

## บทที่ 2

### ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาการเพิ่มมูลค่าของเสียและการพัฒนาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนจากกากตะกอนส่วนเกินด้วยระบบย่อยสลายร่วมแบบไม่ใช้ออกซิเจนในอุตสาหกรรมกระดาษรีไซเคิลนี้ ได้ทำการทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมกระดาษ โดยเริ่มจากการศึกษาถึงแหล่งกำเนิดและลักษณะของกากตะกอนส่วนเกินที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรมกระดาษ ซึ่งเป็นวัตถุดิบหลักของการศึกษานี้ ตลอดจนทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของกากตะกอน การย่อยสลายร่วมแบบไม่ใช้ออกซิเจน และเทคโนโลยีถึงปฏิบัติการสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

#### 2.1 กระบวนการผลิตกระดาษและการเกิดของเสีย

อุตสาหกรรมกระดาษถือเป็นอุตสาหกรรมหลักที่มีความเชื่อมโยงต่อเนื่องจากภาคเกษตรกรรม โดยใช้วัตถุดิบสำคัญ เช่น ไม้ยูคาลิปตัส ไม้ไผ่ ปอ ฟางข้าว และชานอ้อย เป็นต้น ซึ่งล้วนมีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมกระดาษในประเทศ และส่งผลต่อเศรษฐกิจโดยรวมอย่างมีนัยสำคัญ กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษจัดเป็นอุตสาหกรรมต้นน้ำของอุตสาหกรรมกระดาษ ซึ่งต่อยอดไปสู่ อุตสาหกรรมกลางน้ำ เช่น การผลิตกระดาษพิมพ์เขียน และกระดาษกราฟท์ ตลอดจนขยายผลไปสู่ อุตสาหกรรมปลายน้ำ ได้แก่ อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ เช่น กล่องกระดาษและถุงกระดาษ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของอุตสาหกรรมสิ่งพิมพ์ โดยภาพรวมของโครงสร้างอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษแสดงดังรูปที่ 2.1

##### 2.1.1 กระบวนการผลิตเยื่อและกระดาษ

การผลิตเยื่อกระดาษใช้วัตถุดิบหลักสามประเภท ได้แก่ ไม้ เช่น ยูคาลิปตัสและกระถิน วัตถุดิบที่ไม่ใช่ไม้ เช่น ชานอ้อย ปอแก้ว ฟางข้าว และไม้ไผ่ รวมถึงกระดาษเก่าที่นำกลับมาใช้ใหม่ ผ่านกระบวนการตีเยื่อใหม่ แม้เยื่อจากกระดาษเก่าจะมีความแข็งแรงและความสะอาดต่ำกว่าเยื่อบริสุทธิ์ แต่ก็ยังเป็นช่องทางเพิ่มสัดส่วนการใช้วัสดุหมุนเวียนในอุตสาหกรรม โดยตัวอย่างกระดาษเก่าที่นิยมนำมาใช้ ได้แก่ กล่องลูกฟูกใช้แล้ว กระดาษสำนักงานใช้แล้ว และเศษกระดาษหลากหลายชนิดที่ปะปนกัน



## ตารางที่ 2.1 วิธีการผลิตเยื่อกระดาษ (Pulping)

ขั้นตอนการเตรียม	รายละเอียด
1. การเตรียมวัตถุดิบ <sup>ก, ข, ค</sup> (Raw Materials Preparation)	ลอกเปลือก (Debarking) และตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ (Chipping)
2 การผลิตเยื่อกระดาษ (Pulping) เป็นการแยกลิกนิน เรซิน และไขมันออกจากเยื่อเซลลูโลส	
2.1 ทางกายภาพ <sup>ก</sup> (Mechanical Pulping)	(1) Stone Groundwood - การบดชิ้นไม้ให้ละเอียดโดยใช้หินบด
	(2) Refiner Mechanical Pulp – การบดชิ้นไม้ด้วยเครื่องบดแบบงาน (refiner)
	(3) Thermo-mechanical Pulping - ใช้ความร้อนช่วยขณะที่ใช้จานหรือเฟืองบดชิ้นไม้
	(4) Chemithermomechanical Pulping - มีการใช้สารเคมีแต่น้อยกว่าวิธีทางเคมี และมีการใช้การบดที่เป็นวิธีทางกายภาพแต่จะมีลิกนินเหลืออยู่ครึ่งหนึ่งของปริมาณที่มีอยู่ในวัตถุดิบ
2.2 ทางเคมี <sup>ก</sup> (Chemical Pulping)	(1) Kaft (Sulfate) – เป็นกระบวนการทำเยื่อกระดาษคราฟท์โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และโซเดียมซัลไฟด์ (Na <sub>2</sub> S) ทำให้เยื่อกระดาษมีความแข็งแรงสูง
	(2) Sulfite Pulping – ใช้แมกนีเซียม/แคลเซียมไบซัลไฟด์ (Ca(HSO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> /Mg(HSO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ) และกรดกำมะถัน (H <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> ) แต่ความแข็งแรงของเยื่อกระดาษไม่เท่าเยื่อกระดาษคราฟท์
	(3) Soda Pulping – ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
3. การล้างเยื่อ <sup>ก, ข</sup> (Washing)	เพื่อล้างของเหลวดำ ซึ่งประกอบด้วยสารเคมี ลิกนิน ส่วนประกอบอื่น ๆ ออกจากเยื่อ
4. การร่อนเยื่อ <sup>ก, ข</sup> (Screening)	เพื่อแยกสิ่งเจือปนออกจากเยื่อกระดาษ เช่น ชิ้นไม้ที่ไม่ถูกย่อย เส้นใยที่ยังไม่แยกเป็นอิสระ เศษกรวดทราย เปลือกไม้ เป็นต้น
5. การสกัดลิกนินด้วยออกซิเจน <sup>ข</sup> (O <sub>2</sub> Delignification)	เป็นการให้ออกซิเจนทำปฏิกิริยากับลิกนิน เพื่อให้ลิกนินหลุดออกจากเยื่อกระดาษเพิ่มมากขึ้น
6. การฟอกเยื่อ (Bleaching) <sup>ก, ข</sup>	เพื่อปรับปรุงคุณภาพเยื่อในด้านความสว่างหรือความขาวที่ต้องการ
7. การอบแห้ง (Drying) <sup>ข</sup>	เพื่อเดินแผ่นขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์และส่งจำหน่ายต่อไป

หมายเหตุ อ้างอิงจาก <sup>ก</sup> กนิษฐา วิมลรัตน์ (2552), <sup>ข</sup> นิตยา สุขอร่าม (2554), และ <sup>ค</sup> Kumar et al. (2020a)

## ตารางที่ 2.2 วิธีการผลิตกระดาษ (Paper Making)

ขั้นตอนการเตรียม	รายละเอียด
1. เครื่องตีเยื่อ (Pulp Beater)	เยื่อกระดาษแห้งจะถูกผสมกับน้ำ และถูกนำไปตีหรือบดเนื้อ เพื่อให้เส้นใยสั้นลง และเพิ่มพื้นที่ผิว ความนุ่มนวล และความยืดหยุ่น
2. การใส่สารเติมแต่ง (Additives resin, clay, talc, paraffin และอื่น ๆ )	มีการใส่สารเติมแต่ง เช่น เรซิน ดินเหนียว พาราฟิน แร่ทัลค์ เพื่อปรับปรุงคุณภาพกระดาษ เช่น ทำกระดาษที่ไม่ชอบน้ำ เพิ่มความนุ่มนวล เป็นต้น
3. เครื่องโฟร์ดรีนีย์ร์ (Fourdrinier machine)	เพื่อนำกระดาษมาอบแห้ง โดยวางบนตะแกรงในเครื่องโฟร์ดรีนีย์ร์
4. กระจกอบสูบแห้ง/กระจกอบสูบแรงดันสูง (Yankee cylinders/High pressurized cylinders)	เพื่อนำน้ำที่เหลือออกจากเยื่อกระดาษ โดยการเป่า และกระดาษจะถูกส่งต่อไปที่กระจกอบสูบแรงดันสูง เพื่อให้มีผิวสัมผัสเรียบ และให้ความสม่ำเสมอ
5. เครื่องอัดรีด (Calendering)	เพื่ออัดรีดกระดาษ
6. การม้วน (Circular rolls)	เพื่อตัดม้วน และจัดเก็บหรือส่งไปใช้ในอุตสาหกรรมต่อไป

หมายเหตุ อ้างอิงจาก Kumar et al. (2020a)

### 2.1.2 การเกิดของเสีย

ของเสียประเภทของแข็ง (Solids Waste) ที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรมกระดาษส่วนใหญ่ ได้แก่ ของเสียที่ถูกคัดทิ้ง (Reject Waste) กากตะกอนจากกระบวนการกำจัดหมึก (Deinking Sludge) รวมถึงกากตะกอนส่วนเกินจากระบบบำบัดน้ำเสีย ซึ่งลักษณะของของเสียจะขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตที่ใช้ โดยมีรายละเอียดแหล่งที่มาของของเสียดังต่อไปนี้

#### 2.1.2.1 ของเสียที่ถูกคัดทิ้ง (Reject Waste)

ของเสียที่ถูกคัดทิ้งเป็นผลผลิตข้างเคียงที่เกิดจากกระบวนการแยกสิ่งปนเปื้อนออกจากวัตถุดิบรีไซเคิล ประกอบด้วยพลาสติก โลหะ สิ่งทอ และแก้ว โดยคิดเป็นประมาณร้อยละ 6.5 ของกระดาษรีไซเคิลที่ใช้เป็นวัตถุดิบ (Monte et al., 2009) ของเสียเหล่านี้มีลักษณะหลากหลาย ตั้งแต่ชิ้นใหญ่ เช่น เสื้อผ้าและขวด PET ไปจนถึงสิ่งปนเปื้อนขนาดเล็ก เช่น กรวดและทรายละเอียด องค์ประกอบของของเสียจากโรงงานกระดาษแตกต่างจากขยะมูลฝอยทั่วไป โดยมีเส้นใยกระดาษสูงกว่าประมาณร้อยละ 30 และมีพลาสติกในปริมาณมากถึงร้อยละ 49 ถึง 51 ซึ่งส่งผลให้มีค่าความร้อนสูง (Higher Heating Value: HHV) อยู่ที่ 18 ถึง 28 เมกะจูลต่อกิโลกรัม (MJ/kg) ใกล้เคียงกับถ่านหินเกรดต่ำ ที่มีค่า HHV ที่ 24.86 MJ/kg (Lou et al., 2012) การจัดการของเสียจำเป็นต้องแยก PVC ออกเพื่อป้องกันการเกิดสารไดออกซินในกระบวนการเผาไหม้

ปัจจุบันการฝังกลบยังเป็นวิธีหลักในการกำจัด คิดเป็นร้อยละ 69 ในขณะที่เพียงร้อยละ 28 ที่นำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทน (Turner et al., 2022)

### 2.1.2.2 กากตะกอนจากกระบวนการกำจัดหมัก (Deinking Sludge)

กากตะกอนจากกระบวนการกำจัดหมักเป็นของเสียจากการแยกหมักและสีย้อมออกจากเส้นใยกระดาษรีไซเคิลด้วยกระบวนการลอย ซึ่งองค์ประกอบที่ถูกแยกออกมาเป็นเส้นใยกระดาษสั้น หมักพิมพ์ สารเติมแต่ง และสิ่งปนเปื้อน อาทิ ดินขาว แป้งทัลคัม และแคลเซียมคาร์บอเนตถึงร้อยละ 45 ถึง 65 โดยน้ำหนัก (Kloekke, 2018; Lou et al., 2012) กากตะกอนมีความชื้นสูงประมาณร้อยละ 35 ถึง 60 และค่าความร้อนรวมต่ำอยู่ที่ 6 ถึง 10 MJ/kg เนื่องจากมีปริมาณเถ้าสูง (Monte et al., 2009; Fifer Bizjak et al., 2021) เถ้าที่เหลือจากการเผาประกอบด้วยอะลูมิเนียมและแคลเซียมออกไซด์เป็นหลัก ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นสารเติมแต่งในการผลิตซีเมนต์ ในขณะที่บางโรงงานแปรรูปกากตะกอนเป็นวัตถุดิบอาหารสัตว์เพื่อเพิ่มมูลค่าและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Norgren, 2022; Ingale & Nemade, 2023)

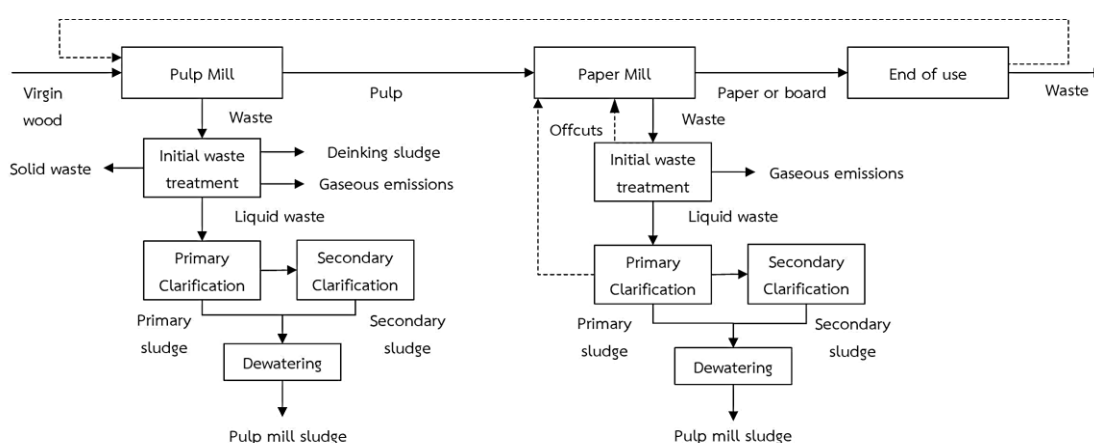
### 2.1.2.3 กากตะกอนส่วนเกินในระบบบำบัดน้ำเสีย

กากตะกอนส่วนเกินในอุตสาหกรรมกระดาษประกอบด้วยน้ำเป็นส่วนใหญ่ ทำให้กระบวนการผลิตกระดาษรีไซเคิลก่อให้เกิดกากตะกอนส่วนเกินในปริมาณประมาณ 200 ถึง 400 กิโลกรัมของกากตะกอนต่อตันกระดาษ (Turner et al., 2022) และในรูปของกากตะกอนแห้งจะอยู่ในช่วง 40 ถึง 50 กิโลกรัมต่อตันกระดาษ (Mahmood & Elliott, 2006; Jele et al., 2022)

กากตะกอนส่วนเกินในอุตสาหกรรมกระดาษแบ่งออกเป็นสองประเภทหลักคือ กากตะกอนปฐมภูมิ (Primary Sludge: PS) ที่เกิดจากการตกตะกอนขั้นต้น ประกอบด้วยเส้นใยเซลลูโลสและสารอินทรีย์ที่ตกตะกอนได้ง่าย และกากตะกอนทุติยภูมิ (Secondary Sludge: SS) ที่เกิดจากกระบวนการทางชีวภาพในระบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ มีลักษณะเป็นมวลจุลินทรีย์ที่ยากต่อการแยกน้ำออก โดยทั่วไปกากตะกอนส่วนเกินจะประกอบด้วยกากตะกอน PS ประมาณร้อยละ 70 และกากตะกอน SS ประมาณร้อยละ 30 (Turner et al., 2022) กากตะกอน PS มีความสามารถในการแยกน้ำที่ดีกว่าเนื่องจากมีอนุภาคขนาดใหญ่ ในขณะที่กากตะกอน SS มีน้ำที่จับยึดสูงทำให้แยกน้ำยากกว่า จึงมักผสมกากตะกอนทั้งสองรวมกันก่อนการบำบัดหรือการแยกน้ำ (Johansson et al., 2024) โดยแหล่งกำเนิดของกากตะกอนส่วนเกินที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรมกระดาษ แสดงดังรูปที่ 2.2

## 2.2 กากตะกอนส่วนเกินในอุตสาหกรรมกระดาษ

อุตสาหกรรมผลิตกระดาษเป็นอุตสาหกรรมที่มีปริมาณกากตะกอนส่วนเกินสูง เนื่องจากลิกโนเซลลูโลสเพียงครั้งหนึ่งเท่านั้นที่ถูกเปลี่ยนเป็นเยื่อกระดาษสำหรับใช้ในกระบวนการผลิต ส่วนที่เหลือจะกลายเป็นของเสีย (Balwaik & Raut, 2012) ทำให้กากตะกอนส่วนเกินส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ และมีความชื้นสูง ลักษณะของกากตะกอนจะแตกต่างกันไปตามกระบวนการผลิตกระดาษนั้น ๆ



รูปที่ 2.2 แหล่งกำเนิดกากตะกอนส่วนเกินที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรมกระดาษ

(Turner et al., 2022)

จากข้อมูลในตารางที่ 2.3 พบว่ากากตะกอน PS กากตะกอน SS และกากตะกอนผสม (Mixed Sludge: MS) จากอุตสาหกรรมกระดาษมีความชื้นในช่วงกว้าง โดยกากตะกอน PS มีค่าความชื้นอยู่ระหว่างร้อยละ 17.50 ถึง 85 ขณะที่กากตะกอน SS มีค่าความชื้นสูงกว่าในช่วงร้อยละ 53 ถึง 99 ค่า pH ของทั้งกากตะกอน PS และกากตะกอน SS อยู่ในช่วง 5.0 ถึง 11.0 เนื่องจากกระบวนการผลิตเยื่อและกระดาษมีการเติมสารเคลือบกระดาษ เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) ซึ่งทำให้มีความเป็นด่างอ่อน จึงจำเป็นต้องปรับค่า pH ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับระบบย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน คือ 6.8 ถึง 7.4 (Veluchamy, 2018) เพื่อประสิทธิภาพในการย่อยสลายและการผลิตก๊าซชีวภาพที่ดีขึ้น สำหรับองค์ประกอบของแข็ง พบว่า กากตะกอน PS มีค่าของแข็งทั้งหมด (Total Solids: TS) สูงถึงร้อยละ 80 และมีค่าของแข็งระเหยง่ายทั้งหมด (Total Volatile Solids: TVS) อยู่ที่ร้อยละ 57.94 ขณะที่กากตะกอน SS มีค่า TS ต่ำกว่า (ร้อยละ 1.0 ถึง 2.0) แต่มีค่า TVS สูงกว่า (ร้อยละ 65 ถึง 97) ส่วนค่าเถ้า (Ash) ในกากตะกอน PS มีค่าสูงถึงร้อยละ 54.06 ในขณะที่กากตะกอน SS มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 10 ถึง 25

ตารางที่ 2.3 ลักษณะของกากตะกอนส่วนเกินในอุตสาหกรรมกระดาษในงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พารามิเตอร์	Chakraborty et al. (2019)		Kaur et al. (2020)		Turner et al. (2022)		Assis & Chirwa (2021)	Jele et al. (2022)
	กากตะกอน PS	กากตะกอน SS	กากตะกอน MS	กากตะกอน SS	กากตะกอน PS	กากตะกอน SS	กากตะกอน PS	กากตะกอน SS
Moisture (%wt.)	20	98 - 99	52 - 60.3	68 - 99	43 - 85	53 - 99	17.50	78.77
pH	7.39	6.0 - 7.6	5.5 - 8.2	6.5 - 7.6	5.0 - 11.0	6.0 - 8.5	N/A	8.10
TCOD (mg/L)	64,000	11,000	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
TS (%wt.)	80	1.0 - 2.0	39.7 - 48	1 - 32	15 - 57	1 - 47	82.5	21.23
TVS (%TS)	57.94	65 - 97	85 - 90	65 - 97	85 - 90	80 - 90	63.31	75.31
Ash (%TS)	54.06	3 - 35	10 - 15	10 - 20	10 - 15	10 - 20	31.51	24.69
N (%TS)	N/A	3.3 - 7.7	0.045 - 0.028	3.3 - 7.7	0.45 - 2.8 g/L	11 - 77 g/L	N/A	0.57 (%wt.)
P (%TS)	N/A	0.5 - 2.8	0.01 - 0.06	0.5 - 2.8	0.1 - 6 g/L	2.5 - 28 g/L	N/A	N/A
C/N ratio	N/A	N/A	32:1 - 930:1	9:1 - 81:1	111:1 - 943:1	8:1 - 50:1	N/A	74.56:1
Lignin (%TS)	5.68	N/A	2.2 - 20.92 (%wt.)	16.85 - 58.0 (%wt.)	N/A	N/A	N/A	33.5
Cellulose (%TS)	32.49	N/A	23.6 - 60.8 (%wt.)	2.0 - 28 (%wt.)	N/A	N/A	N/A	N/A
Hemicellulose (%TS)	6.53	N/A	4.9 - 14.2 (%wt.)	12.0 - 15.0 (%wt.)	N/A	N/A	N/A	N/A

หมายเหตุ N/A หมายถึงไม่พบข้อมูลในงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และ %wt. หมายถึง ร้อยละโดยน้ำหนักเปียก

สำหรับองค์ประกอบอินทรีย์ พบว่า กากตะกอน PS ประกอบด้วยลิกนินในช่วงร้อยละ 2.2 ถึง 58.0 เซลลูโลสร้อยละ 2.0 ถึง 60.8 และเฮมิเซลลูโลสร้อยละ 4.9 ถึง 15.0 ส่วนกากตะกอน SS มีสารอาหารหลักสูง โดยเฉพาะไนโตรเจน (N) อยู่ในช่วงร้อยละ 0.57 ถึง 7.7 ฟอสฟอรัส (P) ร้อยละ 0.5 ถึง 2.8 และกำมะถัน (S) ร้อยละ 0.61 ถึง 4.18 นอกจากนี้ ค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) ของกากตะกอน PS อยู่ในช่วง 32 ต่อ 1 ถึง 943 ต่อ 1 ซึ่งสูงเกินช่วงที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน (20 ต่อ 1 ถึง 30 ต่อ 1; Veluchamy, 2018) อย่างมีนัยสำคัญ เมื่อค่า C/N ratio สูงเกินไป ไนโตรเจนจะถูกจุลินทรีย์สร้างมีเทน (Methanogenic bacteria) ใช้ไปอย่างรวดเร็วในการสังเคราะห์โปรตีนของเซลล์ ส่งผลให้จุลินทรีย์ไม่สามารถย่อยสลายคาร์บอนที่เหลือในวัตถุดิบได้เต็มที่ และทำให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพลดต่ำลง ขณะที่กากตะกอน SS มีค่า C/N ratio อยู่ระหว่าง 8 ต่อ 1 ถึง 86.21 ต่อ 1 การผสมกากตะกอนทั้งสองประเภทจึงเป็นแนวทางที่สามารถปรับสมดุลธาตุอาหาร โดยจากการศึกษาของ Lopes et al. (2018) พบว่าสามารถลดค่า C/N ratio ลงเหลือประมาณ 31 ต่อ 1 ซึ่งเหมาะสมต่อการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนและการผลิตก๊าซชีวภาพอย่างมีประสิทธิภาพ

### 2.3 ความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของกากตะกอน

สัดส่วนสารอินทรีย์สามารถแบ่งได้ในรูปของค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมี (Chemical Oxygen Demand: COD) ซึ่งใช้เพื่ออธิบายลักษณะการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบบำบัดแบบชีวภาพ โดยค่าซีโอดีนี้สามารถนำไปใช้ประเมินสมบัติความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของตัวอย่างที่ทำการศึกษา และทำนายประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ได้เบื้องต้น เพื่อใช้ในการเลือกและออกแบบระบบบำบัด รวมทั้งใช้ทำนายอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพในระบบย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนได้อย่างเหมาะสม โดยสามารถวิเคราะห์ได้ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งแบ่ง COD ทั้งหมด (Total COD: TCOD) ออกเป็นสองส่วนหลัก ได้แก่ (1) ส่วนที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ (Biodegradable COD: BCOD) และ (2) ส่วนที่ย่อยสลายทางชีวภาพไม่ได้ (Unbiodegradable COD: UCOD)

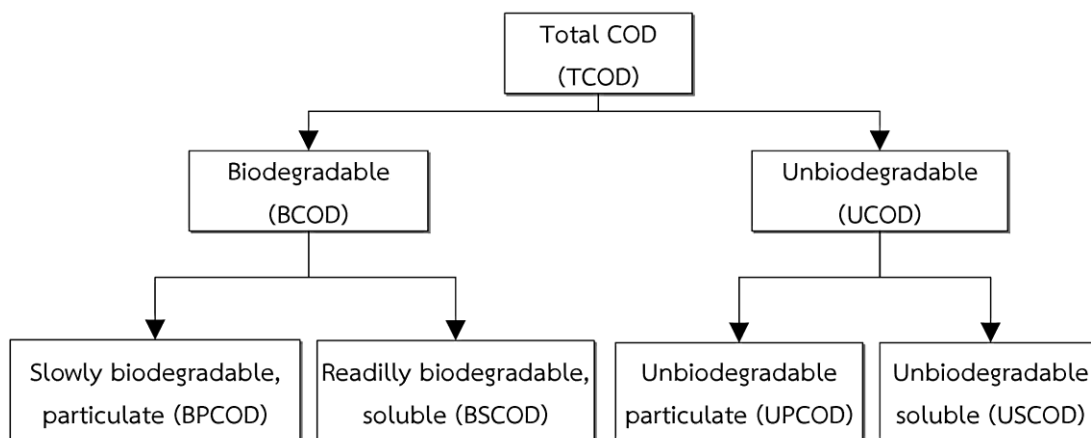
(1) Biodegradable COD (BCOD) แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ คือ ซีโอดีที่ย่อยสลายได้อย่างรวดเร็วหรือส่วนที่ละลายน้ำ (Biodegradable Soluble COD: BSCOD) และซีโอดีที่ย่อยสลายได้ช้าหรือส่วนที่ไม่ละลายน้ำ (Biodegradable Particulate COD: BPCOD)

โดยสัดส่วนที่ย่อยสลายได้อย่างรวดเร็วนี้ คือสัดส่วนสารอินทรีย์ในรูป COD ที่สามารถย่อยสลายได้ง่ายสำหรับจุลินทรีย์แบบเฮเทอโรโทรฟิก โดยสัดส่วนดังกล่าวเกิดขึ้นระหว่างการไฮโดรไลซิสของสัดส่วนอนุภาคสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ช้า และเป็นแหล่งพลังงานสำคัญสำหรับกระบวนการย่อยสลาย ซึ่งสารอินทรีย์ในสัดส่วนนี้สามารถดูดซึมเข้าสู่เซลล์จุลินทรีย์ได้ง่าย ในระบบ

แบบใช้ออกซิเจน สัดส่วนที่ย่อยสลายได้เร็วจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนละลายน้ำ โดยส่วนหนึ่ง จะกลายเป็นแหล่งพลังงานสำหรับการเจริญเติบโตของเซลล์จุลินทรีย์และผลิตภัณฑ์คาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้ปริมาณ COD ทั้งหมดลดลง อีกส่วนหนึ่งจะถูกใช้ในการสร้างมวลชีวภาพหรือเซลล์ใหม่ ขณะที่ ในระบบแบบไม่ใช้ออกซิเจน สัดส่วนที่ย่อยสลายได้เร็วนี้เกิดจากการไฮโดรไลซิสสารอินทรีย์ ที่ย่อยสลายได้ช้าเช่นเดียวกันกับระบบใช้ออกซิเจน และทำหน้าที่เป็นสารตั้งต้นสำหรับการผลิตกรด-อินทรีย์ระเหยง่ายโดยแบคทีเรียสร้างกรดในขั้นตอนที่สอง

สำหรับสัดส่วนสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ช้า นั้น จะเป็นสารอินทรีย์ขนาดโมเลกุลใหญ่ สารคอลลอยด์ และอนุภาคสารอินทรีย์ที่ต้องผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิสมาก่อน จึงจะสามารถย่อยสลายได้ โดยสัดส่วนนี้จะถูกย่อยสลายให้กลายเป็นสัดส่วนที่ย่อยสลายได้เร็ว จากนั้นจึงถูกเผาผลาญโดยตรงผ่านกระบวนการเผาผลาญในเซลล์ และในขั้นตอนนี้จะไม่มีการย่อยสลาย สารอินทรีย์เพิ่มเติม ทำให้ค่าซีโอดีมีค่าคงที่

(2) Unbiodegradable COD (UCOD) แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ซีโอดีที่ย่อยสลายทางชีวภาพไม่ได้ในรูปแบบที่ละลายน้ำ (Unbiodegradable Soluble COD: USCOD) และซีโอดีที่ย่อยสลายไม่ได้ในรูปแบบที่ไม่ละลายน้ำ (Unbiodegradable Particulate COD: UPCOD)



รูปที่ 2.3 สัดส่วนซีโอดีของกากตะกอน

(Orhon & Cokgor, 1997)

โดยสัดส่วนสารอินทรีย์ละลายน้ำที่ไม่สามารถย่อยสลายด้วยระบบบำบัดน้ำเสียทั่วไปนี้ ถือเป็นสารที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการย่อยสลาย และสามารถสะท้อนสัดส่วนสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ทางอ้อม โดยสารอินทรีย์ชนิดนี้เกิดขึ้นจากการไฮโดรไลซิสของอนุภาคสารอินทรีย์หรือสัดส่วนสารอินทรีย์ละลายน้ำที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ ในขณะที่สัดส่วนอนุภาคสารอินทรีย์ที่ไม่สามารถ

ย่อยสลายหรือย่อยสลายได้ช้ามากขึ้น เกิดจากการสลายตัวและแตกตัวของเซลล์ รวมถึงการย่อยสลายมวลชีวภาพ ส่งผลให้ปริมาณ COD ทั้งหมดลดลง สัดส่วนนี้มักมีค่าค่อนข้างสูงในกากตะกอนที่มีระยะเวลาเก็บกักนาน ดังนั้น การประเมิน COD Fractions จะมีสัดส่วนที่แตกต่างกันในการทดลองที่ช่วงอายุตะกอน (Sludge Retention Time: SRT) แตกต่างกัน โดยมีงานวิจัยหลายชิ้นที่ศึกษาสัดส่วนซีโอดี (COD Fractions) จากกากตะกอน แสดงดังตารางที่ 2.4

**ตารางที่ 2.4** ความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของกากตะกอนส่วนเกินในงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ประเภทกากตะกอน	COD Fractions (%)				อ้างอิง
	BPCOD	BSCOD	UPCOD	USCOD	
กากตะกอน PS จากน้ำเสียชุมชน	12.17 - 14.25	13.47 - 43.35	41.71 - 73.43	0.92 - 2.05	Cokgor et al. (2006)
กากตะกอนน้ำเสียชุมชน	35	47	13	5	Ciaciuch et al. (2017)

เมื่อพิจารณาผลการศึกษาเปรียบเทียบของ Cokgor et al. (2006) และ Ciaciuch et al. (2017) พบว่าข้อมูล COD Fractions มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญตามวิธีการและเงื่อนไขที่ใช้ โดย Cokgor et al. (2006) รายงานว่าการหมักกากตะกอน PS ภายใต้สภาวะที่ไม่ควบคุมส่งผลให้ VFA เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ แต่ COD Fractions หลังการหมักยังคงมีสัดส่วนที่ย่อยสลายได้ช้า (BPCOD) สูงกว่า BSCOD สะท้อนให้เห็นว่าการย่อยสลายกากตะกอนเชิงเดี่ยวไม่สามารถเปลี่ยน COD ส่วนใหญ่ไปอยู่ในรูปที่จุลินทรีย์ใช้ได้ทันที ขณะที่การศึกษาของ Ciaciuch et al. (2017) พบว่าการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนรวมกับการใช้ความร้อนมีผลต่อการเปลี่ยนแปลง COD Fractions อย่างมีนัยสำคัญ โดยทำให้ BSCOD เพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 43 และ BPCOD ลดลงร้อยละ 28 แสดงให้เห็นว่าการใช้ความร้อนช่วยเร่งการสลายโครงสร้างสารอินทรีย์เชิงซ้อน เช่น คอลลอยด์และสารแขวนลอย ให้กลายเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำได้ง่ายและถูกจุลินทรีย์นำไปใช้ได้ทันที ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีที่ว่า การปรับปรุงกระบวนการย่อยสลายด้วยการปรับสภาพเบื้องต้น (pre-treatment) สามารถเพิ่มปริมาณ readily biodegradable COD และส่งผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าการหมักแบบธรรมดา

## 2.4 พืชและสารยับยั้งการย่อยสลายทางชีวภาพในกากตะกอน

สารบางชนิดหากมีความเข้มข้นสูงเกินไปอาจเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ในระบบย่อยสลายทางชีวภาพได้ โดยระดับของความเป็นพิษนั้นขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสารพิษที่ปนเปื้อนอยู่ในระบบ ซึ่งสามารถจำแนกออกเป็นกลุ่มต่าง ๆ ได้ดังนี้

### 2.4.1 อีออนประจุบวกโลหะเบา (Light Metal Cation)

อีออนประจุบวกของโลหะเบา เช่น โซเดียม ( $\text{Na}^+$ ), โพแทสเซียม ( $\text{K}^+$ ), แคลเซียม ( $\text{Ca}^{2+}$ ) และแมงกานีส ( $\text{Mn}^{2+}$ ) อาจเกิดขึ้นได้จากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายในระบบ หรือจากการเติมสารเคมีเพื่อปรับค่า pH ซึ่งอีออนเหล่านี้สามารถส่งผลเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ในระบบย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนได้ โดยความเป็นพิษดังกล่าวมีลักษณะเป็นปฏิกิริยาที่ซับซ้อน และจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของอีออนประจุบวกของโลหะเบาแต่ละชนิด แสดงดังตารางที่ 2.5

ทั้งนี้ ความเป็นพิษของอีออนประจุบวกของโลหะเบาแต่ละชนิดมีระดับความรุนแรงไม่เท่ากัน โดยอีออนที่มีวาเลนซีเท่ากับ 1 เช่น  $\text{Na}^+$  และ  $\text{K}^+$  จะมีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์น้อยกว่าอีออนที่มีวาเลนซีเท่ากับ 2 เช่น  $\text{Ca}^{2+}$  และ  $\text{Mg}^{2+}$  ซึ่งมีความเป็นพิษมากกว่าถึง 10 เท่า ดังนั้น ความเป็นพิษของอีออนประจุบวกของโลหะเบาจะเพิ่มขึ้นตามค่าวาเลนซีที่สูงขึ้น

ตารางที่ 2.5 ความเข้มข้นที่กระตุ้นและยับยั้งของอีออนประจุบวกโลหะเบา

อีออนประจุบวก โลหะเบา	ความเข้มข้น (mg/kg dry weight)		
	กระตุ้น	เริ่มยับยั้ง	ยับยั้งอย่างรุนแรง
$\text{Ca}^{2+}$	200	2,500-4,500	8,000
$\text{Mg}^{2+}$	75-150	1,000-1,500	3,000
$\text{K}^+$	200-400	2,500-4,500	12,000
$\text{Na}^+$	230-350	3,000-5,500	8,000

หมายเหตุ อ้างอิงจาก Veluchamy (2018)

ความเป็นพิษของอีออนประจุบวกของโลหะเบาสามารถลดลงได้ภายใต้เงื่อนไขบางประการ กล่าวคือ ในกรณีที่มีอีออนประจุบวกของโลหะเบาชนิดหนึ่งซึ่งมีความเป็นพิษต่อแบคทีเรียไม่ใช้ออกซิเจน หากมีอีออนประจุบวกของโลหะเบาอีกชนิดหนึ่งอยู่ร่วมด้วย อาจส่งผลให้ความเป็นพิษของอีออนชนิดแรกลดลง ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Antagonism อย่างไรก็ตาม ในทางตรงกันข้าม อีออนประจุบวกของโลหะเบาบางชนิดอาจเสริมฤทธิ์กันและส่งผลให้ความเป็นพิษเพิ่มขึ้นเมื่ออยู่ร่วมกัน ซึ่งเรียกว่า Synergism แสดงดังตารางที่ 2.6 และ 2.7

**ตารางที่ 2.6** อีออนประจุบวกโลหะเบาเพิ่มความเป็นพิษ (Synergism) และอีออนประจุบวกโลหะเบาลดความเป็นพิษ (Antagginism)

อีออนประจุบวกโลหะเบา	เพิ่มความเป็นพิษ (Synergism)	ลดความเป็นพิษ (Antagginism)
แอมโมเนีย (N)	Ca, Mg, K	Na
Ca	แอมโมเนีย (N) , Mg	K, Na
Mg	แอมโมเนีย (N) , Mg	K, Na
K	-	K, Na
Na	แอมโมเนีย (N), Ca, Mg	K

หมายเหตุ อ้างอิงจาก กนิษฐา วิมลรัตน์ (2552)

**ตารางที่ 2.7** อีออนประจุบวกโลหะเบาในกากตะกอนจากอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ

อีออนประจุบวกโลหะเบา	ความเข้มข้น (mg/kg dry weight)		อ้างอิง
	กากตะกอน PS	กากตะกอน SS	
Ca	31,560-38,000	16,900-25,600	Kaur et al. (2020)
Mg	540	3,830	Monte et al. (2009)
K	200-455	900-1,820	Kaur et al. (2020)
Na	500-2,938	6,000-10,800	Kaur et al. (2020)

ทั้งนี้ จากข้อมูลข้างต้นพบว่าอีออนประจุบวกของโลหะเบาในกากตะกอนที่ได้จากอุตสาหกรรมผลิตกระดาษมีความหลากหลาย โดยเฉพาะในกากตะกอน SS ซึ่งมีปริมาณสารอาหารสูงกว่ากากตะกอน PS อย่างมีนัยสำคัญ ความแตกต่างนี้เกิดจากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษทางเคมีที่มีการเติมสารเคมีต่าง ๆ เช่น NaOH, Na<sub>2</sub>S, Ca(HSO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> และ Mg(HSO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> เพื่อปรับปรุงคุณภาพของเยื่อ ส่งผลให้เกิดการสะสมของอีออนประจุบวกของโลหะเบาในกากตะกอนในปริมาณสูง

#### 2.4.2 โลหะหนัก (Heavy Metal)

โลหะหนัก ได้แก่ เหล็ก ดีบุก ตะกั่ว สังกะสี ทองแดง แคดเมียม โคบอลต์ โครเมียม และนิกเกิล เป็นต้น ซึ่งอีออนของโลหะหนักเหล่านี้สามารถก่อให้เกิดพิษต่อจุลินทรีย์ โดยระดับความเป็นพิษของโลหะหนักขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลายน้ำของเกลือโลหะหนักชนิดนั้น ๆ ซึ่งปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการละลายของเกลือโลหะหนักคือปริมาณของไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H<sub>2</sub>S) ที่มีอยู่ในน้ำเสีย เนื่องจากไฮโดรเจนซัลไฟด์จะทำปฏิกิริยากับโลหะหนักเกิดเป็นเกลือซัลไฟด์ที่ไม่ละลายน้ำ และสามารถตกตะกอนได้ อย่างไรก็ตาม หากน้ำเสียนี้อมีปริมาณซัลไฟด์ไม่เพียงพอ ก็จะไม่สามารทำให้โลหะหนักตกตะกอนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจำเป็นต้องมีการเติมเกลือซัลไฟด์หรือเกลือซัลเฟต

เพิ่มเติม โดยเกลือทั้งสองชนิดนี้สามารถถูกรีดิวซ์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน (Anaerobic condition) ให้กลายเป็นซัลไฟด์ และทำให้สามารถลดความเป็นพิษของโลหะหนักในระบบได้ (อาริยา วิรัชวรกุล, 2546)

จากตารางที่ 2.8 แสดงความเข้มข้นของโลหะหนักที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน และตารางที่ 2.9 แสดงค่าความเข้มข้นของโลหะหนักในกากตะกอนจากอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ พบว่า โดยส่วนใหญ่โลหะหนักมีอยู่ในระดับความเข้มข้นที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน ยกเว้น Fe ซึ่งพบว่ามีค่าความเข้มข้นสูงกว่าช่วงที่เหมาะสมสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ อย่างไรก็ตาม Fe ที่มีอยู่ในปริมาณสูงยังสามารถส่งผลดีต่อการเพิ่มผลผลิตก๊าซชีวภาพได้ เนื่องจากสามารถช่วยในการตกตะกอนของเหล็กซัลไฟด์ ซึ่งเป็นผลให้ลดการเกิด  $H_2S$  ในระบบได้ (Wood et al., 2009)

**ตารางที่ 2.8** ความเข้มข้นของโลหะหนักที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน

โลหะหนัก	ความเข้มข้น (mg/kg dry weight)
Co	150
Cu	75
Fe	1,800
Ni	100
Zn	60

หมายเหตุ อ้างอิงจาก Veluchamy (2018)

**ตารางที่ 2.9** โลหะหนักในกากตะกอนจากอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ

โลหะหนัก	ความเข้มข้น (mg/kg dry weight)		อ้างอิง
	กากตะกอน PS	กากตะกอน SS	
Co	1.0-1.5	1.0-3.0	Kaur et al. (2020)
Cu	15-238	12-71	Kaur et al. (2020)
Fe	1,930	6,280	Monte et al. (2009)
Ni	6-89	8-38	Kaur et al. (2020)
Zn	26-141	30-475	Kaur et al. (2020)

ทั้งนี้ การศึกษาของ Kaur et al. (2020) พบว่าไอออน Ca และ Mg ในกากตะกอน PS (31,560 ถึง 38,000 mg/kg และ 540 mg/kg ตามลำดับ) อยู่ในระดับสูงเกินกว่าช่วงที่ส่งเสริมการทำงานร่วมกัน (synergism) ระหว่างโลหะเบาเพื่อสนับสนุนการสลายตัวของจุลินทรีย์ไม่ใช้ออกซิเจน ตามทฤษฎีที่แนะนำว่า Ca, Mg และ K ควรมีความเข้มข้นสมดุลเพื่อเสริมฤทธิ์กัน ในขณะที่

Na ซึ่งมีค่าถึง 2,938 mg/kg จัดเป็นตัวยับยั้ง (antagonism) กระบวนการนี้ (กนิษฐา วิมลรัตน์, 2552) นอกจากนี้ Monte et al. (2009) รายงานว่า Fe ในกากตะกอน PS มีความเข้มข้น 1,930 mg/kg ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน ( $Fe \leq 1,800$  mg/kg) ทำให้เสี่ยงต่อการยับยั้งการสร้างมีเทน ยืนยันว่าการควบคุมระดับโลหะหนักให้ไม่เกิน  $Co \leq 150$ ,  $Cu \leq 75$ ,  $Fe \leq 1,800$ ,  $Ni \leq 100$ ,  $Zn \leq 60$  mg/kg เป็นสิ่งจำเป็นต่อความเสถียรและประสิทธิภาพของระบบย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน

## 2.5 เทคโนโลยีในการเพิ่มมูลค่าจากกากตะกอนส่วนเกินในอุตสาหกรรมกระดาษ

เทคโนโลยีในการเพิ่มมูลค่าจากกากตะกอนส่วนเกินในอุตสาหกรรมกระดาษ โดยการนำกลับมาใช้ประโยชน์เป็นพลังงานหมุนเวียน มีหลายวิธี ซึ่งจะกล่าวถึงกระบวนการทางชีวภาพ คือ การผลิตก๊าซชีวภาพ (Biogas) และกระบวนการทางความร้อน คือ การผลิตเชื้อเพลิงขยะ (Refuse-derived Fuel: RDF) โดยแต่ละวิธีมีรายละเอียด ดังนี้

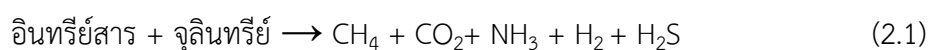
### 2.5.1 การผลิตก๊าซชีวภาพ (Biogas)

การผลิตก๊าซชีวภาพโดยใช้เทคโนโลยีการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Digestion: AD) เป็นกระบวนการบำบัดของเสียที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีข้อดีหลายประการทั้งด้านสิ่งแวดล้อม การจัดการของเสีย และการผลิตพลังงาน งานวิจัยและทฤษฎีสอดคล้องกันว่ากระบวนการ AD สามารถลดปริมาณและความเป็นอันตรายของขยะมูลฝอยอินทรีย์ พร้อมทั้งลดกลิ่นเหม็น ปัญหาสัตว์พาหะ และความจำเป็นในการใช้พื้นที่ฝังกลบ (กนิษฐา วิมลรัตน์, 2552) อีกทั้งยังสามารถผลิตก๊าซชีวภาพที่เป็นพลังงานทดแทนในรูปของมีเทน ซึ่งมีศักยภาพในการทดแทนพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล และเหมาะสมต่อการใช้กับของเสียเปียกที่ไม่สามารถเผาได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Jameel et al., 2024) อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดของเทคโนโลยีนี้ได้แก่ การเริ่มต้นระบบที่ใช้เวลานาน ความเปราะบางของสมดุลจุลินทรีย์ในระบบ และการเกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ซึ่งก่อกลิ่นรบกวนและมีฤทธิ์กัดกร่อนอุปกรณ์ ทั้งนี้ทฤษฎีและแนวทางการวิจัยชี้ว่าปัญหาดังกล่าวสามารถบรรเทาได้ด้วยการควบคุมสภาวะการเดินระบบอย่างเหมาะสม การคัดเลือกหรือเสริมจุลินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพ และการประยุกต์ใช้การย่อยสลายร่วม (co-digestion) ของสารตั้งต้นหลายชนิด เพื่อปรับสมดุลธาตุอาหารและเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากระบวนการ AD แม้มีข้อจำกัดเชิงปฏิบัติ แต่ก็ยังเป็นเทคโนโลยีที่มีศักยภาพสูงสำหรับการจัดการของเสียและการผลิตพลังงานหมุนเวียนในระยะยาว

หลักการการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน (AD) เป็นกระบวนการเปลี่ยนสารอินทรีย์ในกากตะกอนให้กลายเป็นก๊าซชีวภาพ ได้แก่ มีเทน ( $CH_4$ ) คาร์บอนไดออกไซด์

(CO<sub>2</sub>) ไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) และสารอื่น ๆ ภายใต้สภาวะปราศจากออกซิเจน (สมการ 2.1) กระบวนการนี้ประกอบด้วย 4 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) อะซิโดเจเนซิส (Acidogenesis) อะซิโตเจเนซิส (Acetogenesis) และเมทาโนเจเนซิส (Methanogenesis) โดยแต่ละขั้นตอนมีบทบาทเฉพาะในการสลายสารอินทรีย์และผลิตก๊าซชีวภาพที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้

ในขั้นตอนไฮโดรไลซิส สารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ เช่น โปรตีน แป้ง และไขมัน ถูกย่อยสลายเป็นโมเลกุลเชิงเดี่ยว เช่น กรดอะมิโน น้ำตาลกลูโคส และกรดไขมัน โดยใช้เอนไซม์นอกเซลล์จากไฮโดรไลติกแบคทีเรีย (Hydrolytic Bacteria) ต่อมาขั้นตอนอะซิโดเจเนซิส แบคทีเรียอะซิโดเจนิค (Acidogenic Bacteria) จะหมักสารอินทรีย์เหล่านี้ให้กลายเป็นสารตัวกลาง เช่น กรดอะซิติก กรดไพรูวิก กรดบิวทิริก รวมถึงก๊าซไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งกรดอะซิติกและก๊าซไฮโดรเจนจะเป็นสารตั้งต้นสำหรับการผลิตมีเทน (Hülsemann et al., 2020) ขั้นตอนอะซิโดเจเนซิส แบคทีเรียอะซิโดเจนิคและ H<sub>2</sub>-producing Bacteria จะเปลี่ยนกรดอินทรีย์ระเหยง่ายและแอลกอฮอล์ให้กลายเป็นกรดอะซิติก ก๊าซไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ โดยต้องอาศัยสภาวะความดันไฮโดรเจนต่ำ ซึ่งมีความสัมพันธ์แบบพึ่งพาอาศัยกับเมทาโนเจนเพื่อควบคุมความดันไฮโดรเจนและป้องกันการสะสมของกรดอินทรีย์ขนาดเล็กที่อาจยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียในขั้นตอนถัดไป



ขั้นตอนสุดท้ายคือ เมทาโนเจเนซิส ซึ่งเป็นกระบวนการผลิตก๊าซมีเทนโดยเมทาโนเจนที่แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มย่อย ได้แก่ ไฮโดรเจนโทรฟิกเมทาโนเจน (Hydrogenotrophic Methanogens) ที่เปลี่ยน H<sub>2</sub> และ CO<sub>2</sub> เป็น CH<sub>4</sub> ตามสมการ 2.2 และอะซิโตโทรฟิกเมทาโนเจน (Acetotrophic Methanogens) ที่เปลี่ยนกรดอะซิติกเป็น CH<sub>4</sub> และ CO<sub>2</sub> ตามสมการ 2.3 เมทาโนเจนกลุ่มอะซิโตโทรฟิกนี้มีอัตราการเจริญเติบโตช้ากว่ากลุ่มที่ใช้ H<sub>2</sub> แต่มีบทบาทสำคัญต่อการผลิตก๊าซมีเทน ซึ่งในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพภายใต้สภาวะเหมาะสม จะพบว่าก๊าซมีเทนประมาณร้อยละ 66.67 มาจากการเปลี่ยนกรดอะซิติก และอีกร้อยละ 33.33 มาจากการรีดักชันของ CO<sub>2</sub> ด้วย H<sub>2</sub> โดยสภาวะการทำงานที่เหมาะสมสามารถสรุปได้ตามตาราง 2.10

**ตารางที่ 2.10** สภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

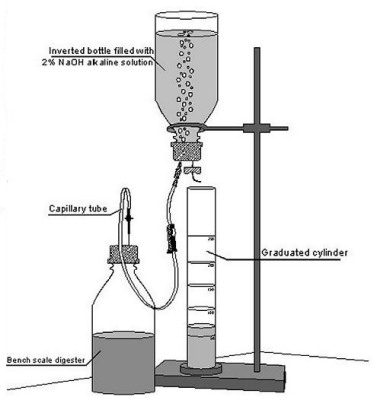
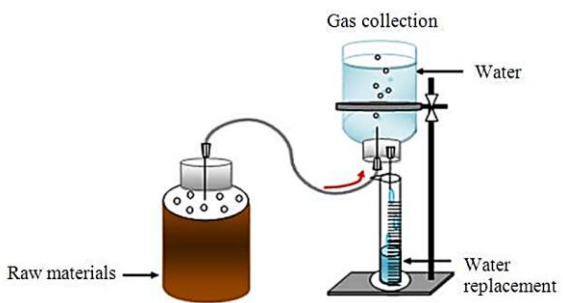
พารามิเตอร์	ค่าที่เหมาะสม
Temperature	Psychrophilic (5 - 15 °C), Meso philic (35 - 40 °C), Thermo philic (50 - 65 °C)
pH	6.8 - 7.4
VFA	>2,000 mg/L (Acetic Acid) >6,000 - 8,000 (Total Volatile Acids)
Alkalinity	1,000 - 5,000 mg CaCO <sub>3</sub> /L
C/N ratio	20 - 30
Sulfide	< 250 mg H <sub>2</sub> S/L (pH 6.4 - 7.2), 90 mg H <sub>2</sub> S/L (pH 7.8 - 8.0) > 100 mg Soluble/L
Cu	150 mg Cu/kg dry solid
Co	75 mg Co/kg dry solid
Cd	150 mg/L
Fe	1,800 mg Fe/kg dry solid
Cr	200 - 250 mg/L
Ni	100 mg Ni/kg dry solid
Zn	60 mg Zn/kg dry solid
TKN	1,500 - 3,000 mg/L (pH >7.6), 600 - 800 mg/L (free ammonia)

หมายเหตุ อ้างอิงจาก Veluchamy (2018)

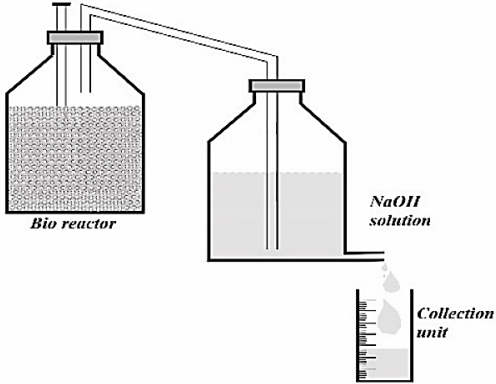
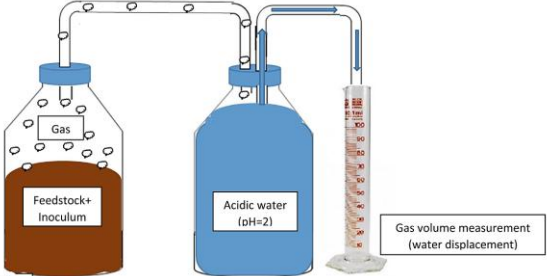
### 2.5.1.1 รูปแบบชุดทดลองศักยภาพการเกิดก๊าซมีเทนทางชีวเคมี (Biochemical Methane Potential Test: BMP Test)

การทดสอบ BMP Test ดำเนินการในการทดลองแบบกะ (Batch Reactor) และในระดับห้องปฏิบัติการ โดยวัดปริมาณก๊าซชีวภาพหรือไบโอมีเทนสูงสุดที่ผลิตได้ต่อกรัมของของแข็งระเหยง่ายทั้งหมด (TVS) ที่มีอยู่ในสารอินทรีย์ที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งรูปแบบชุดทดลองที่นิยมศึกษาในปัจจุบัน ดังตารางที่ 2.11 โดยการศึกษา BMP Test ในปัจจุบันมีการทดลองที่เทียบเท่ากับมาตรฐาน ISO 11734:1995 ที่มีการกำหนดสภาวะควบคุมของการทดลองในการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนของกากตะกอน โดยกำหนดค่า TS ในระบบอยู่ในช่วง 1 ถึง 3 g/L ทดลองในภาชนะปิดที่ควบคุมอุณหภูมิ  $35 \pm 2$  °C โดยมีค่า pH เริ่มต้น  $7 \pm 2.0$  และมีระยะเวลาในการทดลองอยู่ในช่วง 25 ถึง 30 วัน สำหรับการศึกษาน้ำสารตั้งต้นที่ย่อยสลายได้ง่าย และอาจสูงถึง 60 วัน ในการย่อยสลายสารตั้งต้นที่ย่อยสลายได้ยาก เพื่อให้ได้การย่อยสลายสูงสุด (Ultimate Biodegradability)


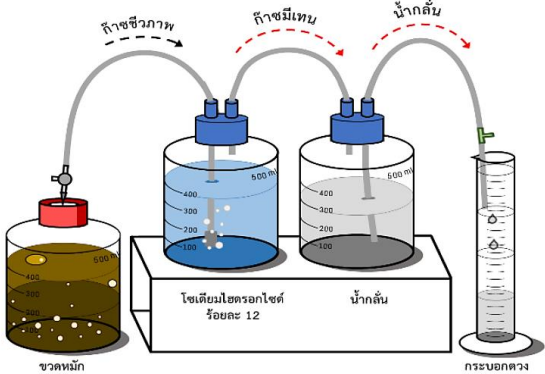
ตารางที่ 2.11 รูปแบบชุดทดลอง BMP Test

ชุดทดลอง BMP Test	รายละเอียด	อ้างอิง
	<p>ทดลองในขวดแก้ว ขนาด 1000 มิลลิลิตร ใส่หัวเชื้อและสารตั้งต้นที่เป็นขยะมูลฝอยชุ่มชื้น ในอัตราส่วน 2 ต่อ 1 เติมน้ำจนได้ปริมาตรรวม 500 มิลลิลิตร และเติม <math>\text{Na}_2\text{CO}_3</math> ประมาณ 0.10 ถึง 0.60 กรัม เพื่อป้องกันค่า pH ลดลงอย่างรวดเร็ว ขวดแต่ละขวดถูกปิดด้วยแผ่นซิลิโคนหนา 5 มิลลิเมตร ยึดแน่นด้วยฝาเกลียวพลาสติกที่เจาะตรงกลาง ขวดถูกเขย่าเป็นเวลา 30 นาที ด้วยความเร็ว 80 รอบต่อนาที และแช่ในอ่างน้ำร้อนครึ่งหนึ่งของความสูงขวดที่อุณหภูมิ <math>35 \pm 1</math> °C วันละครั้ง ขวดเชื่อมต่อกับขวดเก็บก๊าซขนาด 1,000 มิลลิลิตร ซึ่งบรรจุสารละลายอัลคาไลน์ 2% และปิดผนึกเพื่อวัดปริมาณก๊าซมีเทน เป็นระยะเวลา 60 วัน</p>	<p>อ้างอิง Esposito et al. (2011)</p>
	<p>ทดลองในขวดแก้วขนาด 200 มิลลิลิตร โดยบรรจุสารตั้งต้นเป็นกากตะกอนปาล์มและหัวเชื้อ ไล่ออกซิเจนด้วยก๊าซไนโตรเจน 2 นาที ก่อนปิดผนึก ขวดถูกเขย่าบนเครื่อง orbital shaker ที่ความเร็ว 180 รอบต่อนาที และบ่มที่อุณหภูมิ <math>38 \pm 1</math> °C เป็นระยะเวลา 60 วันจนกระทั่ง ตรวจพบการผลิตก๊าซชีวภาพน้อยกว่า 5%</p>	<p>อ้างอิง Kaosol &amp; Sohgrathok (2012)</p>

ตารางที่ 2.11 รูปแบบชุดทดลอง BMP Test (ต่อ)

ชุดทดลอง BMP Test	รายละเอียด	อ้างอิง
	<p>ทดลองในขวดแก้วขนาด 1,000 มิลลิลิตร ใส่หัวเชื้อและกากตะกอนจากโรงงานกระดาษ ในอัตราส่วน F/M ต่าง ๆ เติมน้ำจนได้ปริมาตรเท่ากันทุกขวด ไล่ออกซิเจนด้วยก๊าซไนโตรเจน ปิดจุกยางสนิท วัดปริมาณมีเทนรายวันโดยวิธีการแทนที่น้ำ ใช้สารละลาย NaOH 1.5 N เป็นถังดูดซับ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ และบ่มที่อุณหภูมิ 30-38 °C เป็นระยะเวลา 45 วัน</p>	<p>อ้างอิง Veluchamy (2018)</p>
	<p>ทดลองในขวดแก้วขนาด 500 มิลลิลิตร ซึ่งมีจุกปิดสนิทและวาล์วควบคุมก๊าซ โดยกำหนด ปริมาณการทำงานของขวด 300 มิลลิลิตร และเวเนพื้นที่เก็บก๊าซ 200 มิลลิลิตร สารตั้งต้นเป็น กากตะกอนจากอุตสาหกรรมสิ่งทอถูกเติมในอัตราส่วนต่อหัวเชื้อ เท่ากับ 1 ต่อ 3 ตามค่า VS ของ สารตั้งต้น ก่อนเริ่มการทดลอง ทำการไล่ออกซิเจนด้วยก๊าซไนโตรเจนเป็นเวลา 5 นาที จากนั้น ปิดขวดและบ่มที่อุณหภูมิ 35 ± 2 °C เป็นเวลา 30 วัน</p>	<p>อ้างอิง Kumar et al. (2020b)</p>

ตารางที่ 2.11 รูปแบบชุดทดลอง BMP Test (ต่อ)

ชุดทดลอง BMP Test	รายละเอียด	อ้างอิง
	<p>ทดลองในขวดแก้ว ขนาด 1,000 มิลลิลิตร ที่มีจุกปิดสนิทและเชื่อมต่อกับกระบอกตวงจุ่มในน้ำ เพื่อวัดปริมาณก๊าซ กำหนดปริมาตรการทำงานของขวด 800 มิลลิลิตร และเว้นพื้นที่เก็บก๊าซ 200 มิลลิลิตร ตัวอย่างประกอบด้วย กากตะกอน SS 0.3 ลิตร และ น้ำเสีย 0.5 ลิตร ไล่ออกซิเจนด้วยก๊าซไนโตรเจน 1 นาที ก่อนปิดขวดและบ่มในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 40 °C เป็นเวลา 10 วัน</p>	<p>อ้างอิง Amo-Duodu et al. (2021)</p>
	<p>ทดลองในขวดแก้วขนาด 500 มิลลิลิตร โดยบรรจุสารละลายปริมาตร 400 มิลลิลิตร และเติมหัวเชื้อจุลินทรีย์ในอัตราส่วน 2:1 ตามน้ำหนักของค่า TVS ของสารตั้งต้นที่เป็นเศษอาหารและบรรจุภัณฑ์อาหารที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ไล่ออกซิเจนด้วยก๊าซไนโตรเจนประมาณ 1 นาที ก่อนปิดฝาขวดด้วยฝาพลาสติกชนิดเกลียวที่มีแผ่นซิลิโคนสองชั้น เจาะเชื่อมต่อกับข้อต่อสามทางและสายยางสำหรับวัดปริมาณก๊าซมีเทน ขวดถูกบ่มในตู้อบที่อุณหภูมิ <math>35 \pm 2</math> °C เป็นเวลา 30 วัน</p>	<p>ณัฐพล เสวตบุตร และคณะ (2566)</p>

### 2.5.1.2 ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของกากตะกอนส่วนเกิน

#### จากอุตสาหกรรมกระดาษ

การศึกษาศักยภาพการเกิดก๊าซมีเทนทางชีวเคมี (BMP Test) เป็นการประเมินศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพหรือก๊าซมีเทนจากการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนของสารตั้งต้นที่นำมาใช้ โดยเป็นวิธีที่มีต้นทุนต่ำและสามารถทำซ้ำได้ ทำให้สามารถเปรียบเทียบศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของสารตั้งต้นหรือสภาวะการทดลองที่แตกต่างกันได้อย่างถูกต้อง อีกทั้งยังช่วย บ่งบอกสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการออกแบบระบบย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยจากการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่ผ่านมา พบถึงศักยภาพในการเกิดก๊าซชีวภาพของกากตะกอน PS และกากตะกอน SS ในอุตสาหกรรมกระดาษ แสดงดังตารางที่ 2.12 และ 2.13

จากการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของกากตะกอน PS และกากตะกอน SS จากอุตสาหกรรมกระดาษ พบว่าผลการทดลองจากหลายงานวิจัยมีความสอดคล้องในภาพรวมกับทฤษฎีพื้นฐานของการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยกากตะกอน SS ซึ่งประกอบด้วยจุลินทรีย์ที่ตายแล้วและสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ง่าย มักให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพสูงกว่ากากตะกอน PS ที่มีเส้นใยเซลลูโลสและลิกนินสูงซึ่งย่อยสลายยาก โดยข้อมูลเชิงปริมาณแสดงให้เห็นว่ากากตะกอน SS สามารถให้ผลผลิตมีเทนในช่วง 77 ถึง 519 mL CH<sub>4</sub>/g VS<sub>fed</sub> (Elliott & Mahmood, 2012; Lopes et al., 2018) ขณะที่กากตะกอน PS ให้ผลผลิตอยู่ที่ 44.8 ถึง 417 มิลลิลิตรมีเทนต่อกรัมค่า TVS ที่ป้อน (mL CH<sub>4</sub>/g VS<sub>fed</sub>) (Bayr & Rintala, 2012; Lopes et al., 2018; Bokhary et al., 2022) ซึ่งต่ำกว่ากากตะกอน SS อย่างชัดเจน ทั้งนี้สอดคล้องกับทฤษฎีที่ว่าโครงสร้างลิกโนเซลลูโลสในกากตะกอน PS มีความซับซ้อนและต้านทานการย่อยสลาย ทำให้การปลดปล่อยสารอินทรีย์ละลายน้ำเกิดขึ้นได้จำกัด

ปัจจัยเชิงปฏิบัติที่มีผลต่อศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ได้แก่ อัตราการระบวรทุกสารอินทรีย์ (OLR), อัตราส่วนอาหารต่อจุลินทรีย์ (F/M ratio), ระยะเวลากักเก็บ (HRT) และอายุตะกอน (SRT) ซึ่งมีผลต่อสมดุลของกระบวนการ hydrolysis, acidogenesis, acetogenesis และ methanogenesis อย่างมีนัยสำคัญ โดยงานวิจัยของ Lin et al. (2011) และ Karlsson et al. (2011) ชี้ว่า การเพิ่มค่า OLR และ SRT ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมสามารถเพิ่มผลผลิตมีเทนได้ แต่เมื่อค่า OLR สูงเกินจุดวิกฤติ (มากกว่าหรือเท่ากับ 5.0 กิโลกรัมค่า TVS ต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน; kg VS/m<sup>3</sup>-day) จะเกิดการสะสม VFA ส่งผลให้สมดุลระหว่าง acidogens และ methanogens เสียไปและเครื่องปฏิกรณ์สูญเสียเสถียรภาพ ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีการยับยั้งโดย VFA ขณะที่ Veluchamy & Kalamdhad (2017) พบว่า F/M ratio ที่เหมาะสมที่สุดคือ 2.0 เนื่องจากสามารถสร้างสมดุลระหว่างการปลดปล่อยสารอินทรีย์และการเปลี่ยนไปเป็นมีเทนได้สูงสุด หากค่า F/M สูงเกินไปจะนำไปสู่การสะสม VFA และการลดลงของ pH ซึ่งยับยั้งกิจกรรมของจุลินทรีย์เมทาโนเจน

นอกจากนี้ ยังพบว่าการปรับสภาพเบื้องต้นของกากตะกอนมีบทบาทสำคัญต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ โดย Elliott & Mahmood (2012) รายงานว่า การปรับสภาพกากตะกอน SS ด้วยวิธีเชิงกล เช่น การใช้แรงเฉือนเชิงกลหรือการใช้คลื่นโซนิค สามารถเพิ่มผลผลิตก๊าซได้มากถึงร้อยละ 15 เนื่องจากช่วยเร่งกระบวนการ hydrolysis และทำให้สารอินทรีย์เชิงซ้อนแตกตัวออกมาในรูปที่ละลายน้ำได้ง่ายขึ้น และงานวิจัยของ Bayr & Rintala (2012) พบว่าการเติมไนโตรเจนในระบบที่ใช้กากตะกอน PS ช่วยเพิ่มผลผลิตมีเทนและทำให้ระบบมีความเสถียรมากขึ้น เนื่องจากกากตะกอน PS มีค่า C/N ratio สูงและขาดไนโตรเจนเพียงพอ ขณะที่ Bokhary et al. (2021; 2022) แสดงให้เห็นว่าการควบคุม SRT ที่ยาวขึ้นสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างลิกโนเซลลูโลสในกากตะกอน PS และเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายได้มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีที่ว่า การเพิ่มเวลาในการกักเก็บจะช่วยให้อินทรีย์ไฮโดรไลติกและเมทาโนเจนิกมีเวลามากพอในการสลายสารอินทรีย์เชิงซ้อน

โดยสรุป ข้อมูลจากงานวิจัยต่าง ๆ แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่ากากตะกอน SS มีศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพสูงกว่ากากตะกอน PS แต่ศักยภาพของกากตะกอน PS สามารถปรับปรุงได้ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้น การเติมธาตุอาหารเสริม และการควบคุมเงื่อนไขการเดินระบบ เช่น OLR, HRT, SRT และ F/M ratio ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม ทั้งนี้ สอดคล้องกับทฤษฎีการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนที่ระบุว่าประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพขึ้นอยู่กับ การย่อยสลายสารอินทรีย์ในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการ ซึ่งหากสามารถปรับสมดุลดังกล่าวได้ ก็จะช่วยเพิ่มผลผลิตก๊าซมีเทนจากทั้งกากตะกอน PS และกากตะกอน SS ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 2.12 ศักยภาพในการเกิดก๊าซชีวภาพจากกากตะกอน PS ในอุตสาหกรรมกระดาษในงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ประเภท กากตะกอน	COD (mg/L)	TS (or TSS) (%)	VS (or VSS) (%)	VS loading rate (kg VS/m <sup>3</sup> - day)	HRT (days)	VS (or VSS, COD) removal (%)	Methane Yield	Experimental setup	อ้างอิง
กากตะกอน PS จากโรงงาน กระดาษคราฟท์ (S/I 1.7-1.9 g VS <sub>substrate</sub> /g VS <sub>inoculum</sub> )	2,100- 2,900 (SCOD)	2.2-3.1	1.6-1.9	1	23-32	71 (Cellulose removed)	230 ml CH <sub>4</sub> /g VS <sub>fed</sub>	CSTR	Bayr & Rintala (2012)
กากตะกอน PS จากโรงงานกระดาษ คราฟท์ (F/M 2.0 d <sup>-1</sup> )	1,600 (SCOD)	27	57	-	45	15.73	248 ml CH <sub>4</sub> /g VS <sub>fed</sub>	Batch test	Veluchamy & Kalamdhad (2017)
กากตะกอน PS จากโรงงาน กระดาษ (S/I 2 g VS <sub>substrate</sub> /g VS <sub>inoculum</sub> )	1,217 mg O <sub>2</sub> /gTS	31.99 %wt.	31.56 %wt.	-	20	-	417 ml CH <sub>4</sub> /g VS <sub>fed</sub>	CSTR	Lopes et al. (2018)
กากตะกอน PS จาก โรงงานผลิตกระดาษ	194 (SCOD)	11.8 g/L	93.93	2.5*, 3.7 และ 6.8 kg COD/m <sup>3</sup> -day	3, 5, 8	46.13	185 ml CH <sub>4</sub> /g TSS <sub>removed</sub>	CSTR	Bokhary et al. (2021)
กากตะกอน PS จาก โรงงานผลิตกระดาษเชิงกล	47,660	11.68 g/L	96.39	2.15 - 2.25 kg TSS/L- day	5	47 - 54.9%TS	44.8-87.7 ml CH <sub>4</sub> /g VS <sub>fed</sub>	CSTR	Bokhary et al. (2022)

ตารางที่ 2.13 ศักยภาพในการเกิดก๊าซชีวภาพจากกากตะกอน SS ในอุตสาหกรรมกระดาษในงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ประเภท กากตะกอน	COD (mg/L)	TS (or TSS) (%)	VS (or VSS) (%)	VS loading rate (kg VS/m <sup>3</sup> -day)	HRT (days)	VS (or VSS, COD) removal (%)	Methane Yield	Experimental setup	อ้างอิง
กากตะกอน SS จากโรงงาน กระดาษ	-	TS 314.5 g/kg	623 g/kgTS	1.5-5.0	-	47-61	434 ml CH <sub>4</sub> /g VS <sub>removed</sub>	CSTR	Lin et al. (2011)
กากตะกอน SS จากโรงงาน กระดาษคราฟท์และซัลไฟด์	-	0.6-11.6	-	3.4-18.9	20-22	-	145-188 ml CH <sub>4</sub> /g VS <sub>fed</sub>	CSTR	Karlsson et al. (2011)
กากตะกอน SS จากโรงงาน กระดาษเชิงกล	47,000	3.2	2.8	1.4 kg VSS /m <sup>3</sup> -day	-	29	77 mL CH <sub>4</sub> /g COD <sub>fed</sub>	CSTR	Elliott & Mahmood (2012)
กากตะกอน SS จากโรงงาน กระดาษคราฟท์ (S/I 1.7- 1.9 g VS <sub>substrate</sub> /g VS <sub>inoculum</sub> )	2,400 (SCOD)	2.2-2.9	1.7-2	1.4-2	14-16	73 (Cellulose removed)	100 ml CH <sub>4</sub> /g VS <sub>fed</sub>	CSTR	Bayr & Rintala (2012)
กากตะกอน SS จากโรงงาน กระดาษ (S/I 2 gVS substrate/gVS <sub>inoculum</sub> )	1236 mgO <sub>2</sub> /gTS	13.77 %wt.	11.73 %wt.	-	30	-	519 ml CH <sub>4</sub> /g VS <sub>fed</sub>	CSTR	Lopes et al. (2018)

## 2.5.2 การผลิตเชื้อเพลิงขยะ (Refuse-derived Fuel: RDF)

เชื้อเพลิงขยะ หมายถึง กากอุตสาหกรรมที่ผ่านกระบวนการจัดการต่าง ๆ เช่น การคัดแยกวัสดุที่เผาไหม้ไม่ได้ ออก หรือการฉีกหรือตัดกากออกเป็นชิ้นเล็ก ๆ เชื้อเพลิงขยะที่ได้นี้จะมีค่าความร้อนสูงกว่า หรือมีคุณสมบัติเป็นเชื้อเพลิงที่ดีกว่าการนำกากอุตสาหกรรมที่เก็บรวบรวมมาใช้โดยตรง เนื่องจากมีองค์ประกอบทั้งทางกายภาพและทางเคมีที่สม่ำเสมอกว่า เชื้อเพลิงขยะที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตพลังงานได้ทั้งรูปแบบพลังงานความร้อนและพลังงานไฟฟ้า โดยอาจจะมีการนำไปใช้ประโยชน์ในสถานที่ผลิตเชื้อเพลิงขยะเอง หรือขนส่งไปใช้ในที่อื่นได้ นอกจากนี้ ยังสามารถใช้เผาพร้อมกับถ่านหิน (Co-firing) เพื่อลดปริมาณการใช้ถ่านหินในอุตสาหกรรมบางประเภท และสามารถแบ่งประเภทของ RDF ที่จะนำไปใช้งานต่าง ๆ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2559)

การแปรรูปกากอุตสาหกรรมให้เป็นเชื้อเพลิงนั้น ต้องมีกระบวนการจัดการอย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่างขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเชื้อเพลิงขยะที่ต้องการ โดยทั่วไปขั้นตอนการจัดการ เช่น การคัดแยกที่แหล่งกำเนิด การคัดแยกด้วยมือหรือเครื่องจักร การลดขนาด การแยกขนาด การผสม การอัดแท่งและการทำให้แห้ง การบรรจุและการเก็บ เป็นต้น ซึ่งปัจจัยที่ต้องคำนึงในการเตรียมกากอุตสาหกรรมก่อนเข้าเตาเผา ได้แก่ ค่าความร้อน ความชื้น สถานะของกากอุตสาหกรรม และองค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของกากอุตสาหกรรม การควบคุมคุณภาพของกากอุตสาหกรรมก่อนที่จะเข้าสู่เตาเผา มีพารามิเตอร์ที่สำคัญตามประกาศกรมควบคุมมลพิษ เรื่อง คุณลักษณะเบื้องต้นที่เหมาะสมสำหรับเชื้อเพลิงขยะจากขยะมูลฝอยชุมชน (2561)

งานวิจัยที่เกี่ยวกับการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากกากตะกอนส่วนเกินของอุตสาหกรรมต่าง ๆ ดังตารางที่ 2.14 แสดงให้เห็นแนวโน้มที่สอดคล้องกับทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการอัดแท่งเชื้อเพลิง ซึ่งกล่าวว่า การเพิ่มตัวประสานหรือวัสดุเสริมที่มีความหนาแน่นสูง เช่น กากตะกอนจากโรงงานกระดาษหรือซังข้าวโพด จะช่วยเพิ่มค่าความร้อนของเชื้อเพลิงและทำให้เชื้อเพลิงมีความคงตัวมากขึ้น (ชมธิดา ชื่นนิยม, 2553; Avelar et al., 2016) โดยงานวิจัยของชมธิดา ชื่นนิยม (2553) พบว่าการเพิ่มสัดส่วนกากตะกอนจากโรงงานกระดาษในอัตราต่าง ๆ ทำให้ค่าความร้อนสูงสุดของเชื้อเพลิงอัดแท่งอยู่ที่ 4,366 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีที่ว่าเชื้อเพลิงที่มีองค์ประกอบคาร์บอนสูงและความชื้นต่ำจะมีค่าพลังงานสูง

ตารางที่ 2.14 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำกากตะกอนส่วนเกินจากอุตสาหกรรมต่าง ๆ มาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง

ประเภทกากตะกอน	เทคโนโลยีการอัดแท่งเชื้อเพลิง	ลักษณะกากตะกอนหลังทำ RDF		อ้างอิง
เศษซังข้าวโพดกับตัวเป็นกากของเสียจากโรงงานกระดาษ (กากตะกอน PS รวมกับกากตะกอน SS)	Screw press	- Moisture 5.02 - 5.80% - Ash 2.90 - 3.29%	- Heating Value 4,310.59 - 4,366 kcal/kg (18.04-18.28 MJ/kg)	ชมธิตา ชื่นนิยม (2553)
กากตะกอน SS จากโรงงานสิ่งทอผสมกับเศษผ้าฝ้ายอุตสาหกรรมสิ่งทอ	Piston Press	- Ash 12.73%	- HHV 21.32 MJ/kg (5,092.19 kcal/kg)	Avelar et al. (2016)
กากตะกอน SS จากอุตสาหกรรมพลาสติกกับซังข้าวโพด	Piston Press	- Moisture 14.3 - 16.3% - Ash 16.1 - 39%	- Heating Value 2,500 - 3,770 kcal/kg (10.47 - 15.78 MJ/kg)	ศุภกร เชื้ออำ และ ศิรินทร ทองแสง (2561)
กากตะกอน SS จากอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังกับหญ้าเนเปียร์	Mill ring die pelletizer	- Moisture 5.13 - 9.05% - Ash 11.95 - 56.58%	- Heating Value 8.18 - 13.82 MJ/kg (1,953.76 - 3,300.85 kcal/kg)	ฐิติกร กิจจนศิริ (2564)
กากตะกอน SS จากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน	Piston press	- Moisture 3.5% - Ash 36.6%	- Heating Value 12.9 MJ/kg (3,081.11 kcal/kg)	Rocha et al. (2022)

อย่างไรก็ตาม ผลการทดลองของศุภกร เชื้ออ่ำ และศิรินทร ทองแสง (2561) และ จิตติกร กิจจนศิริ (2564) แสดงให้เห็นว่าการอัดแท่งหรือเม็ดไม่สามารถทำได้เมื่อความชื้นของ กากตะกอนต่ำเกินไปหรืออัตราส่วนระหว่างวัตถุดิบไม่เหมาะสม ซึ่งตรงกับทฤษฎีว่าความชื้น ที่เหมาะสมเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อให้เกิดการยึดเกาะระหว่างอนุภาคของเชื้อเพลิง นอกจากนี้ งานวิจัยของ Rocha et al. (2022) แสดงให้เห็นว่าแม้ค่าความชื้นหลังอัดแท่งจะต่ำเพียงร้อยละ 3.5 แต่ปริมาณเถ้าสูง ถึงร้อยละ 36.6 ทำให้ค่าความร้อนเฉลี่ยอยู่ที่ 12.9 MJ/kg ซึ่งสะท้อนว่าองค์ประกอบของกากตะกอน มีผลต่อสมบัติทางความร้อนอย่างชัดเจน

โดยสรุป งานวิจัยเหล่านี้สอดคล้องกับทฤษฎี คือ การเลือกอัตราส่วนวัสดุและการควบคุมความชื้นมีผลต่อความสมบูรณ์ของการอัดแท่งและค่าพลังงานของเชื้อเพลิง อีกทั้งการปรับใช้ วัสดุหลากหลายประเภทสามารถเพิ่มความร้อนและปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงได้

## 2.6 เทคโนโลยีการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอน

เทคโนโลยีการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนใช้พลังงานน้อยกว่าการบำบัดแบบ ใช้ออกซิเจน และสามารถทำงานในสภาวะที่อัตราภาระสารอินทรีย์สูงกว่าการบำบัดแบบใช้ออกซิเจน ประมาณ 5 ถึง 10 เท่า (Bajpai, 2015) เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์สูง และมีเทคโนโลยีที่นิยมใช้งาน ดังนี้

### 2.6.1 ระบบชั้นตะกอนจุลินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนแบบไหลขึ้น

#### (Upflow Anaerobic Sludge Blanket: UASB)

ระบบ UASB เป็นระบบที่นิยมใช้มากกว่าระบบประเภทอื่น ๆ สำหรับการบำบัดน้ำเสีย แบบไม่ใช้ออกซิเจนในภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากสามารถรับอัตราภาระบรทุกสารอินทรีย์สูงได้ จากรูปที่ 2.4ก น้ำเสียจะถูกป้อนจากด้านล่าง และเมื่อเวลาผ่านไปจะเกิดการสะสมของกากตะกอน ที่ด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ การกวนเกิดขึ้นจากการก่อตัวและปั่นป่วนของก๊าซ (Gomez, 2011) ก๊าซที่เกิดขึ้นจะถูกรวบรวมที่ด้านบนและเก็บไว้ในถังเก็บก๊าซ ซึ่งนำไปใช้ผลิตพลังงานต่อไป น้ำเสีย ที่ผ่านการบำบัดแล้วจะถูกปล่อยออกจากท่อด้านบนของถังและนำไปบำบัดต่อไป การใช้ระบบ UASB ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานกระดาษพบว่าสามารถกำจัดค่า COD ได้สูงถึงร้อยละ 80 ถึง 93 (Chinnaraj & Rao, 2006)

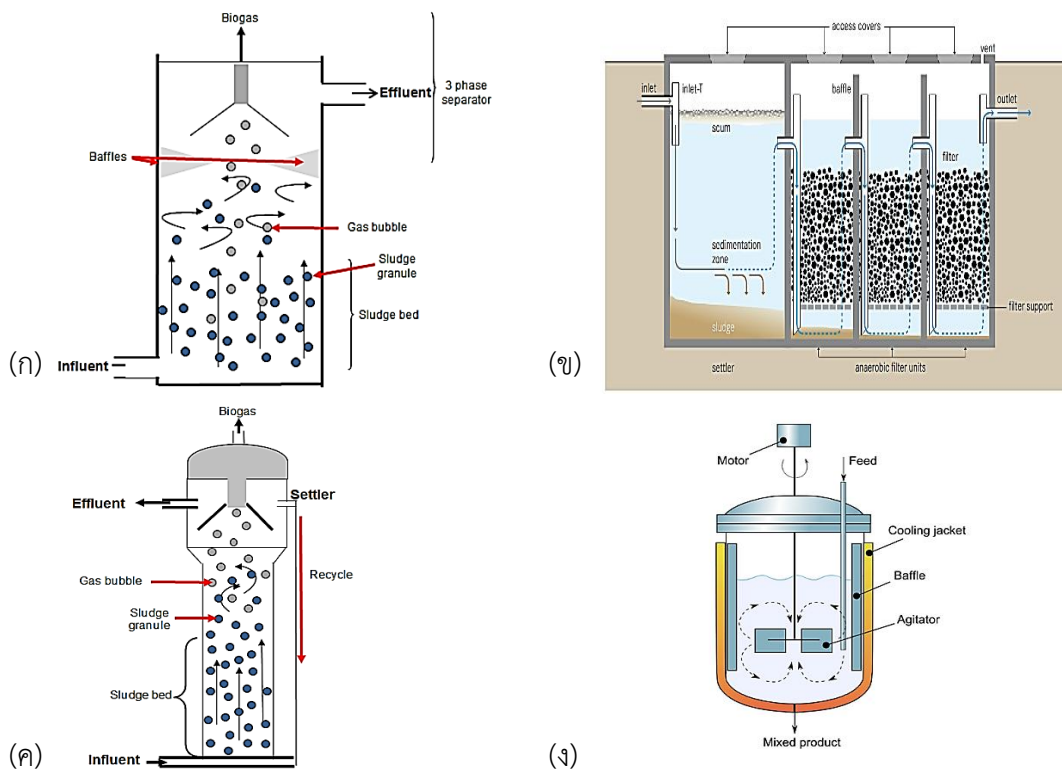
### 2.6.2 ระบบบ่อกองไร้ออกซิเจน (Anaerobic Filter: AF)

ตัวกรองในระบบ AF จะถูกบรรจุในคอลัมน์ เช่น pall ring, glass, PVC, baked clay, polypropylene rings และ coral/mussel shells (Show & Tay, 1999) ตัวกรองช่วยส่งเสริม

การเจริญเติบโตของแบคทีเรียและการผลิต exopolysaccharides ระบบนี้เป็นเครื่องปฏิกรณ์แบบ fixed bed ซึ่งมีหลายหน่วยเชื่อมต่อกันอย่างต่อเนื่อง การกรองแบบไร้ออกซิเจนมีลักษณะการบ่อนสารอินทรีย์ทั้งแบบ upflow filter และ downflow filter โดยมีลักษณะทั่วไปของระบบแสดงดังรูปที่ 2.4ข

### 2.6.3 ระบบอีจีเอสบี (Expanded Granular Sludge Bed: EGSB)

ระบบ EGSB เป็นการดัดแปลงระบบ UASB ในส่วนของความสูงแนวตั้ง โดยลักษณะของระบบ EGSB แสดงดังรูปที่ 2.4ค ซึ่งแกรนูลจะถูกทำให้ฟลูอิดซ์ด้วยการไหลเข้าหรือการหมุนเวียนของก๊าซ (Jianlong & Jing, 2005) ระบบนี้ถูกใช้เพื่อแยกน้ำเสีย ก๊าซชีวภาพ และชีวมวลในเครื่องเดียวกัน โดยตัวแยก 3 เฟสที่ส่วนบนสุดของระบบ EGSB มีคุณสมบัติการถ่ายเทมวลที่ดีขึ้นเมื่อเทียบกับระบบ UASB และมีศักยภาพสูงกว่า เนื่องจากสามารถบำบัดน้ำเสียที่มีค่า COD ต่ำกว่า 1 g/L ได้อย่างมีประสิทธิภาพที่อุณหภูมิต่ำถึง 100 °C (Kato et al, 1997)



รูปที่ 2.4 เทคโนโลยีการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนที่นิยม ได้แก่

(ก) ระบบ UASB (ข) ระบบ AF (ค) ระบบ EGSB และ (ง) ระบบ CSTR  
(Anijiofor Sandra et al., 2017; Rifaini & Noerhayati, 2024;  
Alipouri et al., 2014)

## 2.6.4 ระบบถังกวนสมบูรณ์แบบต่อเนื่อง

### (Continuous Stirred Tank Reactor: CSTR)

ระบบ CSTR เป็นระบบที่ติดตั้งใบกวนเพื่อให้จุลินทรีย์สัมผัสกับสารตั้งต้นอย่างทั่วถึงตลอดทั้งระบบ โดยลักษณะทั่วไปของระบบ CSTR แสดงดังรูปที่ 2.4 ระบบนี้พัฒนาต่อยอดมาจากถังย่อยตะกอนสารอินทรีย์แบบธรรมดา (Conventional Anaerobic Digester) ซึ่งมีประสิทธิภาพต่ำและมีการกวนผสมที่ไม่ดี ส่งผลให้ระยะเวลาการย่อยสลายยาวนาน ดังนั้นจึงมีการติดตั้งหน่วยกวน (ใบกวน) เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายของจุลินทรีย์ ส่งผลให้อัตราการย่อยสลายดีขึ้น นอกจากนี้ ระบบนี้มี SRT เท่ากับ HRT จึงเหมาะสมกับการบำบัดสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยากและมีปริมาณของแข็งสูง

## 2.7 การผลิตก๊าซชีวภาพด้วยการย่อยสลายร่วมแบบไม่ใช้ออกซิเจน

### (Anaerobic Co-digestion: AnCoD)

การผลิตก๊าซชีวภาพด้วยการย่อยสลายร่วมแบบไม่ใช้ออกซิเจน เป็นกระบวนการทางชีวภาพที่เกี่ยวข้องกับการสลายตัวพร้อมกันของสารอินทรีย์หรือสารตั้งต้นหลายชนิด ซึ่งโดยทั่วไปคือของเสียหรือชีวมวล ภายใต้สภาวะปราศจากออกซิเจน (ไร้ออกซิเจน) กระบวนการนี้มักถูกนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียและการจัดการขยะมูลฝอยอินทรีย์ เพื่อเพิ่มผลผลิตก๊าซชีวภาพและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ก๊าซชีวภาพส่วนใหญ่ประกอบด้วยไบโอมีเทนซึ่งสามารถนำไปใช้ผลิตความร้อนและไฟฟ้าได้ สารตั้งต้นหลายชนิดสามารถย่อยสลายร่วมกันได้ในสัดส่วนผสมของกากตะกอนส่วนเกินที่เหมาะสม ทำให้การย่อยสลายแบบร่วมเป็นทางเลือกที่มีประสิทธิภาพกว่าแบบย่อยสลายเชิงเดี่ยว ช่วยลดข้อจำกัดและเพิ่มความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจของอุตสาหกรรมด้วยการเพิ่มผลผลิตมีเทน

ข้อดีของการย่อยสลายร่วมของสารตั้งต้นหลายชนิด ได้แก่ การปรับสมดุลสารอาหารและค่า C/N ratio การเพิ่มอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ในระบบ การเจือจางสารพิษในของเสีย และการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทน ปรากฏในงานวิจัยที่ศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการย่อยสลายร่วมของกากตะกอน PS และกากตะกอน SS ในอุตสาหกรรมกระดาษ ดังตารางที่ 2.15

จากการงานวิจัยที่เกี่ยวกับ AnCoD ของกากตะกอนจากอุตสาหกรรมกระดาษและกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน พบว่าผลการวิจัยส่วนใหญ่ชี้ให้เห็นถึงความสำคัญ of สัดส่วนการผสม ค่า C/N ratio และการบำบัดปรับสภาพต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยทฤษฎีของ AnCoD ระบุว่า การย่อยสลายร่วมช่วยเสริมสมดุลของธาตุอาหาร โดยเฉพาะค่า C/N ratio ที่เหมาะสม (ประมาณ 20 ถึง 30:1) สามารถลดความเป็นพิษจากแอมโมเนียที่เกิดจากกากตะกอน SS ที่มีไนโตรเจนสูง และเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายสารลิกโนเซลลูโลสที่พบในกากตะกอน PS ทำให้เกิดการสร้างก๊าซชีวภาพที่สูงกว่าเมื่อย่อยสลายสารตั้งต้นเพียงชนิดเดียว

ข้อมูลจากงานวิจัยของ นิตยา สุขอร่าม (2554) พบว่า กากตะกอนก่อนรีดน้ำร่วมกับขี้เลื่อยในค่า C/N ratio 30:1 ให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดถึง 4.46 L/kg VS-day และมีมีเทนเฉลี่ยร้อยละ 46.39 ซึ่งสูงกว่ากากตะกอนที่ผ่านการรีดน้ำซึ่งมีการเติมสารเคมี ส่งผลให้ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซลดลงเหลือเพียง 0.02 L/kg VS-day และมีมีเทนเฉลี่ยเพียงร้อยละ 40.69 สอดคล้องกับแนวคิดว่าการเติมสารเคมีอาจก่อให้เกิดสารยับยั้งจุลินทรีย์ในกระบวนการย่อยสลาย

นอกจากนี้ งานของ Saha et al. (2011) พบว่าการย่อยสลายร่วมของกากตะกอน PS และกากตะกอน SS ในสัดส่วนผสมกากตะกอน PS:SS ที่ 42:58 ให้ผลผลิตมีเทนเพียง 55 ml CH<sub>4</sub>/g-COD<sub>fed</sub> แต่เมื่อผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยอัลตราโซนิกและไมโครเวฟ ผลผลิตเพิ่มสูงขึ้นเป็น 55 ถึง 75 และ 60 ถึง 70 kg TCOD/m<sup>3</sup>-day ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการปรับสภาพเบื้องต้นช่วยเพิ่มการย่อยสลายของสารอินทรีย์เชิงซ้อนและลดการสะสม VFA ในทำนองเดียวกัน Bayr & Rintala (2012) รายงานว่า การย่อยสลายกากตะกอน PS เชิงเดี่ยวในระบบ CSTR ภายใต้ HRT 23 ถึง 32 วัน ให้ผลผลิตมีเทนเฉลี่ย 200 ถึง 240 ml CH<sub>4</sub>/g VS<sub>fed</sub> แต่เมื่อนำกากตะกอน PS และกากตะกอน SS มาย่อยสลายร่วมในสัดส่วนผสม PS:SS ที่ 2:3 โดยไม่มีการเติมไนโตรเจน ผลผลิตกลับลดลงเหลือเพียง 150 ถึง 170 ml CH<sub>4</sub>/g VS<sub>fed</sub> ซึ่งต่ำกว่าการย่อยสลายเชิงเดี่ยว อันเนื่องมาจากความไม่สมดุลของสารอาหาร อย่างไรก็ตาม การเติมไนโตรเจนกลับช่วยเพิ่มเสถียรภาพของระบบและทำให้ผลผลิตก๊าซกลับมาสูงขึ้น สอดคล้องกับทฤษฎีที่ว่าจัดการสมดุลธาตุอาหาร โดยเฉพาะไนโตรเจนมีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์เมทาโนเจนิก

ในอีกด้านหนึ่ง Hagelqvist (2013) พบว่าการย่อยสลายกากตะกอน SS จากอุตสาหกรรมกระดาษ ร่วมกับกากตะกอน SS จากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน ในสัดส่วน 1:1 ให้ผลผลิตก๊าซสูงสุด 84 ml CH<sub>4</sub>/g VS<sub>fed</sub> ซึ่งใกล้เคียงกับการย่อยสลายกากตะกอน SS จากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน ขณะที่การเพิ่มสัดส่วนกากตะกอน SS จากอุตสาหกรรมกระดาษ เป็น 4:1 กลับให้ผลผลิตต่ำสุดเพียง 40 ml CH<sub>4</sub>/g VS<sub>fed</sub> ซึ่งสะท้อนว่ากากตะกอน SS จากอุตสาหกรรมกระดาษ ที่มีสารลิกโนเซลลูโลสสูงและ C/N ratio ต่ำ ไม่เหมาะต่อการผลิตก๊าซหากใช้เป็นสารตั้งต้นในการย่อยสลายเชิงเดี่ยว แต่จะมีประสิทธิภาพสูงขึ้นเมื่อย่อยสลายร่วมกับกากตะกอน SS จากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน ที่มีไนโตรเจนสูงกว่า ผลลัพธ์นี้สอดคล้องกับงานของ Lopes et al. (2018) ที่รายงานว่าการย่อยสลายเชิงเดี่ยวของกากตะกอน PS ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนเพียง 417 ml CH<sub>4</sub>/g VS<sub>fed</sub> ขณะที่กากตะกอน SS ให้สูงถึง 519 ml CH<sub>4</sub>/g VS<sub>fed</sub> เนื่องจากกากตะกอน PS มีองค์ประกอบของลิกโนเซลลูโลสสูงและย่อยสลายได้ยากกว่า อย่างไรก็ตาม การย่อยสลายร่วมในสัดส่วน PS:SS ที่ 2.5:1 (ค่า C/N 31:1) สามารถเพิ่มผลผลิตก๊าซมีเทนได้ถึง 443 ml CH<sub>4</sub>/g VS<sub>fed</sub> ซึ่งสูงกว่าการย่อยสลายกากตะกอน PS เชิงเดี่ยวแต่ต่ำกว่ากากตะกอน SS เนื่องจากเกิดการสะสมกรดอะซิติกและค่า pH ลดลงจนเป็นกรด

งานวิจัยในปัจจุบันของ Sun et al. (2022) ยืนยันผลในทำนองเดียวกัน โดยพบว่าการย่อยสลายกากตะกอน SS เชิงเดี่ยวให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด 75 ml CH<sub>4</sub>/g VS<sub>fed</sub> ขณะที่การผสม PS:SS ในสัดส่วนที่กากตะกอน SS มากกว่า เช่น 1:3 ให้ผลผลิตก๊าซสูงถึง 67.5 ml CH<sub>4</sub>/g VS<sub>fed</sub> และมีความเข้มข้น VFA รวมถึงสัดส่วนมีเทนในก๊าซชีวภาพสูงกว่าสัดส่วนที่มีกากตะกอน PS อย่างมีนัยสำคัญ สอดคล้องกับทฤษฎีที่ว่า การเพิ่มกากตะกอน SS ในการย่อยสลายร่วมช่วยปรับสมดุลของสารอาหาร เพิ่มการสลายตัวของสารอินทรีย์ และส่งเสริมการสร้างมีเทนโดยลดภาวะยับยั้งจากการสะสมกรด

ดังนั้น ข้อมูลจากงานวิจัยทั้งหมดสะท้อนให้เห็นว่า AnCoD ของกากตะกอน PS และกากตะกอน SS มีศักยภาพสูงในการเพิ่มผลผลิตก๊าซชีวภาพมากกว่าการย่อยสลายเชิงเดี่ยว หากสามารถควบคุมอัตราส่วนการผสมให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมเพื่อปรับค่า C/N ratio ให้เหมาะสมกับความต้องการของจุลินทรีย์ รวมถึงการใช้วิธีปรับสภาพเบื้องต้นเพื่อลดความซับซ้อนของสารอินทรีย์ จะช่วยเพิ่มความเสถียรและประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพได้อย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 2.15 การผลิตก๊าซชีวภาพด้วยระบบย่อยสลายร่วมแบบไม่ใช้ออกซิเจนในงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ประเภท กากตะกอน	COD (mg/L)	TS (or TSS) (%)	VS (or VSS) (%)	VS loading rate (kg VS/m <sup>3</sup> -day)	Detention time (DT) (days)	VS (or VSS, COD) removal (%)	Methane Yield	Experimental setup	อ้างอิง
กากตะกอน MS จากโรงงาน กระดาษผสมกับขี้เลื่อย (PS:SS 9:2 kg Dry w.)	136,997 mg/kg (Carbon)	271,875 mg/kg	216,594 mg/kg	-	90	-	4.46 L/kg VS-day	Batch test	นิตยา สุขอร่าม (2554)
กากตะกอน MS จาก โรงงานกระดาษ (PS:SS 3:2)	34,229	2.2	1.8	1.98 kg TCOD/ m <sup>3</sup> -day	21	10	55 ml CH <sub>4</sub> /g COD <sub>fed</sub>	Batch test	Saha et al. (2011)
กากตะกอน MS จาก โรงงานกระดาษกราฟท์ (PS:SS 2:3 VS, S/I 1.7- 1.9 g VS <sub>substrate</sub> /gVS <sub>inoculum</sub> )	2,500- 3,000 (SCOD)	2.5-3.2	1.8-2.1	1	25-31	70 (Cellulose removed)	150-170 ml CH <sub>4</sub> /g VS <sub>fed</sub>	CSTR	Bayr & Rintala (2012)
กากตะกอน MS จาก โรงงานกระดาษ และจาก ระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน (SS:SS 1:1)	-	5.1	3.5	-	19	50	84 ml CH <sub>4</sub> /g VS <sub>fed</sub>	Batch test	Hagelqvist (2013)

ตารางที่ 2.15 การผลิตก๊าซชีวภาพด้วยระบบย่อยสลายร่วมแบบไม่ใช้ออกซิเจนในงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ประเภท กากตะกอน	COD (mg/L)	TS (or TSS) (%)	VS (or VSS) (%)	VS loading rate (kg VS/m <sup>3</sup> -day)	Detention time (DT) (days)	VS (or VSS, COD) removal (%)	Methane Yield	Experimental setup	อ้างอิง
กากตะกอน MS จาก โรงงานกระดาษ (PS:SS 2.5:1 TS basis, S/I 2 g VS <sub>substrate</sub> /g VS <sub>inoculum</sub> )	1223 mg O <sub>2</sub> /gTS	26.79 %wt.	25.90 %wt.	-	20	-	443 ml CH <sub>4</sub> /g VS <sub>fed</sub>	CSTR	Lopes et al. (2018)
กากตะกอน MS (จากระบบ บำบัดน้ำเสียชุมชน) (PS:SS 3:1, 1:1, 1:3*)	-	-	-	-	17	38-47	67.5 ml CH <sub>4</sub> /g TSS <sub>fed</sub>	Batch test	Sun et al. (2022)

## 2.8 รูปแบบถึงปฏิกรณ์ในการผลิตก๊าซชีวภาพ

การผลิตก๊าซชีวภาพในอุตสาหกรรมกระดาษมีการใช้ถึงปฏิกรณ์หลายรูปแบบ โดยแต่ละแบบมีข้อดี ข้อจำกัด และประสิทธิภาพแตกต่างกันตามลักษณะของเสียและวัตถุประสงค์การใช้งาน

### 2.8.1 ระบบหมักแห้งแบบต่อเนื่อง (Dry Continuous Digestion)

ระบบหมักแห้งแบบต่อเนื่องเหมาะกับขยะอินทรีย์ที่มีของแข็งร้อยละ 20 ถึง 40 โดยระบบ Plug Flow ที่มีการรีไซเคิลสารที่ถูกย่อยสลายแล้วกลับมาผสมให้ประสิทธิภาพผลิตก๊าซมีเทนสูงถึง 0.35 ถึง 0.45 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg VS-day ภายใต้สภาวะเทอโมฟิลิก 50 ถึง 55 °C และค่าความชื้นควบคุมที่ร้อยละ 30 ถึง 35 เพื่อป้องกันการสะสมกรดอินทรีย์ แต่ปัญหาหลักคือการอุดตันของการไหลผ่านและความไม่สม่ำเสมอของอัตราการผลิตก๊าซ (สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์, 2559)

### 2.8.2 ระบบหมักแห้งแบบแบตช์ (Dry Batch Digestion)

ระบบแบบแบตช์สามารถกำจัดขยะอินทรีย์ในปริมาณ 5 ถึง 20 ตันต่อรอบ และสามารถผสมสารที่ถูกย่อยสลายแล้วร้อยละ 10 ถึง 15 กระตุ้นให้เกิดน้ำชะขยะ (leachate) ประมาณ 200 ถึง 300 ลิตรต่อวัน ซึ่งจะควบคุมความชื้นที่ร้อยละ 45 ถึง 55 ช่วยให้ได้ก๊าซมีเทนราว 0.25 ถึง 0.30 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg VS-day แต่ข้อจำกัดสำคัญคือความแปรปรวนของลักษณะ leachate จึงต้องมีระบบบำบัดน้ำชะขยะเพิ่มเติม (กนิษฐา วิบูลรัตน์, 2552)

### 2.8.3 กระบวนการลีช-เบด (Leach-bed Processes)

Leach-bed Process หรือ SEBAC ใช้ถึงแบตช์สลับกันแลกเปลี่ยนของเหลวระหว่างแบตช์เก่าและใหม่ ช่วยลดช่วง lag phase ให้เหลือเพียง 2 ถึง 3 วัน แทนที่จะเป็น 7 ถึง 10 วันในระบบแบตช์ และให้ผลผลิตมีเทนสูงขึ้นกว่าร้อยละ 15 แต่พบปัญหาเรื่องการควบคุมการระบายไอระเหยภายในถังและการรั่วซึมของ leachate ที่ร้อยละ 5 ถึง 7 ต่อเดือน (สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์, 2559)

### 2.8.4 การหมักเปียกแบบต่อเนื่อง (Wet Continuous Digestion)

การหมักดังกล่าวใช้ถึง CSTR ในการป้อน slurry ของแข็งร้อยละ 8 ถึง 12 ควบคุมอัตราการย่อยทุกอินทรีย์สูงถึง 4 ถึง 6 kg COD/m<sup>3</sup>-day ผลิตก๊าซมีเทนได้ 0.30 ถึง 0.50 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg VS-day การกรองแยกของเหลวกลับมาใช้ใหม่ช่วยรักษาคุณภาพสภาวะ pH 7.0 ถึง 7.5

แต่มีปัญหาเรื่องการตกตะกอนของจุลินทรีย์และการจับตัวเป็นก้อนที่ต้องมีอุปกรณ์ตะแกรงกรองเสริม (เฟื่องฟ้า มีโกคา, 2561)

### 2.8.5 การหมักเปียกแบบหลายขั้นตอน (Multi-stage Wet Digestion)

ระบบหลายขั้นตอนแยก hydrolysis-acidogenesis ออกจาก methanogenesis เช่น Anaerobic Filter มีระยะเวลาพักเก็บ 12 ถึง 24 ชั่วโมง และ UASB สามารถรับภาระบรรทุกอินทรีย์ 6 ถึง 8 kg COD/m<sup>3</sup>-day ผลผลิตมีเทนรวมสูงถึง 0.45 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg VS-day แต่ต้องเผชิญปัญหาการควบคุม flocculation ของกากตะกอน และการสูญเสียของแข็งแขวนลอยในน้ำทิ้งร้อยละ 10 ถึง 15 (สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์, 2559)

## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยระบบถังกวนผสมแบบสอง-ขั้นตอน (Two-stage Continuous Stirred Tank Reactor: Two-stage CSTR)

ระบบ Two-stage CSTR เป็นถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนผสม ทำให้จุลินทรีย์กับสารตั้งต้นสัมผัสกัน ทั้งถัง และมีลักษณะการป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา โดยสารตั้งต้นจะถูกย่อยสลายภายในถังปฏิกรณ์ระยะเวลาหนึ่งและถูกถ่ายออกจากถังปฏิกรณ์อย่างต่อเนื่องเช่นเดียวกัน ส่งผลให้ระบบมีประสิทธิภาพสูงสุด นอกจากนี้ การผลิตก๊าซชีวภาพแบบสองขั้นตอนยังให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพสูงกว่าระบบแบบขั้นตอนเดียว ตะกอนที่เหลือจากการย่อยสลายมีความคงตัวสูงและเกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายในระบบต่ำ ถังปฏิกรณ์ที่สองสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้เร็วกว่าถังแรก เนื่องจากสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ถังที่สองเป็นสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายง่าย ซึ่งงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.16 ดังนี้

จากผลการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายกากตะกอนโดยระบบ Two-stage CSTR พบว่า แนวคิดทางทฤษฎีของระบบดังกล่าวมีพื้นฐานจากการแยกกระบวนการ Hydrolysis/Acidogenesis และ Methanogenesis ออกจากกัน เพื่อสร้างสมดุลระหว่างการสลายสารอินทรีย์เชิงซ้อนและการเปลี่ยน VFA ไปเป็นมีเทน โดยทั่วไปถึงแรกควรมีบทบาทในการย่อยสลายสารอินทรีย์เชิงซ้อนให้กลายเป็น VFA ที่อยู่ในรูปละลายน้ำได้ง่าย และถังที่สองทำหน้าที่เป็นถังผลิตมีเทน โดยเปลี่ยน VFA เหล่านั้นให้กลายเป็นก๊าซชีวภาพอย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม จากหลายงานวิจัยพบว่าผลลัพธ์จริงมีความหลากหลายขึ้นอยู่กับสภาวะการเดินระบบและชนิดของสารตั้งต้น เช่น งานวิจัยของ Gagliano et al. (2015) พบว่า ถัง Acidogenesis ในสภาวะมีโซฟิลิก ให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพสูงกว่า (0.28 ml biogas/g COD<sub>fed</sub>) เมื่อเทียบกับถัง Methanogenesis ที่ทำงานในสภาวะเทอโมฟิลิก (0.07 ml biogas/g COD<sub>fed</sub>) เนื่องจากจุลินทรีย์เมทาโนเจนิกในสภาวะอุณหภูมิสูงต้องใช้เวลาปรับตัวนานกว่า ขณะที่งานวิจัยของ Maspolim et al. (2016) ที่ศึกษา

การย่อยสลายกากตะกอน PS และกากตะกอน SS พบว่าการออกแบบระบบที่ถึง Acidogenesis อยู่ในสภาวะเทอโมฟิลิก และถึง Methanogenesis อยู่ในสภาวะมีโซฟิลิก สามารถให้ผลผลิตมีเทนสูงสุด 297 mL/g VS<sub>fed</sub> และประสิทธิภาพการกำจัด COD และ VS เฉลี่ยร้อยละ 41.2 และร้อยละ 46.4 ตามลำดับ แสดงถึงความเหมาะสมของการเลือกอุณหภูมิที่แตกต่างกันในแต่ละขั้นตอน เพื่อลดการสะสมของ VFA และเพิ่มเสถียรภาพของระบบ

ในทำนองเดียวกัน งานวิจัยของ Liu et al. (2019) ที่ใช้กากตะกอน SS ร่วมกับเศษอาหาร พบว่า แม้ถึง Hydrolysis ที่อุณหภูมิเทอโมฟิลิกและ HRT สั้นจะสามารถผลิตก๊าซชีวภาพสูง (147.6 mL/g VS<sub>fed</sub>) แต่ถึง Methanogenesis ให้ผลผลิตต่ำกว่า (74.4 mL/g VS<sub>fed</sub>) เนื่องจากการสะสม VFA ทำให้สมดุลของกระบวนการ Methanogenesis ถูกยับยั้ง ขณะทำงานของ Wang et al. (2020) รายงานว่าถึง Methanogenesis ภายใต้สภาวะมีโซฟิลิกให้ผลผลิตมีเทนสูงกว่าสภาวะเทอโมฟิลิกถึงร้อยละ 62 แม้ว่าประสิทธิภาพการกำจัด VS ในสภาวะเทอโมฟิลิกจะสูงกว่า ซึ่งแสดงถึงบทบาทของการสะสม propionate ที่เป็นตัวจำกัดการผลิตมีเทนในถึงที่สอง สอดคล้องกับทฤษฎีที่ว่า การสะสมกรดไขมันระเหย โดยเฉพาะ propionate และ butyrate สามารถเป็นปัจจัยยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์เมทาโนเจนิก และทำให้การผลิตมีเทนลดลง ในขณะทำงานของ Sani et al. (2022) แสดงให้เห็นว่าการย่อยสลายร่วมระหว่างกากตะกอน SS และกากตะกอนที่มีน้ำมัน สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยถึง Methanogenesis ให้ผลผลิตมีเทนสูงถึง 423.4 mL/g VS<sub>fed</sub> และมีประสิทธิภาพการกำจัด COD และ VS สูงถึงร้อยละ 68.65 และร้อยละ 55.6 ตามลำดับ สะท้อนถึงข้อดีของการย่อยสลายร่วมในการสร้างสมดุลของสารอาหารและลดการสะสมกรดไขมัน

จากการเปรียบเทียบผลการศึกษาทั้งหมดนี้ สามารถสรุปได้ว่า แม้ระบบ Two-stage CSTR จะมีการแยกกระบวนการ Acidogenesis/Hydrolysis ออกจาก Methanogenesis จะช่วยเพิ่มความเสถียรและประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ แต่ผลการทดลองจริงกลับขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ไม่ว่าจะเป็นชนิดของสารตั้งต้น ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ ค่า HRT/OLR และอุณหภูมิในแต่ละถึง โดยการออกแบบที่เหมาะสม เช่น การใช้สภาวะเทอโมฟิลิกในถึง Acidogenesis เพื่อเร่งการย่อยสลายเบื้องต้น และการใช้สภาวะมีโซฟิลิกในถึง Methanogenesis เพื่อเสริมความเสถียรของจุลินทรีย์เมทาโนเจนิก อาจเป็นแนวทางที่ให้ผลผลิตมีเทนและประสิทธิภาพการย่อยสลายสูงที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีการแยกกระบวนการย่อยสลายเป็นสองขั้นตอน

ตารางที่ 2.16 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบ Two-stage CSTR

ลักษณะของเสีย		CSTR 1				CSTR 2				ระยะเวลาดำเนินการ (วัน)	อ้างอิง
		ระบบ	สภาวะเดินระบบ	ประสิทธิภาพ COD, VS <sub>removed</sub> (%)	CH <sub>4</sub> yield	ระบบ	สภาวะเดินระบบ	ประสิทธิภาพ COD, VS <sub>removed</sub> (%)	CH <sub>4</sub> yield		
กากตะกอน SS	TCOD 200	CSTR (Acid)	- V 7 L - HRT 3 d - SRT 3 d - OLR 10	-	0.28 ml biogas/g COD <sub>fed</sub>	CSTR (M)	- V 7 L - HRT 10 d - SRT 10 d - OLR 2.5	-	0.07 ml biogas/g COD <sub>fed</sub>	81	Gagliano et al. (2015)
กากตะกอน MS จากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน	- TCOD 32,300 - VS 20,200 - OLR 1.5 kg COD/m <sup>3</sup> -day	CSTR (Acid)	- V 7.5 L - HRT 3 d - SRT 3 d	41.2 (VS <sub>removed</sub> ) 46.4 (COD <sub>removed</sub> )	119 ml/g VS <sub>fed</sub>	CSTR (M)	- V 42.5 L - HRT 17 d - SRT 17 d	41.2 (VS <sub>removed</sub> ) 46.4 (COD <sub>removed</sub> )	297 ml/g VS <sub>fed</sub>	250 (3 เฟส)	Maspolim et al. (2016)
กากตะกอน SS และเศษอาหาร	- TCOD 1,307 mg/g VS - VS/TS 82.3%	CSTR (Hi)	- V 0.65 L - HRT 0.8 d - SRT 0.8 d - OLR 39.6	-	147.6 ml/g VS <sub>fed</sub>	CSTR (M)	- V 3.6 L - HRT 4.5 d - SRT 4.5 d - OLR 6.1	-	74.4 ml/g VS <sub>fed</sub>	120 (4 เฟส)	Liu et al. (2019)

ตารางที่ 2.16 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบ Two-stage CSTR (ต่อ)

ลักษณะของเสีย		CSTR 1				CSTR 2				ระยะเวลาดำเนินการ (วัน)	อ้างอิง
		ระบบ	สภาวะเดินระบบ	ประสิทธิภาพ COD, VS <sub>removed</sub> (%)	CH <sub>4</sub> yield	ระบบ	สภาวะเดินระบบ	ประสิทธิภาพ COD, VS <sub>removed</sub> (%)	CH <sub>4</sub> yield		
กากตะกอน SS	- TCOD 19,371 - VS 17,000	CSTR (Hi)	- V 2 L - HRT 4 d - SRT 4 d - OLR 4.4	29.2 (VS <sub>removed</sub> ) 7.7 (COD <sub>removed</sub> )	37.9 ml/g VS <sub>fed</sub>	CSTR (M)	- V 2 L - HRT 20 d - SRT 20 d - OLR 0.62	37.3 - 41.4 (VS <sub>removed</sub> ) 21.4 - 23 (COD <sub>removed</sub> )	74.5 - 87.5 ml/g VS <sub>fed</sub>	53 (2 เฟส)	Wang et al. (2020)
กากตะกอน SS และ กากตะกอนที่มีน้ำมันจากโรงงานปลาทูน่ากระป๋อง	- TCOD 90,349 - VS 62,929	CSTR (Acid)	- V 50 L - HRT 3 d - SRT 3 d - OLR 12.6	11 (VS <sub>removed</sub> ) 1 (COD <sub>removed</sub> )	1.7 ml/g VS <sub>fed</sub>	CSTR (M)	- V 120 L - HRT 17 d - SRT 17 d - OLR 2.26	55.6 (VS <sub>removed</sub> ) 68.65 (COD <sub>removed</sub> )	423.4 ml/g VS <sub>fed</sub>	201 (5 เฟส)	Sani et al. (2022)

หมายเหตุ COD หน่วย mg/L, VS หน่วย mg/L, OLR หน่วย kg VS/m<sup>3</sup>-day, Hi คือ Hydrolysis, Acid คือ Acidogenesis และ M คือ Methanogenesis