเทคโนโลยีพลังงานหมุนเวียนที่เหมาะสม การใช้พลังงานคำนวณจากกำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์คูณด้วยระยะเวลาการเดินเครื่องต่อวัน ขณะที่พลังงานหมุนเวียนจากก๊าซชีวภาพและเชื้อเพลิงขยะ (Refuse-derived Fuel: RDF) ประเมินจากสมการในหัวข้อ 3.7.2

3.7.2 สถานการณ์พลังงานหมุนเวียนและตัวชี้วัดการประเมิน

เพื่อประเมินศักยภาพการนำกากตะกอนส่วนเกินกลับมาใช้เป็นพลังงาน งานวิจัยนี้พิจารณาสองสถานการณ์หลัก ได้แก่ (1) การผลิตเชื้อเพลิง RDF และ (2) การผลิตก๊าซชีวภาพผ่านกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน มีขอบเขตของการประเมินแต่ละสถานการณ์ดังรูปที่ 3.9

3.7.2.1 การผลิตเชื้อเพลิง RDF

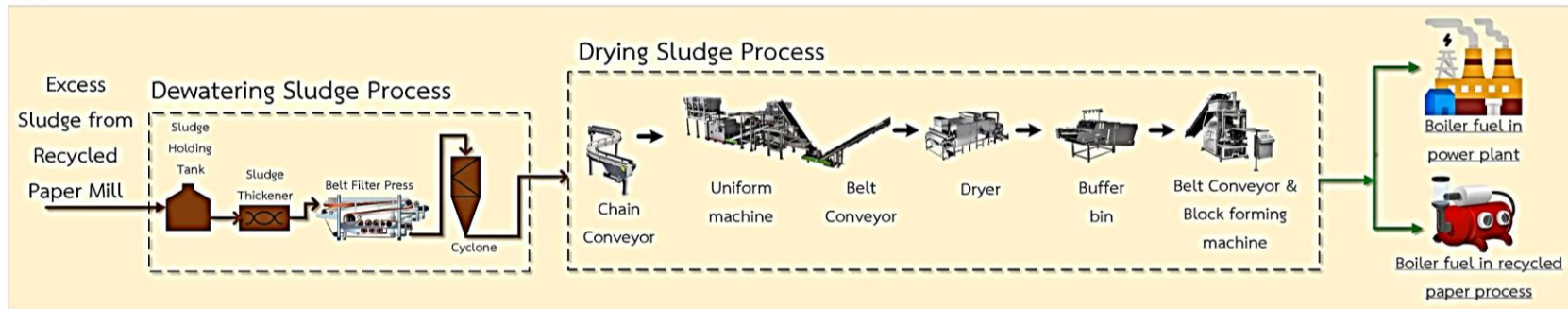
ในสถานการณ์นี้ กากตะกอนส่วนเกินที่ผ่านการลดความชื้นจะถูกแปรรูปเป็น RDF เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงในหม้อไอน้ำของโรงงาน โดยค่าความร้อนสูงสุด (Higher Heating Value: HHV) ใช้ในการประเมินศักยภาพพลังงานจาก RDF ตามสมการ (3.14) (Singh et al., 2020):

$$E_{f,RDF} = HHV * M_d \quad (3.14)$$

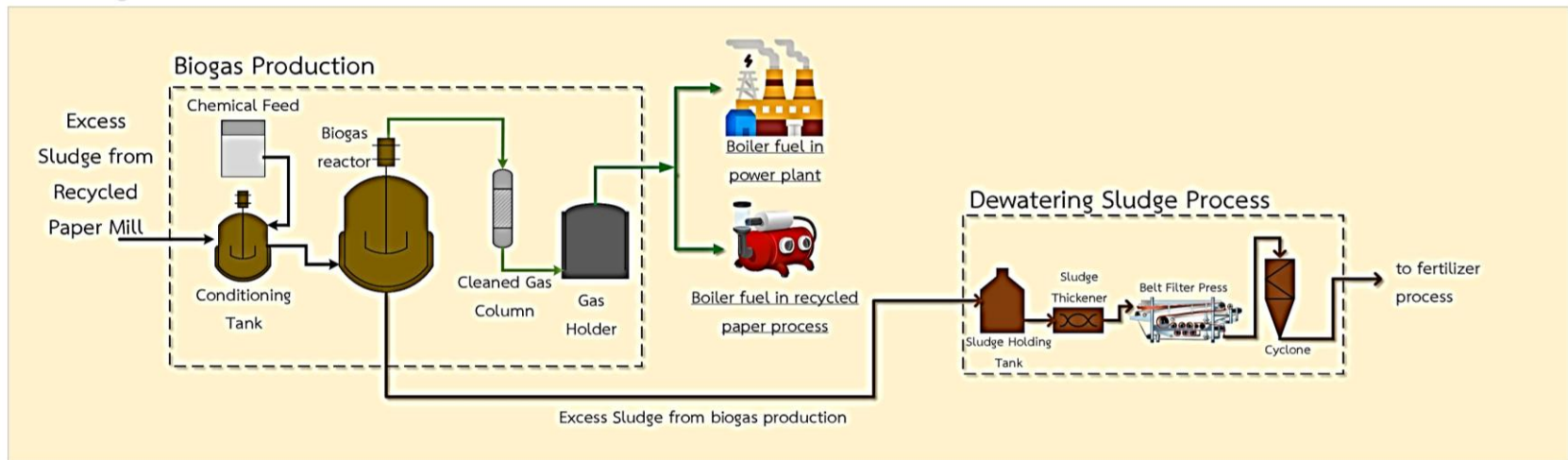
โดยที่	$E_{f,RDF}$	คือ	พลังงานเชื้อเพลิงจาก RDF (MJ/day)
	HHV	คือ	ค่าความร้อนของกากตะกอน (MJ/kg)
	M_d	คือ	มวลของกากตะกอนที่ลดความชื้นแล้ว (kg/day)

3.7.2.2 การผลิตก๊าซชีวภาพ

สถานการณ์นี้พิจารณากากตะกอนส่วนเกินเป็นวัตถุดิบสำหรับกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยใช้ค่าศักยภาพการเกิดก๊าซมีเทนจาก BMP Test (Veluchamy, 2018) คำนวณปริมาตรก๊าซมีเทนรายวันและพลังงานเชื้อเพลิงจากมีเทนตามสมการ (3.15) และ (3.16) (Singh et al., 2020):



(ก) RDF Production



(ข) Biogas Production

รูปที่ 3.9 ขอบเขตระบบของ (ก) สถานการณ์ที่ 1: การผลิตเชื้อเพลิง RDF และ (ข) สถานการณ์ที่ 2: การผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนส่วนเกินที่เกิดขึ้นในโรงงานผลิตกระดาษรีไซเคิล

$$V_{CH_4} = BMP * C_{TVS} * Q_s * 10^{-3} \quad (3.15)$$

$$E_{f,CH_4} = V_{CH_4} * CV_{CH_4} \quad (3.16)$$

โดยที่	V_{CH_4}	คือ	ปริมาตรก๊าซมีเทน (m^3/day)
	CV_{CH_4}	คือ	ค่าความร้อนของมีเทน (35.9 MJ/ m^3 ; The Engineering ToolBox, 2008)
	BMP	คือ	ค่าการผลิตมีเทน (L CH_4/g VS_{fed})
	C_{TVS}	คือ	ความเข้มข้นของค่า TVS ในกากตะกอน (mg/L)
	Q_s	คือ	อัตราการไหลของกากตะกอน (L/day)

3.7.3 ศักยภาพพลังงานและปัจจัยการแปลง

พลังงานเชื้อเพลิงจาก RDF และก๊าซชีวภาพถูกแปลงเป็นไอน้ำและไฟฟ้า โดยใช้ปัจจัยมาตรฐานตามอุตสาหกรรม (Zaporowski, 2003; Suthaphod & Yoochatchaval, 2021) ตามสมการ (3.17) ถึง (3.20):

$$E_s = E_f * \eta_{th} \quad (3.17)$$

$$M_s = V_{CH_4} * \alpha \quad (3.18)$$

$$M_s = E_s / H_s \quad (3.19)$$

$$E_e = M_s * \eta_{el} * 1,000 \quad (3.20)$$

โดยที่	E_f	คือ	พลังงานเชื้อเพลิง (MJ/day)
	E_s	คือ	พลังงานไอน้ำ (MJ/day)
	M_s	คือ	มวลไอน้ำ (ton/day)
	E_e	คือ	พลังงานไฟฟ้า (kWh/day)
	η_{th}	คือ	ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงเป็นไอน้ำ
	H_s	คือ	Enthalpy ของไอน้ำ (MJ/ton)
	η_{el}	คือ	ประสิทธิภาพการแปลงไอน้ำเป็นไฟฟ้า
	α	คือ	อัตราการผลิตไอน้ำจากก๊าซชีวภาพ (ton/ m^3 CH_4)

สำหรับการเผา RDF 1 MJ ของพลังงานเชื้อเพลิงให้ผลผลิตไอน้ำประมาณ 0.25 ถึง 0.38 กิโลกรัม โดยมีประสิทธิภาพหม้อไอน้ำราวร้อยละ 80 ซึ่งเทียบเท่าประมาณ 1.2 ถึง 1.5 ตันไอน้ำ/ตัน RDF และสามารถผลิตไฟฟ้าได้ราว 0.14 เมกะวัตต์ชั่วโมง/ตันไอน้ำ (U.S. Department of

Energy, 2012; EBE Engineering, 2024; Thunder Said Energy, 2019; Ariunbaatar et al., 2014) ขณะที่ก๊าซชีวภาพ (มีเทน) ให้ค่าความร้อน 35.9 เมกะจูล/ลูกบาศก์เมตร (The Engineering ToolBox, 2008) พลังงานที่ต้องใช้ในการผลิตไอน้ำหนึ่งตันอยู่ที่ประมาณ 2,585 เมกะจูล (Green, 2008) และสามารถผลิตไฟฟ้าได้ประมาณ 0.14 เมกะวัตต์ชั่วโมง/ตันไอน้ำ (Ariunbaatar et al., 2014)

3.8 การวิเคราะห์เทคโนโลยีและเศรษฐศาสตร์ (Techno-economic Analysis)

การศึกษานี้ได้ดำเนินการประเมินด้านเทคโนโลยีและเศรษฐศาสตร์ (Techno-economic assessment) เพื่อวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางเศรษฐกิจ โดยเปรียบเทียบแนวทางการนำกากตะกอนส่วนเกินกลับมาใช้ประโยชน์เป็นพลังงานหมุนเวียนสองกรณีศึกษา ได้แก่ (1) การผลิตเชื้อเพลิง RDF และ (2) การผลิตเชื้อเพลิงก๊าซชีวภาพ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตและความคุ้มค่าทางการเงินของแต่ละทางเลือก

การประเมินนี้ครอบคลุมทั้งต้นทุนการก่อสร้างเริ่มต้น และต้นทุนการดำเนินงานที่เกี่ยวข้องกับการก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐาน การจัดซื้ออุปกรณ์ แรงงาน การดำเนินงานระบบ และการบำรุงรักษา อ้างอิงจากข้อมูลที่เผยแพร่ในแหล่งวิชาการ (อ้างอิงจาก พรรษา ลิบลับ, 2565; Lim et al., 2021; Sani et al., 2022) ทั้งนี้ ข้อมูลการประเมินความคุ้มค่าในแต่ละสถานการณ์การศึกษามีดังนี้

สถานการณ์ที่ 1: การผลิตเชื้อเพลิง RDF

การประเมินความคุ้มค่าของการผลิต RDF ดำเนินการโดยใช้ข้อมูลด้านการลงทุนและการดำเนินงานหลัก ค่าใช้จ่ายลงทุนเริ่มต้นสำหรับการก่อสร้างและอุปกรณ์อยู่ที่ 599,987 บาทต่อเมตริกตันของขยะต่อวัน ตามรายงานของ พรรษา ลิบลับ (2565) รายได้ประจำปีคาดการณ์จากการจำหน่ายไฟฟ้าในอัตรา 3.6 บาทต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง ซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างราคาพลังงานไฟฟ้าของประเทศไทยที่กำกับโดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย การใช้พลังงานสำหรับการผลิตเชื้อเพลิง RDF คำนวณจากความต้องการไฟฟ้าของเครื่องจักรในระบบตามใบเสนอราคาของโครงการของโรงงานกระดาษไซเคิล (2566)

ต้นทุนการดำเนินงานประกอบด้วยค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้า ค่าแรง และค่าบำรุงรักษา โดยคำนวณกำไรก่อนหักภาษีในแต่ละปี พร้อมวิเคราะห์ที่ตัวชี้วัดด้านการเงิน ได้แก่ ระยะเวลาคืนทุน (PBP) มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) ตลอดอายุโครงการ 20 ปี ที่อัตราคิดลดร้อยละ 8 และอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) ผลลัพธ์ RDF คำนวณได้ 21.46 เมตริกตันต่อวัน (ton/day) จากอัตราการผลิต 350 กิโลกรัม RDF ต่อขยะ 1 ตัน และปริมาณขยะรวม 61.3 ton/day ส่วนไฟฟ้าที่ไม่ได้ผลิตเองจะจัดซื้อจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA)

สถานการณ์ที่ 2: การผลิตก๊าซชีวภาพ

สำหรับกรณีการผลิตก๊าซชีวภาพ ได้ประเมินต้นทุนการลงทุนเริ่มต้นโดยใช้ค่าเฉลี่ยการก่อสร้าง 14,074 บาทต่อลูกบาศก์เมตรของปริมาตรถังปฏิกรณ์ จากรายงานของ Lim et al. (2021) และ Sani et al. (2022) โดยมีรายได้หลักจากการจำหน่ายไฟฟ้าในอัตราเดียวกันกับกรณี RDF (3.6 บาท/กิโลวัตต์ชั่วโมง) การใช้พลังงานสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ 0.14 kWh/m³ ของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด และการใช้พลังงานของหม้อไอน้ำประมาณ 20,277 kWh/d สำหรับความจุ 220 ton/day (จากข้อมูลทุติยภูมิโรงงานกระดาษรีไซเคิล, 2566)

ต้นทุนการดำเนินงานอ้างอิงจาก Sani et al. (2022) ครอบคลุมค่าใช้จ่ายที่จำเป็นต่อการดำเนินระบบให้มีประสิทธิภาพ กำไรก่อนหักภาษีคำนวณเป็นรายปี และใช้ตัวชี้วัดทางการเงิน ได้แก่ NPV (ช่วงเวลา 20 ปี ที่อัตราคิดลดร้อยละ 8) และ IRR ในการประเมินความคุ้มค่าระยะยาว นอกจากนี้ได้พิจารณาการพึ่งพาไฟฟ้าจากภายนอก โดยสมมติให้ซื้อจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA) เช่นเดียวกับกรณี RDF (การแปลงค่าทางการเงินทั้งหมดเป็นดอลลาร์สหรัฐใช้ อัตราแลกเปลี่ยน 36.5 บาทต่อ 1 ดอลลาร์สหรัฐ)

สำหรับการวิเคราะห์มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) ระยะเวลาคืนทุน (PBP) และอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) เพื่อประเมินความคุ้มค่าของแต่ละสถานการณ์ที่ศึกษา โดยมีวิธีการคำนวณดังนี้

มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) หมายถึงผลรวมของผลตอบแทนสุทธิที่ได้ปรับค่าของเวลาแล้วของโครงการ หรือผลรวมของมูลค่าปัจจุบันของผลตอบแทนลบด้วยผลรวมของมูลค่าปัจจุบันของต้นทุนที่เกิดขึ้นตลอดอายุโครงการ โดย NPV อาจมีค่าเป็นบวก ลบ หรือศูนย์ ขึ้นอยู่กับขนาดของมูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์รวม (Present Value Benefit: PVB) หักด้วยมูลค่าปัจจุบันของต้นทุนรวม (Present Value Cost: PVC) เกณฑ์การตัดสินใจลงทุนในโครงการ คือ การที่ NPV มีค่ามากกว่าศูนย์ ซึ่งหมายความว่ามูลค่าปัจจุบันของผลตอบแทนมากกว่ามูลค่าปัจจุบันของต้นทุน และแสดงถึงการลงทุนที่คุ้มค่า โดย NPV สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.21 และ 3.22

อัตราส่วนลดที่ใช้ในวิเคราะห์โครงการ คือ อัตราที่ใช้ในการแปลงมูลค่าเงินในอนาคตให้เป็นมูลค่าเทียบเท่าปัจจุบัน โดยสะท้อนถึงความสำคัญของเงินในปัจจุบันเมื่อเทียบกับเงินที่จะได้รับในอนาคตสำหรับโครงการพลังงานทดแทนที่มีระยะเวลาในการดำเนินการยาวนาน ซึ่งอัตราคิดลดที่เหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญในการประเมินความคุ้มค่าและความเสี่ยงของโครงการ โดยทั่วไปสำหรับโครงการพลังงานทดแทน อัตราคิดลดมักอยู่ในช่วงร้อยละ 4 ถึง 10 ต่อปี เนื่องจากโครงการประเภทนี้มักมีต้นทุนเริ่มต้นสูง แต่ค่าดำเนินงานและรายได้ค่อนข้างมั่นคง สำหรับการวิเคราะห์ที่ในงานวิจัยนี้ใช้อัตราส่วนลดร้อยละ 8 อ้างอิงจากงานวิจัยของ มานิตย์ สิงห์ทองชัย (2550)

$$NPV = PVB - PVC \quad (3.21)$$

$$NPV = \sum_{t=1}^n [(B_t - C_t) / (1+r)^t] \quad (3.22)$$

โดยที่	B_t	=	ผลประโยชน์หรือผลตอบแทนของโครงการในปีที่ t
	C_t	=	ต้นทุนของโครงการในปีที่ t
	r	=	อัตราคิดลดที่เหมาะสม (Discount Rate) หรืออัตราดอกเบี้ยเงินกู้ (ร้อยละ 8)
	t	=	ปีของโครงการ คือปีที่ 1.2.3.... n (คิดเป็น 1 ปี)
	n	=	จำนวนปีทั้งสิ้นของโครงการ (คิดเป็น 1 ปี)

ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period: PBP) คือ ระยะเวลาที่ผลตอบแทนสุทธิจากการดำเนินงานมีค่าเท่ากับเงินลงทุนเริ่มต้นของโครงการ หรือจำนวนปีที่ใช้ในการได้รับผลตอบแทนคืนจนเท่ากับเงินลงทุน สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.23

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน} = \frac{\text{ค่าใช้จ่ายในการลงทุน}}{\text{ผลตอบแทนเฉลี่ยสุทธิต่อปี}} \quad (3.23)$$

อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) คือ อัตราผลตอบแทนที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดรับสุทธิเท่ากับมูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดจ่ายสุทธิ หรือก็คืออัตราที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) เท่ากับศูนย์ ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.24

$$\text{IRR หรือ } r \text{ ที่ทำให้ } NPV = \sum_{t=1}^n \frac{B_t - C_t}{(1+r)^t} = 0 \quad (3.24)$$

โดยที่ IRR,r = อัตราผลตอบแทนของโครงการที่ทำให้ NPV = 0

ในกรณีที่ NPV ไม่เท่ากับศูนย์ สามารถใช้วิธีการคำนวณแบบเทียบบัญญัติไตรยางค์ (Interpolation) เพื่อประมาณค่า IRR สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.25

$$\text{IRR} = \text{อัตราส่วนลดตัวต่ำ} + \frac{\text{ผลต่างระหว่างอัตราส่วนลดทั้งสองคูณ (NPV ที่ใช้อัตราส่วนลดตัวต่ำผลต่างของ NPV ที่ใช้อัตราส่วนลดทั้งสอง)}}{\text{ผลต่างของ NPV ที่ใช้อัตราส่วนลดทั้งสอง}} \quad (3.25)$$

เกณฑ์การพิจารณาเลือกโครงการจะกระทำโดยการเปรียบเทียบ IRR กับค่าเสียโอกาสของเงินลงทุน หรืออัตราดอกเบี้ย (i) โดยจะเลือกดำเนินโครงการที่มีค่า IRR สูงกว่าอัตราคิดลดดังกล่าวในทางกลับกัน หาก IRR ต่ำกว่าอัตราคิดลด จะไม่เลือกดำเนินโครงการนั้น