บทที่ 1

บทนำ

1. บทนำต้นเรื่อง

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของภาคใต้โดยจังหวัดที่มีการปลูกมากที่สุดคือ กระบี่ สุราษฎร์ธานี ชุมพร ตรัง สตูล และสงขลา ตามลำดับ ซึ่งมีผลปาล์มสดประมาณ 3.48 ล้านตันต่อปี คิดเป็นมูลค่าของผลผลิต 4,176 ล้านบาทต่อปี ขั้นตอนการผลิตน้ำมันปาล์มนั้นโดยผลปาล์มสดประมาณร้อยละ 80 จะถูกป้อนเข้าสู่โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มแบบมาตรฐาน (หีบเปียก) ซึ่งมีอยู่ 40 โรงงาน คิดเป็นปริมาณ 2.80 ล้านตันต่อปี ส่วนที่เหลืออีกร้อยละ 20 จะเข้าโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มแบบอื่นๆ หรือ หีบแห้ง (สำนักนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2546) โดยผลปาล์มสด 1 ตัน จะสามารถสกัดน้ำมันปาล์มได้ร้อยละ 16 หรือ 230 ลิตร และมีน้ำเสียเกิดขึ้นประมาณ 0.40 ลูกบาศก์เมตร ดังนั้นโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่มีกำลังการผลิต 30 ตันผลปาล์มสดต่อชั่วโมง จะมีน้ำเสียประมาณ 300 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ซึ่งเกิดจากการนึ่งผลปาล์มโดยเครื่องดีแคนเตอร์ (Decanter) น้ำเสียที่เกิดขึ้นซึ่งมีการปนเปื้อนของไขมันและสารอินทรีย์อยู่มากหากโรงงานไม่มีการบำบัดที่ดีพอก็จะก่อให้เกิดกลิ่นเหม็นรบกวนเมื่อปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะก็จะมีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำและสิ่งแวดล้อมได้ (อารีย์ กังแฮ, 2536)

การบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศระบบปิดซึ่งได้รับการยอมรับว่ามีข้อได้เปรียบกว่าระบบที่ต้องการอากาศเนื่องจากสามารถประหยัดพลังงานที่ต้องใช้ในการเติมอากาศและมีการเปลี่ยนของเสียสารอินทรีย์ไปเป็นก๊าซมีเทนอย่างรวดเร็วซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ และมีความต้องการสารอาหารในการสร้างผลผลิตจากมวลเซลล์ต่ำ (Nagatsuta-cho and Yokohama, 1999) สำหรับการเลือกใช้ถังปฏิกรณ์แต่ละชนิดขึ้นกับคุณลักษณะและปริมาณน้ำเสีย เนื่องจากน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำมันปาล์มพบว่าโดยทั่วไปมักมีการปนเปื้อนของสารอินทรีย์และของแข็งทั้งหมดในปริมาณสูงทำให้การใช้ถังปฏิกรณ์แบบถังเดียวในการผลิตก๊าซชีวภาพอาจต้องใช้เวลาในการผลิตก๊าซและการบำบัดน้ำเสียนานเป็นผลให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่ำ ในขณะที่การเลือกใช้ถังปฏิกรณ์แบบสองถังซึ่งมีการแยกถังผลิตกรดและถังผลิตมีเทนออกจากกัน โดยถังปฏิกรณ์แรกจะส่งเสริมให้มีการสร้างกรดไขมันระเหยง่าย (Volatile Fatty Acids; VFA) จากการย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ ในขณะที่จุลินทรีย์ที่มีอยู่ในถังปฏิกรณ์ที่สองจะใช้

กรดไขมันระเหยง่ายที่ถูกสร้างขึ้นจากถังปฏิกรณ์แรกในการผลิตก๊าซมีเทนต่อไป เนื่องจากจุลินทรีย์สร้างกรดและผลิตก๊าซมีเทนนั้นมีสภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญและการสร้างผลผลิตที่ต่างกัน ดังนั้นการเลือกใช้ถังปฏิกรณ์แบบสองขั้นตอนโดยแยกกระบวนการทั้งสองออกจากกัน ทำให้การควบคุมสภาวะที่เหมาะสมสำหรับจุลินทรีย์ผลิตกรดและสร้างมีเทนทำได้ง่ายกว่าการใช้ถังปฏิกรณ์เพียงถังเดียวซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตมีเทน สำหรับถังปฏิกรณ์ชนิด Up-flow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) ซึ่งเป็นถังปฏิกรณ์ที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งทั้งหมดและสามารถรองรับภาระสารอินทรีย์ได้สูง นอกจากนี้ยังมีรายงานการนำถังปฏิกรณ์ชนิดนี้สำหรับใช้เป็นถังผลิตกรดในการบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม (Borja *et al,* 1996) ซึ่งรายงานว่าสามารถให้ผลผลิตกรดได้ในปริมาณที่สูง ในขณะที่ถังปฏิกรณ์ชนิด Up-flow Anaerobic Filter (UFAF) ซึ่งมีวัสดุตัวกลางอยู่ภายในทำให้จุลินทรีย์ผลิตมีเทนที่อยู่ภายในถังปฏิกรณ์สามารถเจริญยึดเกาะทำให้ช่วยลดการสูญเสียจุลินทรีย์ออกจากระบบ สำหรับการใช้ถังปฏิกรณ์แบบสองขั้นตอนที่มีการเชื่อมต่อแบบอนุกรมระหว่างถังปฏิกรณ์ UASB และถังปฏิกรณ์ UFAF ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มจึงเป็นแนวทางหนึ่งในการลดมลพิษให้กับสิ่งแวดล้อมและได้ก๊าซมีเทนซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนให้กับโรงงานได้

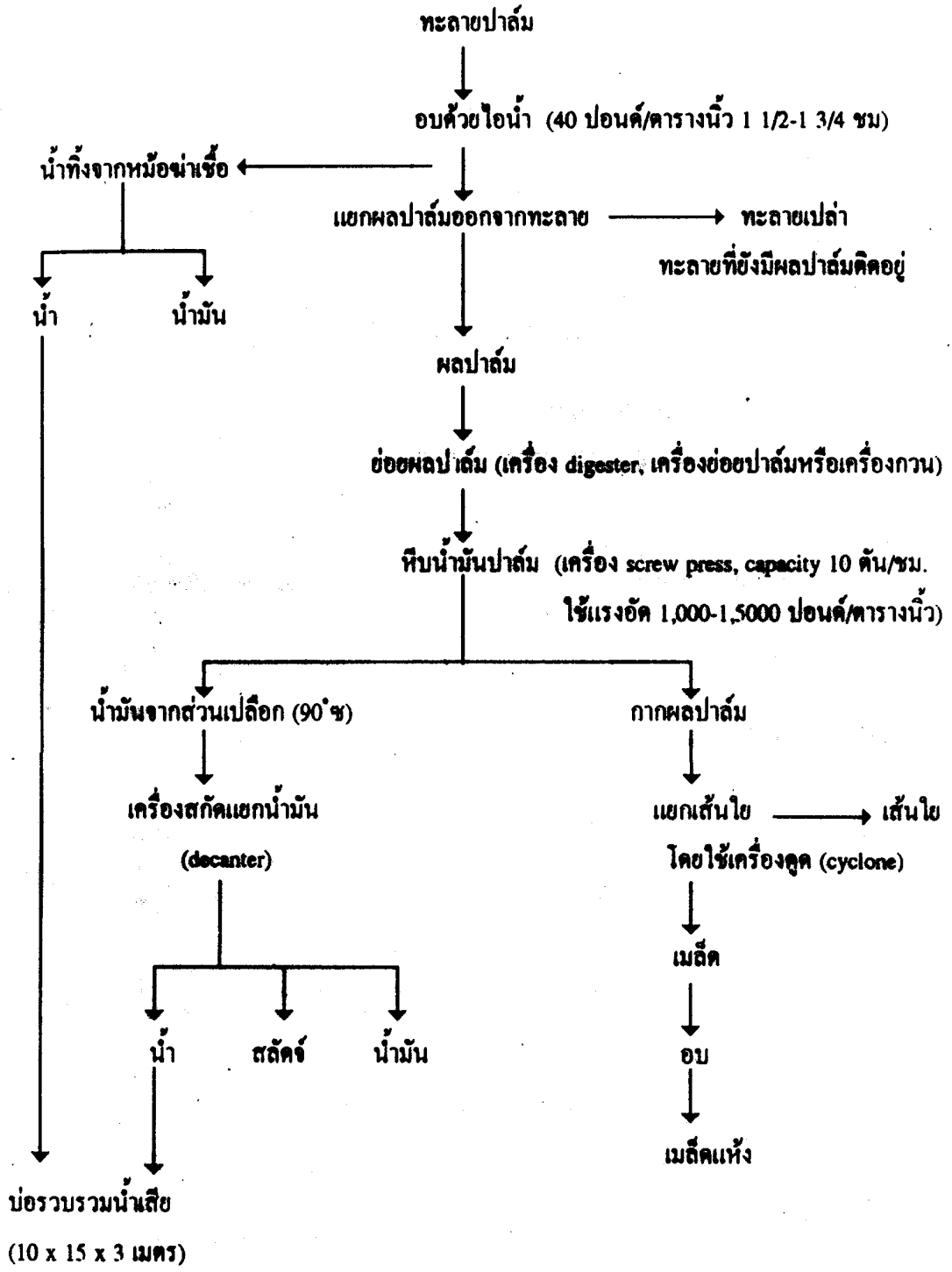
2. ตรวจเอกสาร

2.1. แหล่งที่มาและคุณสมบัติของน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

2.1.1 กระบวนการผลิตน้ำมันปาล์ม

กระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มในประเทศแบ่งได้ 3 แบบ (ผาสุข กุลวนิชย์ และคณะ, 2534) ได้แก่ กระบวนการผลิตแบบมาตรฐานหรือแบบใช้น้ำ กระบวนการผลิตแบบย่างผลปาล์ม และกระบวนการผลิตแบบทอดผลปาล์ม ในบรรดากระบวนการผลิตทั้งหมดนี้มีเพียงกระบวนการผลิตแบบใช้น้ำเท่านั้นที่ก่อให้เกิดน้ำเสียขึ้นซึ่งทางโรงงานจำเป็นต้องทำการบำบัด ในขณะที่กระบวนการผลิตแบบย่างผลปาล์มซึ่งจัดเป็นการผลิตแบบแห้ง (พูนสุข ประเสริฐสรรพ์ และคณะ, 2533) โดยเป็นระบบที่มีการใช้ความร้อนแห้งในกระบวนการสกัดน้ำมัน ส่วนการผลิตแบบทอดผลปาล์มนั้นจะใช้น้ำมันปาล์มเป็นตัวสกัดน้ำมันออกจากผลปาล์มโดยตรงจึงไม่ก่อให้เกิดน้ำเสียจากกระบวนการสกัดน้ำมัน

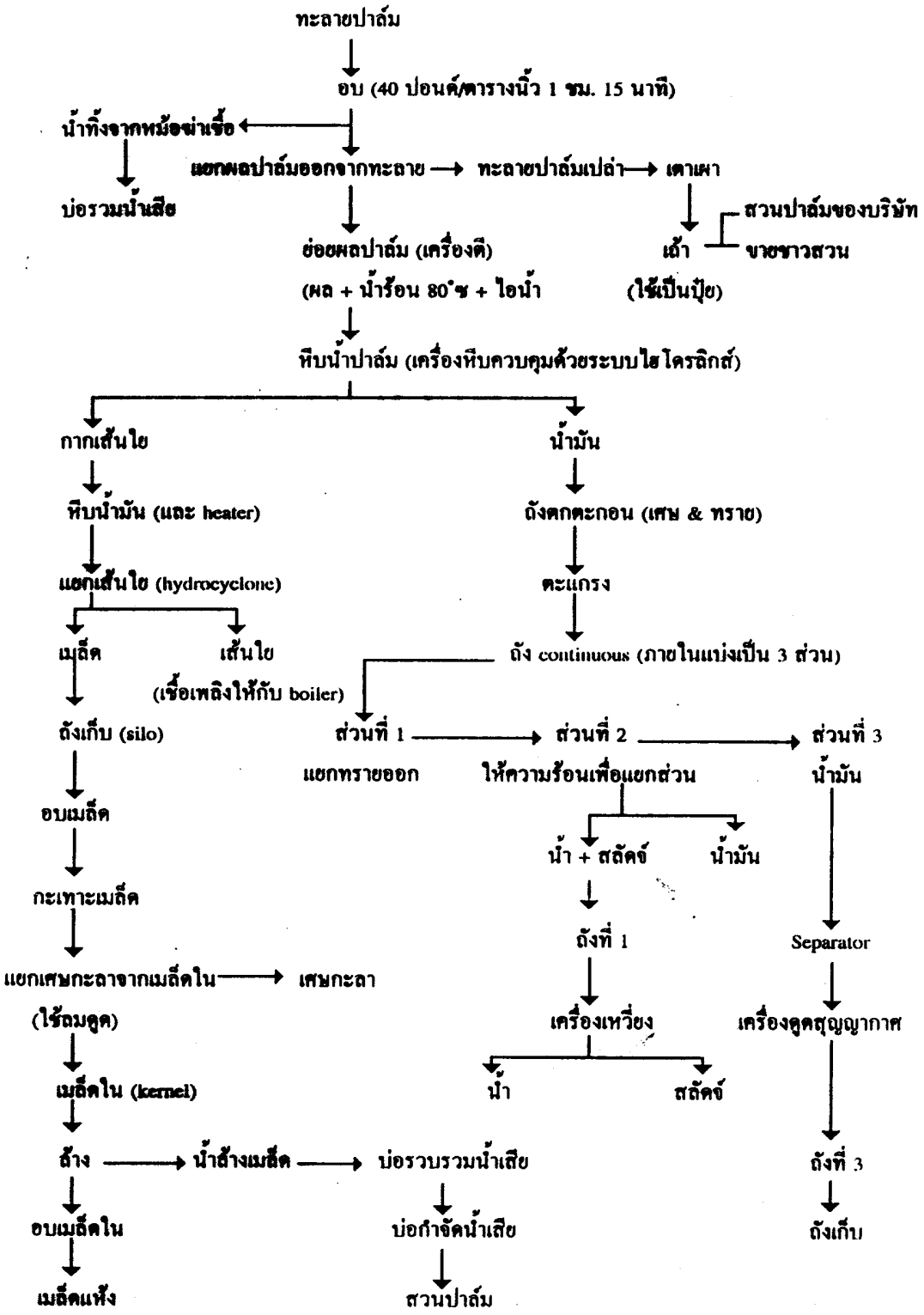
กระบวนการแบบใช้น้ำจัดเป็นแบบมาตรฐานแบ่งเป็น 2 แบบ (ภาพที่ 1 และ 2) เริ่มจากการนำทะลายปาล์มสดมาอบด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิระหว่าง 120-130 องศาเซลเซียส ความดันประมาณ 45 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลาประมาณ 45 นาที จุดประสงค์ของการอบเพื่อหยุดปฏิกิริยาไลโปไลซีสที่ทำให้เกิดกรดไขมันอิสระในผลปาล์มและทำให้ผลปาล์มอ่อนนุ่มขั้วหลุดออกจากทะลายปาล์มได้ง่าย ส่วนทะลายปาล์มที่อบแล้วจะถูกนำไปป้อนเข้าเครื่องแยกผลปาล์มออกจากทะลายซึ่งส่วนใหญ่เป็นเครื่องแบบโรตารีหมุนด้วยความเร็วประมาณ 23 รอบต่อนาที ทะลายปาล์มจะถูกลำเลียงเข้าสู่เตาเผาซึ่งจะได้เถ้าที่มีโปแตสเซียมสูง ส่วนผลปาล์มจะถูกนำไปย่อยด้วยเครื่องย่อยผลปาล์มซึ่งมีลักษณะเป็นถังรูปทรงกระบอกภายในมีใบพัดสำหรับกวนผลปาล์มให้ฉีกขาดจากเมล็ดและเซลล์ทำให้น้ำมันแตกตัวออกมาง่าย การหีบน้ำมันโดยจะกวนนานประมาณ 15-20 นาที จากนั้นป้อนเข้าสู่เครื่องหีบแบบเกลียวอัด (Screw press) ส่วนมากเป็นแบบเกลียวคู่ น้ำมันที่สกัดได้จะถูกส่งต่อเข้าถังกรองเพื่อแยกน้ำมันออกจากเศษเส้นใยและสิ่งสกปรกอื่น ๆ โดยใช้เครื่องดีแคนเตอร์ (Decanter) หรือเครื่องซีพาเรเตอร์ (Separator) ซึ่งวิธีหลังนี้จะใช้ควบคู่กับการใช้วิธีตกตะกอนในถังก่อนป้อนเข้าเครื่องเหวี่ยงจากนั้นนำไปไล่ความชื้นให้ได้มาตรฐานแล้วนำไปเก็บในถังน้ำมันขนาดใหญ่เพื่อเตรียมส่งจำหน่ายให้กับโรงกลั่นน้ำมันบริสุทธิ์ต่อไป (ผาสุข กุลวนิชย์ และคณะ, 2534) กระบวนการผลิตแบบนี้จัดเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพสูงสามารถให้ผลผลิตของน้ำมัน เท่ากับ 0.2 ตันต่อทะลายปาล์ม กระบวนการนี้มีกำลังการผลิตสูงได้น้ำมันที่มีมาตรฐานแต่ข้อเสีย คือมีน้ำเสียจากกระบวนการผลิตประมาณ 2.5 ลูกบาศก์เมตรต่อตันของน้ำมันปาล์มที่ผลิตได้



ภาพที่ 1 แผนภูมิการผลิตน้ำมันปาล์มดิบในกระบวนการผลิตแบบใช้น้ำที่มีการใช้เครื่องดีแคนเตอร์

Figure 1. Palm oil extraction by wet process using decanter.

ที่มา: พูนสุข ประเสริฐสรรพ์ และคณะ (2533)



ภาพที่ 2 แผนภูมิการผลิตน้ำมันปาล์มดิบในกระบวนการผลิตแบบใช้น้ำที่มีการใช้เครื่องซีพาเรเตอร์

Figure 2. Palm oil extraction by wet process using separator.

ที่มา: พูนสุข ประเสริฐสรรพ์ และคณะ (2533)

2.1.2 ปริมาณและคุณลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

น้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มมาจากสองขั้นตอน คือ น้ำนึ่งปาล์ม น้ำเสียจากหม้อฆ่าเชื้อ (Sterilizer condensate) และน้ำเสียจากเครื่องดีแคนเตอร์หรือเครื่องซีพาเรเตอร์ ก่อนไหลไปรวมกันเป็นน้ำเสียรวมในบ่อบำบัดน้ำเสียของโรงงาน น้ำเสียจากหม้อฆ่าเชื้อมีประมาณ 200 ลิตร ต่อ 10 ตันทะลายปาล์ม คิดเป็นร้อยละ 2 (ปริมาตรโดยน้ำหนัก) ของทะลายปาล์ม (พูนสุข ประเสริฐสรรพ์ และคณะ, 2533) ส่วนปริมาณน้ำเสียทั้งหมดคิดเป็นร้อยละ 60 ของปริมาณทะลายปาล์มและมีน้ำมันร้อยละ 2 ปนอยู่ในน้ำทิ้งจากหม้อฆ่าเชื้อหรือมีน้ำเสีย 2.5-3.0 เท่าของปริมาณน้ำมันที่ผลิตได้

จากการสำรวจปริมาณน้ำเสียของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มในประเทศมาเลเซีย โดย Porim และคณะ (1981) อ้างโดย อรัญ หันพงศ์กิตติกูล และคณะ (2537) กล่าวว่าน้ำเสียส่วนใหญ่มาจากหม้อฆ่าเชื้อซึ่งมีปริมาณ 0.9 ลูกบาศก์เมตรต่อตันของน้ำมัน น้ำเสียจากเครื่องแยกกรวดทราย 0.1-0.2 ลูกบาศก์เมตรต่อตันของน้ำมัน น้ำเสียจากเครื่องแยกซีพาเรเตอร์และดีแคนเตอร์ 1.5 ลูกบาศก์เมตรต่อตันของน้ำมัน โดยน้ำเสียรวมมีประมาณ 2.5 ลูกบาศก์เมตรต่อตันของน้ำมันที่ผลิตได้ น้ำเสียที่เกิดจากการหีบผลปาล์มจะมีสภาพเป็นกรดและมีสารอินทรีย์อยู่ในปริมาณสูง นั่นคือ พีเอชมีค่าตั้งแต่ 3.0 ถึง 4.6 และ ซีโอดีมีค่าตั้งแต่ 15.1 จนถึง 65.1 กรัม/ลิตร ลักษณะของการหีบน้ำมันปาล์มซึ่งมีสารอินทรีย์ปนเปื้อนอยู่ในปริมาณสูง สำหรับการบำบัดในสภาวะไร้อากาศพบว่าสามารถเปลี่ยนของเสียไปเป็นก๊าซมีเทนซึ่งสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิง โดยกระบวนการบำบัดนี้จะให้ผลผลิตชีวมวลต่ำและต้องการสารอาหารน้อยเป็นผลให้ตะกอนที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อย (Nagatsuta-cho and Yokohama, 1999)

คุณลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับแหล่งที่มา ได้แก่ บ่อรวบรวมน้ำเสีย น้ำเสียจากหม้อฆ่าเชื้อ และน้ำเสียจากเครื่องดีแคนเตอร์ หรือเครื่องเหวี่ยงแยก สำหรับคุณลักษณะโดยรวมของน้ำเสียจากแหล่งต่างๆ โดยน้ำเสียที่ได้รับมาจากบ่อน้ำเสียรวมพบว่ามีค่า บีโอดี เท่ากับ 57.38 กรัม/ลิตร ซีโอดี เท่ากับ 73.23 กรัม/ลิตร ของแข็งทั้งหมด เท่ากับ 68.98 กรัม/ลิตร ของแข็งแขวนลอย เท่ากับ 35.25 กรัม/ลิตร และไขมันเท่ากับ 1.23 กรัม/ลิตร เฉลี่ยสูงกว่าน้ำเสียจากเครื่องดีแคนเตอร์หรือเครื่องหมุนเหวี่ยงมีค่าต่างๆ เฉลี่ย เท่ากับ 33.19 52.91 23.63 11.60 และ 0.005 กรัม/ลิตร ตามลำดับ ในขณะน้ำเสียจากหม้อฆ่าเชื้อมีค่าซีโอดี เท่ากับ 75.60 กรัม/ลิตร และของแข็งทั้งหมด เท่ากับ 75.56 กรัม/ลิตร เฉลี่ยสูงกว่าน้ำเสียจากบ่อรวบรวมน้ำเสีย (พูนสุข ประเสริฐสรรพ์ และคณะ, 2533)

เมื่อศึกษาคุณลักษณะน้ำเสียจากขั้นตอนการผลิตต่าง ๆ ของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม จำนวน 4 โรงงาน (ตารางที่ 1) (อรัญ หันพงศ์กิตติกูล และคณะ, 2537) พบว่าน้ำเสียจากหม้อนึ่งมีปริมาณสารแขวนลอยต่ำ (เฉลี่ย 10.30 กรัม/ลิตร) และมีน้ำมันค่อนข้างสูง (เฉลี่ย 14.57 กรัม/ลิตร) น้ำเสียจากเครื่องซีพาเรเตอร์มีน้ำมันเหลืออยู่ เท่ากับ 12.78 กรัม/ลิตร ในขณะที่น้ำเสียจากเครื่องดีแคนเตอร์มีน้ำมัน เท่ากับ 15.21 กรัม/ลิตร น้ำเสียจากบ่อพักน้ำเสียรวมและน้ำเสียจากบ่อดักน้ำมันสุดท้ายมีน้ำมัน เท่ากับ 9.45 และ 11.36 กรัม/ลิตร ตามลำดับ

ตารางที่ 1 คุณลักษณะน้ำเสียโดยเฉลี่ยจากโรงงานน้ำมันปาล์ม 4 โรงงาน

Table 1. The characteristic of palm oil mill wastewater show the average data from 4 factories.

โรงงานผลิตน้ำมันปาล์ม	พีเอช	อุณหภูมิ (°ซ)	ซีโอดี (มก/ล)	บีโอดี (มก/ล)	ของแข็งละลายน้ำ (ก/ล)	ไขมันและน้ำมัน (ก/ล)
บ. เอเชี่ยนน้ำมันปาล์ม จำกัด[ก]						
	4.65	64.90	113,960	59,389	26.30	14.70
บ. ทักษิณปาล์ม จำกัด[ข]						
	4.58	64.90	68,344	30,704	20.80	7.60
บ. สยามน้ำมันปาล์มและอุตสาหกรรม จำกัด[ค]						
	4.67	63.40	42,644	21,450	5.20	14.20
บ. อุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม จำกัด[ข]						
	4.53	54.10	57,641	29,100	17.50	7.70
ค่าเฉลี่ย	4.61	66.30	70,647	35,160	17.50	11.10
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน						
	0.06	3.70	26,249	14,149	7.80	3.40

หมายเหตุ ก - ใช้เฉพาะเครื่องดีแคนเตอร์

ข - ใช้ทั้งเครื่องซีพาเรเตอร์ และ เครื่องดีแคนเตอร์

ค - ใช้เฉพาะเครื่องซีพาเรเตอร์

ที่มา: อรัญ หันพงศ์กิตติกูล และคณะ (2537)

นำเสียของโรงงานสกัดน้ำมันที่สำรวจโดยมีปริมาณ เท่ากับ 0.87 ลูกบาศก์เมตร/ ตันทะลายปาล์มสด ซึ่งมีค่าซีโอดี บีโอดี สารแขวนลอย และน้ำมัน เท่ากับ 52.45 26.59 12.84 และ 8.72 กิโลกรัม/ตันทะลายปาล์มสด Porim และคณะ (1981) อ้างโดย อรัญ หันพงศ์กิตติกูล และคณะ (2537) กล่าวว่าน้ำเสียรวมมีค่าเฉลี่ยต่างๆ กัน คือ พีเอช เท่ากับ 4.1 ซีโอดี เท่ากับ 53,630 มิลลิกรัม/ลิตร บีโอดี เท่ากับ 25,000 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าปริมาณมวลสารในรูปของค่าซีโอดี บีโอดี สารแขวนลอย และน้ำมันที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสีย เท่ากับ 134 62.50 47.50 และ 20.92 กิโลกรัม/ตันของน้ำมันที่ผลิตได้ ตามลำดับ นอกจากนี้น้ำเสียยังประกอบด้วยอินทรีย์สารและแร่ธาตุต่างๆ ที่สำคัญ Okiy และคณะ อ้างโดย อารีย์ กังแฮ (2536) กล่าวว่าน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มมีสารอินทรีย์รวมทั้งแร่ธาตุต่าง ๆ อยู่สูงซึ่งจะก่อให้เกิดปัญหามลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมได้

2.2. การผลิตก๊าซมีเทน (Methane Production)

2.2.1. กระบวนการผลิตก๊าซมีเทน (Process Methane Production)

ก๊าซชีวภาพเป็นก๊าซที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายอินทรีย์สารโดยแบคทีเรียในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน (Anaerobic digestion) องค์ประกอบส่วนใหญ่ของก๊าซชีวภาพ คือ ก๊าซมีเทน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาซึ่งอินทรีย์สารจะถูกย่อยสลายและบางส่วนจะถูกนำไปใช้เพื่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย สำหรับการเกิดกระบวนการนี้ซึ่งค่อนข้างซับซ้อนเพราะต้องอาศัยแบคทีเรียหลายชนิดและขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบที่นำมาใช้ ปฏิกิริยาของกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนมีดังนี้

$$\text{อินทรีย์สาร} \xrightarrow{\text{แบคทีเรีย}} \text{อินทรีย์สารที่ย่อยสลายแล้ว} + CH_4 + CO_2 + \text{ก๊าซอื่นๆ}$$

ผลผลิตที่สำคัญของกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยาแบบไร้อากาศ คือ ก๊าซมีเทน ซึ่งในกระบวนการผลิตก๊าซมีเทนจะอาศัยแบคทีเรียที่สำคัญอยู่ 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ไม่สร้างมีเทน (non-methanogenic bacteria) และกลุ่มที่สร้างมีเทน (Methanogenic bacteria) ซึ่งแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้ (Tchobonoglous, 1979; Gray, 1981; Tchobanoglous and Burton, 1991)

ก. การย่อยสลาย (Hydrolysis)

อินทรีย์สารที่อยู่ในรูปโมเลกุลใหญ่ซึ่งแบคทีเรียไม่สามารถย่อยสลายได้ทันที ซึ่งจำเป็นต้องทำให้เกิดการแตกตัวเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กเสียก่อนโดยอาศัยเอนไซม์ที่ปล่อยมาจากแบคทีเรียช่วยเร่งให้เกิดการแตกตัว โมเลกุลของอินทรีย์สารบางชนิดจะถูกดูดซึมเข้าสู่เซลล์ของ

แบคทีเรียได้โดยตรงสำหรับการย่อยสลายของสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ ได้แก่ ไขมัน โพลีแซคคาไรด์ โปรตีน และ กรดนิวคลีอิก ให้อยู่ในรูปของสารประกอบอินทรีย์ที่มีขนาดเล็กลง เช่น กรดไขมัน โมโนแซคคาไรด์ ไดแซคคาไรด์ กรดอะมิโนพิวรีน และไพริมิดีน โดยอาศัยกลุ่มแบคทีเรียพวกไม่สร้างมีเทนที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียโดยทั่วไป เช่น *Clostridium* sp. ซึ่งเป็นแบคทีเรียแกรมลบที่มีคุณสมบัติในการสร้างสปอร์และผลิตเอนไซม์โปรติเอส พบประมาณ 6.5×10^{7} สปอร์/มิลลิลิตร ลักษณะเซลล์รูปแท่งและรูปกลมมีคุณสมบัติในการผลิตเอนไซม์ไลเปส นอกจากนี้ยังมีแบคทีเรียแกรมลบรูปกลม เช่น *Bactereroide sruminicola* พบประมาณ 10^{4} -10^{8} เซลล์/มิลลิลิตร ซึ่งมีคุณสมบัติในการผลิตเอนไซม์เซลลูเลส นอกจากนี้ยังพบแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบอีกหลายชนิดที่แยกได้จากกากตะกอนซึ่งมีคุณสมบัติในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียได้ สำหรับประเภทและชนิดของแบคทีเรียที่พบในแต่ละขั้นตอนนี้จะขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของน้ำเสีย โดยขั้นตอนนี้เป็นเพียงการเปลี่ยนรูปของสารประกอบอินทรีย์เท่านั้น (Gray, 1981)

ข. การสร้างกรด (Acid Formation, Acidogenisis)

ขั้นตอนนี้แบคทีเรียจะย่อยสลายสารโมเลกุลที่เล็กลงซึ่งเกิดจากการแตกตัวของสารโมเลกุลใหญ่จากขั้นตอนแรกเปลี่ยนเป็นกรดอินทรีย์ (Organic acid) ได้แก่ กรดอะซิติก น้ำ และ คาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น โดยอาศัยกลุ่มของแบคทีเรียที่อยู่ได้ทั้งในสภาพที่มีออกซิเจนหรือไม่มีออกซิเจน (Facultative bacteria) หรือ อาจเรียกว่าเป็นพวก Acid former bacteria ขั้นตอนนี้จะอาศัยแบคทีเรียกลุ่มที่สร้างกรด เช่น *Bacillus* sp., *Micrococcus* sp., *Clostridium* spp., *Pseudomonas* sp., *Peptococcus anaerobus*, *Bifidobacterium* spp. *Desulphoribrio* spp. *Corynebacterium* spp. *Lactobacillus*, *Actinomyces*, *Staphoribrio* และ *Escherichia coli*. โดยส่วนใหญ่เป็นแบคทีเรียชนิดที่ไม่ต้องการอากาศร้อยละ 99 และพบแบคทีเรียพวกกึ่งต้องการอากาศเพียงร้อยละ 1 เท่านั้น แบคทีเรียเหล่านี้จัดอยู่ในกลุ่มพวกที่ไม่สร้างก๊าซมีเทนซึ่งจะใช้สารประกอบเคมีโมเลกุลเล็ก ได้แก่ โมโนแซคคาไรด์ ไดแซคคาไรด์ กรดไขมันกรีเซอไรด์ กรดอะมิโน และ เปปไทด์ ที่ได้จากการย่อยสลายสารอินทรีย์ในขั้นตอนแรกเป็นแหล่งคาร์บอนในการเจริญเติบโตโดยผลผลิตหลักที่สำคัญจากกระบวนการนี้ คือ กรดไขมันระเหยง่าย (Volatile Fatty Acid; VFA) คาร์บอนไดออกไซด์ และ แอมโมเนีย

สำหรับ แอมโมเนีย อัลดีไฮด์ และ คีโตน ที่ถูกสร้างขึ้นนี้จัดเป็นผลิตภัณฑ์รองโดยผลผลิตเหล่านี้เป็นสารตัวกลางที่ถูกเปลี่ยนรูปต่อไปเป็นก๊าซมีเทนโดยเฉพาะอย่างยิ่งกรดไขมันระเหยง่าย ได้แก่ กรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิค กรดบิวทิริก และ กรดแลกติก จะเป็นผลิตภัณฑ์หลักที่ถูกเปลี่ยนรูปไปเป็นมีเทน มีรายงานว่ากรดอะซิติกซึ่งเป็นกรดที่พบมากที่สุดในกระบวนการหมักคิดเป็นร้อยละ 72 ซึ่งเป็นกรดไขมันที่สามารถเปลี่ยนรูปเป็นก๊าซมีเทนได้มากที่สุด ในขณะที่กรดโพพิโอนิคและกรดไขมันสายยาวจะถูกย่อยสลายต่อโดยโฮโมอะซิโตจินิคแบคทีเรีย (Homoacetogenic bacteria) เกิดเป็น กรดอะซิติก ฟอร์เมท ไฮโดรเจน และ คาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งสารกลุ่มนี้จะเป็นสารตัวกลางในการเปลี่ยนรูปไปเป็นมีเทนเช่นกัน

ค. การสร้างมีเทน (Methane Formation, Methanogenesis)

ในขั้นตอนนี้แบคทีเรียอีกกลุ่มหนึ่งซึ่งเรียกว่า Methanogens หรือ Methane forming bacteria ซึ่งสามารถเปลี่ยนกรดอะซิติกและก๊าซไฮโดรเจนไปเป็นก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ แบคทีเรียพวกนี้เป็นชนิดที่ต้องอยู่ในสภาพที่ไร้ออกซิเจนจริงๆ (Obligate anaerobic bacteria) ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนนี้จะขึ้นอยู่กับปริมาณของกรดอะซิติกโดยแบคทีเรียกลุ่มที่สร้างก๊าซมีเทนเปลี่ยนกรดอะซิติกและไฮโดรเจนเป็นก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งจะเกิดขึ้นภายใต้สภาวะไร้อากาศเท่านั้น (Strict anaerobes) แบคทีเรียกลุ่มที่สร้างก๊าซมีเทนนี้เมื่อจำแนกสายพันธุ์แล้วพบว่าจะคล้ายกับแบคทีเรียกลุ่มที่พบในกระเพาะอาหารของสัตว์เคี้ยวเอื้องและกลุ่มที่พบในถังตกตะกอนสารอินทรีย์จากแม่น้ำและทะเลสาบ ได้แก่ แบคทีเรียที่อยู่ในอันดับ Methanobacterial เช่น *Methanobacterium formicicium* และ *Methanobrevibacter arboriphilus* แบคทีเรียที่อยู่ในอันดับ Methanococales เช่น *Methanococcus rannielii* และ *Methanococcus roltae* และแบคทีเรียที่อยู่ในอันดับ Methanomicrobiales เช่น *Methanomicrobium mobile* และ *Methanosarcina barkeri* ซึ่งปริมาณของแบคทีเรียในกลุ่มนี้จะพบอยู่ในช่วง 10^6-10^8 เซลล์/ ลูกบาศก์เมตร (Gray, 1981) วิถีการสร้างก๊าซมีเทนของกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศสามารถแบ่งได้เป็นสองวิถีทั้งนี้ขึ้นกับสารตัวกลางที่มีอยู่ในระบบ (Gray, 1981; Tchobanoglous and Burton, 1991)

- วิถีการสร้างมีเทนจากกรดอะซิติก

จะต้องอาศัยแบคทีเรียสองกลุ่มจากสองขั้นตอน คือ การเปลี่ยนกรดโพรพิโอนิคเป็นกรดอะซิติกโดยที่กรดอะซิติกจะสามารถเปลี่ยนไปเป็นก๊าซมีเทนได้ประมาณร้อยละ 72 ของมีเทนทั้งระบบ ดังสมการที่ 1 และ 2

$$\underset{\text{Propionic acid}}{CH_3CH_2COOH} + 0.5\ H_2O \longrightarrow \underset{\text{Acetic acid}}{CH_3COOH} + 0.25\ CO_2 + 0.75\ \underset{\text{Methane}}{CH_4} \quad (1)$$

$$\underset{\text{Acetic acid}}{CH_3COOH} \longrightarrow \underset{\text{Methane}}{CH_4} + CO_2 \quad (2)$$

- วิถีการสร้างมีเทนจากคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน

ฟอร์เมทจะถูกเปลี่ยนรูปไปเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน แล้วถูกเปลี่ยนรูปต่อไปเป็นก๊าซมีเทนซึ่งเป็นวิถีรองของกระบวนการสร้างมีเทน คือ ประมาณร้อยละ 28 ของมีเทนที่ผลิตได้ทั้งระบบ ดังสมการ 3 และ 4

$$\underset{\text{Formate}}{HCOOH} \longrightarrow CO_2 + H_2 \quad (3)$$

$$4H_2 + CO_2 \longrightarrow \underset{\text{Methane}}{CH_4} + 2H_2O \quad (4)$$

2.2.2. ปัจจัยในการเดินระบบบำบัดแบบไร้อากาศ (Operating Factors)

ปัจจัยที่ใช้ควบคุมการเดินระบบบำบัดแบบไร้อากาศให้มีสภาวะเหมาะสมต่อกิจกรรมของแบคทีเรียทั้งชนิดที่ไม่สร้างและชนิดที่สร้างก๊าซมีเทนนั้นจำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยพื้นฐานต่างๆ ของระบบ เช่น การกวน อัตราการป้อนสารอินทรีย์ อุณหภูมิ พีเอช และ ระยะเวลาเก็บกักน้ำเสีย ทั้งนี้เพื่อควบคุมสภาวะแวดล้อมของระบบให้เหมาะสมต่อการเจริญและการเกิดกิจกรรมของแบคทีเรียทั้งสองกลุ่มอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ระบบมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์และผลิตก๊าซมีเทนได้เพิ่มขึ้น (Loehr, 1974; Gray, 1981; Tchobanoglous and Burton, 1991)

ก. อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซมีเทนในถังหมักของแบคทีเรียสามารถแบ่งได้สองช่วง คือ อุณหภูมิปานกลางประมาณ 25-38 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิสูงประมาณ 50-70 องศาเซลเซียส พบว่าที่ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบ

จะต่างจากช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซมีเทนในระบบ คือ ระบบจะต้องการช่วงอุณหภูมิสูงในการผลิตก๊าซมีเทนประมาณ 55 องศาเซลเซียส สำหรับแบคทีเรียที่ชอบอุณหภูมิสูงและที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส สำหรับแบคทีเรียที่ชอบอุณหภูมิปานกลาง แต่หากอุณหภูมิในถังหมักสูงกว่า 63 องศาเซลเซียส จะมีผลยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียในระบบได้ ส่วนช่วงอุณหภูมิการหมักระดับปานกลางซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบ โดยที่อุณหภูมิปานกลางซึ่งมีผลต่อค่าเฉลี่ยอายุตะกอน (Mean Cell Residence Time, MCRT) ในระบบไร้อากาศ โดยช่วงอุณหภูมิระหว่าง 35-40 องศาเซลเซียส ซึ่งระบบจะมีอายุตะกอนน้อยแสดงให้เห็นว่าจุลินทรีย์ในระบบมีประสิทธิภาพสูงในการย่อยสลายสารอินทรีย์และระบบมีอัตราการรับภาระบีโอดีสูงขึ้นเช่นกัน แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับแหล่งของสารอาหารด้วย ดังข้อมูลในตารางที่ 2 และ3 แสดงผลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์และการผลิตก๊าซมีเทนจากแหล่งต่างๆ โดยพบว่าแหล่งน้ำเสียที่มีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบสูง ระบบจะมีอายุตะกอนสูงขึ้นแสดงให้เห็นว่าระบบจะใช้ระยะเวลาในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในถังหมักนาน (Loehr, 1974; Gray, 1981; Yang *et. al*., 1990)

ตารางที่ 2 ผลของอุณหภูมิต่ออายุตะกอนในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ

Table 2. The efffect of temperature on sludge age in anaerobic treatment process.

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อายุตะกอน (วัน)
12	28
20	22
25	18
30	14
35	10
40	8-10

ที่มา: Gray (1981)

ตารางที่ 3 ผลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์และการผลิตก๊าซมีเทนจากน้ำเสียแหล่งต่าง ๆ

Table 3. The effect of temperature on organic digestion efficiency and methane production from the source of wastewater.

แหล่งน้ำเสีย	อุณหภูมิ (^{0}ซ)	อายุตะกอน (วัน)	ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (ก.ซีโอดี/ล.-วัน)	การลดค่าซีโอดี (%)	ของแข็งแขวนลอย (%)	อัตราการผลิตก๊าซ (ล./ล.-วัน)	ประสิทธิภาพการผลิตมีเทน (%)
-ฟาร์มโคนม	35	19-20	0.6-1.0*	82	5.0-7.5	-	58
-ฟาร์มสุกร	33	9	1.4	63	0.8-1.0	0.45	55
-ฟาร์มไก่	37	4	-	-	3.8	2.52	69
-โรงงานแปรรูปมะละกอ	30	15	-	44	15.4	1.03	42
-โรงงานผลิตน้ำมันปาล์ม	27-30	15-16	1.8*	91	4.9	0.934	-

หมายเหตุ: * คิดในรูปค่าบีโอดี

ที่มา: Yang และคณะ (1990)

ข. พีเอช (pH)

ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศโดยมากจะพบปัญหาเรื่องการควบคุมพีเอช เนื่องจากแบคทีเรียในระบบบำบัดต้องการช่วงพีเอชที่เหมาะสมต่อการเจริญต่างกัน คือ แบคทีเรียกลุ่มที่สร้างกรดจะย่อยสลายสารอินทรีย์และผลิตกรดอะซิติกทำให้พีเอชของน้ำเสียลดต่ำลงจาก 7.0-7.5 ซึ่งเป็นช่วงพีเอชที่เหมาะสมต่อการผลิตมีเทนโดยมีทาโนจินิคแบคทีเรีย สำหรับการควบคุมระบบบำบัดแบบไร้อากาศโดยทั่วไปจะควบคุมพีเอชของน้ำเสียในระบบให้อยู่ในช่วง 6.5-8.0 ทั้งนี้เพื่อให้แบคทีเรียแต่ละกลุ่มสามารถเจริญและเพิ่มจำนวนเซลล์ได้อย่างอิสระโดยใช้แอมโมเนียมไบคาร์บอร์เนต (NH_4HCO_3) เป็นบัฟเฟอร์หลักในการควบคุมค่าพีเอชของน้ำเสียในระบบเพราะหากให้พีเอชของน้ำเสียสูงหรือต่ำเกินไปจะเป็นอันตรายต่อแบคทีเรียที่สร้างมีเทนและหากพีเอชลดต่ำลงถึงช่วง 4.5-5.0 จะมีผลให้แบคทีเรียสร้างมีเทนหยุดการเจริญได้ พบว่าการใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) หรือปูนขาว สามารถใช้

ในการปรับพีเอชน้ำเสียของระบบได้ซึ่งจะปรับพีเอชให้อยู่ในช่วง 6.4 - 6.5 หากปรับพีเอชให้สูงกว่านี้อาจมีผลทำให้เกิดการสร้างตะกอนผลึกขึ้นในระบบได้ (Gray, 1981)

NG และคณะ (1985) รายงานการศึกษาจลพลศาสตร์ของการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศของน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่มีค่าซีโอดี ประมาณ 63,000 มิลลิกรัม/ลิตร โดยทำการแยกถังบำบัดเป็นสองถัง คือ ถังที่ใช้สำหรับผลิตกรดและถังที่ใช้สำหรับผลิตมีเทน พบว่าที่สถานะคงตัวของถังปฏิกรณ์ที่ใช้สำหรับผลิตกรดจะมีค่าพีเอช เท่ากับ 6.0 ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมต่อการผลิตกรด ในขณะที่ถังปฏิกรณ์ที่ใช้สำหรับผลิตมีเทนที่สถานะคงตัวของถังปฏิกรณ์จะมีค่าพีเอช เท่ากับ 7.2 ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซมีเทน

ค. อัตราการป้อนสารอินทรีย์ (Organic Loading Rates; OLR)

ในระบบบำบัดน้ำเสียโดยทั่วไปมักจะออกแบบให้สามารถรับอัตราภาระสารอินทรีย์ได้สูงสุดเท่าที่ประสิทธิภาพของระบบจะทำได้ แต่ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศหากให้ระบบมีอัตรารับภาระสารอินทรีย์สูงสุดแล้วจะทำให้ระบบมีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนลดลง ทั้งนี้เนื่องจากกรดไขมันระเหยง่ายจะถูกสร้างและสะสมไว้ในระบบมากเกินไป ซึ่งกรดระเหยนี้จะเกิดในขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์และการสร้างกรดไขมันระเหยง่ายของแบคทีเรียชนิดที่ไม่สร้างมีเทนทำให้พีเอชของน้ำเสียในถังหมักลดต่ำลง ซึ่งมีผลทำให้เกิดการยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียกลุ่มที่สร้างมีเทนประกอบกับแบคทีเรียที่สร้างมีเทนจะมีอัตราการเจริญช้ากว่าแบคทีเรียที่สร้างกรดถึง 4 เท่า ทำให้ไม่สามารถเจริญและใช้กรดไขมันระเหยง่ายเพื่อผลิตมีเทนได้ทันจึงส่งผลให้ระบบเกิดการสะสมของกรดดังกล่าวขึ้น สำหรับปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายที่เหมาะสมต่อการเจริญของแบคทีเรียกลุ่มที่สร้างมีเทนควรอยู่ในช่วง 250-1,000 มิลลิกรัม/ลิตร หากในระบบสะสมปริมาณของกรดไขมันระเหยง่ายเกินกว่า 1,800-2,000 มิลลิกรัม /ลิตร ซึ่งส่งผลให้พีเอชของน้ำเสียในระบบลดต่ำลงมากทำให้แบคทีเรียกลุ่มที่สร้างมีเทนหยุดการเจริญซึ่งแสดงว่าระบบมีอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์สูงเกินไป (Gray, 1981)

อัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่เหมาะสมของระบบบำบัดแบบไร้อากาศโดยทั่วไปควรอยู่ในช่วงประมาณ 1.5 กิโลกรัมบีโอดี/ลูกบาศก์เมตร/วัน และหากคิดอัตราการป้อนสารอินทรีย์ในรูปของของแข็งระเหยทั้งหมด (Total Volatile Solids, TVS) โดยควรอยู่ในช่วงประมาณ 0.64-1.12 กิโลกรัมของแข็งระเหยทั้งหมด/ลูกบาศก์เมตร/วัน แต่หากระบบบำบัดได้ออกแบบให้มีระบบควบคุมอุณหภูมิของถังหมักให้อยู่ในช่วงอุณหภูมิสูงได้ ทำให้ระบบสามารถรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ได้เพิ่มสูงขึ้นได้เช่นกัน คือ จะเพิ่มขึ้นเป็น 1.60-8.01 กิโลกรัมของแข็งระเหยทั้งหมด /ลูกบาศก์เมตร/วัน (Loehr, 1974)

ง. ความต้องการสารอาหาร (Nutritional Requirements)

ความต้องการสารอาหารจะเกี่ยวข้องกับอัตราการเจริญของจุลินทรีย์ในระบบบำบัด ซึ่งปกติสารอาหารต่าง ๆ เช่น ไขมัน โปรตีน เยื่อใย และคาร์โบไฮเดรต จะมีอยู่ในน้ำเสียแล้ว โดยจะคิดในรูปของของแข็งแขวนลอยและของแข็งละลาย ทั้งนี้อาจมีปริมาณแตกต่างกันขึ้นอยู่กับประเภทและแหล่งของน้ำเสียเอง อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมสำหรับการผลิตมีเทนของระบบควรอยู่ในช่วง 10-16 : 1 และอัตราส่วนอาจจะเพิ่มเป็น 30 : 1 ได้ หากน้ำเสียมีสารอินทรีย์คาร์บอนสูงมาก ๆ ในขณะที่อัตราส่วนระหว่างไนโตรเจน: ฟอสฟอรัส คือ 7 : 1 การเติมสารอาหารในระบบไร้อากาศกระทำเช่นเดียวกันกับระบบบำบัดแบบให้อากาศ แต่ปริมาณสารอาหารที่เติมจะน้อยกว่า

นอกจากนี้อัตราส่วนของค่าบีโอดี : ไนโตรเจน : ฟอสฟอรัส ที่เหมาะสมต่อการผลิตมีเทนควรมีอัตราส่วน เท่ากับ 100 : 0.5 : 0.1 และหากคิดในรูปค่า ซีโอดี :ไนโตรเจน : ฟอสฟอรัส ควรอยู่ในช่วง 42-150 : 0.7 : 0.1 ซึ่งการควบคุมให้ระบบมีอัตราส่วนของสารอาหารที่เหมาะสมมีผลทำให้ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุด (Gray, 1981)

จ. วิธีการเติมตะกอนเซลล์ในถังหมัก (Method of Sludge Addition to Digester)

ในการเริ่มต้นระบบบำบัดน้ำเสียไม่ว่าจะเป็นแบบให้อากาศหรือไร้อากาศ โดยจำเป็นต้องมีการเติมตะกอนเซลล์จุลินทรีย์เข้าสู่ถังหมัก จากนั้นทำการเพิ่มความเข้มข้นของเซลล์จุลินทรีย์ขึ้นโดยทำการปรับสภาวะของจุลินทรีย์ให้คุ้นเคยกับสารอาหารและสภาพแวดล้อมใหม่ๆ ในถังเตรียมเชื้อเริ่มต้น ประมาณ 2-3 วัน ก่อนนำไปใช้ซึ่งจะทำให้จุลินทรีย์สามารถขยายและเพิ่มจำนวนเซลล์ได้มากและเร็วขึ้นซึ่งปกติจะใช้อัตราส่วนของตะกอนเซลล์จุลินทรีย์ : น้ำเสีย ประมาณ 1 : 10 - 1 : 5 สำหรับการเริ่มต้นเดินระบบบำบัดแบบไร้อากาศ (Gray, 1981)

ฉ. การกวน (Mixing)

การกวนนอกจากจะมีจุดประสงค์เพื่อให้จุลินทรีย์มีโอกาสสัมผัสกับสารอาหารและกระจายตัวไปทั่วถังหมักแล้วยังมีจุดประสงค์อื่นๆ อีก คือ (Gray, 1981)

- เพื่อรักษาระดับอุณหภูมิภายในถังหมักให้มีระดับเดียวกันทั้งถัง
- เพื่อกระจายสารพิษ เช่น โลหะหนักและกรดอะซิติกให้กระจายไปทั่วถังทั้งนี้เพื่อลดการสะสมของสารพิษ ณ จุดใดจุดหนึ่งของถังหมักซึ่งจะมีผลต่อการยับยั้งกิจกรรมของแบคทีเรียที่รุนแรงมากขึ้น

- เพื่อป้องกันมิให้เกิดการแยกชั้นของตะกอนลอยพวกไขมันและน้ำมันตรงบริเวณผิวหน้าของถังหมักให้เกิดเป็นฝ้าไข
- เป็นการส่งเสริมให้ก๊าซแยกตัวออกจากชั้นตะกอนบริเวณก้นถังหมักได้ง่ายขึ้น

วิธีการกวนในระบบไร้อากาศอาจจะใช้ใบพัดกวนน้ำเสียอย่างช้าๆ หรือใช้วิธีให้น้ำตะกอนไหลเวียนในถังหมักหรืออาจใช้วิธีให้ก๊าซจากระบบไหลขึ้นสู่ด้านบนของถังหมักเพื่อดันเอาตะกอนและน้ำเสียให้ไหลไปทั่วถังหมัก การกวนเป็นสิ่งจำเป็นมากสำหรับระบบบำบัดน้ำเสียขนาดใหญ่ ทั้งนี้เพื่อรักษาระดับของของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยในถังหมักให้มีปริมาณสม่ำเสมอทั่วทั้งถังหมักและเพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพสูงสุด ปริมาณของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยในถังหมักที่มีระบบการกวนและไม่มีระบบการกวน โดยพบว่าในถังหมักที่ไม่มีระบบการกวนปริมาณของแข็งทั้งสองชนิดจะมีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอตลอดแนวลึกของถังหมักซึ่งตรงข้ามกับถังหมักที่มีระบบการกวนปริมาณของแข็งทั้งสองชนิดจะมีปริมาณใกล้เคียงกันตลอดแนวลึกของถัง (Loehr, 1974)

ช. สารยับยั้งในกระบวนการ (Process Inhibitor)

โดยทั่วไปน้ำเสียจะมีสารยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์อยู่มากมายหลายชนิด เช่น สารทำความสะอาด โลหะหนัก และแอมโมเนีย ซึ่งสารเหล่านี้บางส่วนจะถูกกำจัดออกจากน้ำเสียในขั้นตอนของการตกตะกอนทางเคมี แต่เนื่องจากแบคทีเรียกลุ่มที่สร้างมีเทนมีความอ่อนไหวต่อสารยับยั้งได้ง่ายเมื่อเทียบกับแบคทีเรียกลุ่มที่ย่อยสลายสารอินทรีย์และกลุ่มที่สร้างกรด ดังนั้นหากน้ำเสียในระบบมีสารยับยั้งการเจริญอยู่สูงก็จะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนของระบบลดลง เนื่องจากแบคทีเรียกลุ่มที่สร้างมีเทนหยุดการเจริญซึ่งต้องเสียเวลาในการเติมเชื้อเริ่มต้นและเดินระบบใหม่ ดังนั้นหากมีการควบคุมไม่ให้มีสารยับยั้งเกินกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้จะส่งผลให้ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียและสามารถเดินระบบได้นาน(Loehr, 1974; Mosey, 1976; Tchobanoglous, 1979; Ramalho, 1983; Gray, 1981)

- สารทำความสะอาด (Detergents)

สารทำความสะอาดทั้งประเภทที่ไม่มีประจุและที่มีประจุบวกจะมีผลต่อแบคทีเรียในถังหมักแบบไร้อากาศน้อยกว่าเมื่อเทียบกับสารทำความสะอาดที่มีประจุลบเป็นองค์ประกอบหากมีปริมาณเกินกว่าร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักตะกอนเซลล์แห้ง ซึ่งจะมีผลยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียกลุ่มที่สร้างมีเทนได้ เนื่องจากผงซักฟอกประเภทดังกล่าวมีอัลคิลเบนซินซัลโฟเนส

(Alkyl Benzene Sulphonates, ABS) เป็นองค์ประกอบ ซึ่งสาร ABS นี้จะไม่ถูกย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศ ดังนั้นจึงทำให้เกิดการสะสมขึ้นในระบบได้และมีผลโดยตรงต่อจำนวนแบคทีเรียของในระบบด้วย มีรายงานว่าแบคทีเรียที่อยู่ในกากตะกอนของโรงบำบัดน้ำเสียแหล่งชุมชนสามารถปรับตัวได้หากในน้ำเสียมีปริมาณ ABS ร้อยละ 1.5 แต่จะเกิดการยับยั้งได้หากมีสาร ABS ในระบบเกินกว่าร้อยละ 2.0 ของน้ำหนักตะกอนเซลล์แห้ง

- **สารประกอบคลอรีนไฮโดรคาร์บอน (Chlorinated Hydrocarbon)**

สารประกอบคลอรีนที่ปนเปื้อนในน้ำเสียแหล่งชุมชนส่วนใหญ่มาจากร้านซักแห้ง ภัตตาคาร และโรงแรม ที่ใช้สารประกอบคลอรีนในการซักล้างจำนวนมาก ส่วนน้ำเสียจากโรงงานการปนเปื้อนของสารประกอบคลอรีนเกิดจากการใช้น้ำผสมสารประกอบคลอรีนในการล้างและทำความสะอาดวัตถุดิบ อุปกรณ์ และพื้นโรงงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมผลิตอาหารแช่เย็น แช่เยือกแข็ง สารประกอบคลอรีนจะมีผลต่อการยับยั้งการเจริญและการสร้างก๊าซมีเทนของมีทาโนจินิคแบคทีเรียในระบบ ดังข้อมูลในตารางที่ 4 ปริมาณของสารประกอบคลอรีนชนิดต่างๆ ในถังย่อยสลายตะกอน (Digesting sludge) ที่มีผลยับยั้งกิจกรรมของแบคทีเรียสร้างมีเทนให้ลดลงร้อยละ 20

ตารางที่ 4 ปริมาณสารประกอบคลอรีนไฮโดรคาร์บอนชนิดต่างๆ ในถังบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศที่มีผลยับยั้งกิจกรรมของแบคทีเรียให้ลดลงร้อยละ 20

Table 4. The quality of chlorine hydrocarbon compound in anaerobic digestion process on activity inhibition of bacteria to decreased about 20%.

สารประกอบคลอรีน	ปริมาณความเข้มข้น (มก./กก. น้ำหนักแห้งของตะกอน)
Chloroform	15
Trichlorethane	20
1, 1, 2- Trichlorotrifluorethane	200
Carbon Tetrachloride	200
Trichloroethylene	1,800
Tetrahloroethylene	1,800

ที่มา: Gray (1981)

ในขณะที่คลอโรฟอร์ม ($CHCl_3$) ซึ่งเป็นสารพิษที่มีฤทธิ์ยับยั้งกิจกรรมของมีทาโนจินิคแบคทีเรียโดยพบว่าคลอโรฟอร์มส่วนใหญ่นั้นสามารถระเหยออกจากน้ำเสียได้ในช่วงระหว่างการบำบัดขั้นต้นหรือในช่วงระหว่างที่น้ำเสียไหลไปตามคูระบายน้ำ คลอโรฟอร์มที่ความเข้มข้นน้อยกว่า 10 มิลลิกรัม/กิโลกรัมน้ำหนักตะกอนแห้ง จะมีผลยับยั้งกิจกรรมของแบคทีเรียสร้างมีเทนได้อย่างสมบูรณ์

- โลหะหนัก (Heavy Metals)

โลหะหนักที่มีผลยับยั้งกิจกรรมของแบคทีเรียในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ คือ โครเมียม ทองแดง นิกเกิล แคดเมียม และสังกะสี พบว่าทั้งปริมาณและชนิดของโลหะหนักจะมีผลต่อกิจกรรมของแบคทีเรียที่สร้างมีเทนในถังหมักอย่างมีนัยสำคัญ ดังข้อมูลในตารางที่ 5 แสดงปริมาณของโลหะหนักชนิดต่าง ๆ ในถังบำบัดน้ำเสียและถังกำจัดตะกอนที่ทำให้อัตราการผลิตก๊าซมีเทนลดลงร้อยละ 20 จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ ในขณะที่ทองแดงและสังกะสีที่ความเข้มข้นน้อยกว่า 10 มิลลิกรัม/ลิตร ก็มีผลยับยั้งกิจกรรมของแบคทีเรียกลุ่มที่สร้างมีเทนได้อย่างสมบูรณ์

ตารางที่ 5 ปริมาณของโลหะหนักชนิดต่างๆ ในตะกอนของระบบไร้อากาศที่มีผลให้อัตราการผลิตก๊าซลดลงร้อยละ 20

Table 5. The quality of heavy metal in activated sludge of anaerobic process on biogas production rate to decreased about 20%.

ชนิดของโลหะหนัก	ถังบำบัดน้ำเสียแบบกะ (มก./กก.น้ำหนักแห้งของตะกอน)	ถังกำจัดตะกอนเซลล์ (มก./กก.น้ำหนักแห้งของตะกอน)
นิคเกิล (Nickel)	2,000	30-140
แคดเมียม (Cadmium)	2,200	7-50
ทองแดง (Copper)	2,200	200-800
สังกะสี (Zinc)	3,400	500-3,000

ที่มา: Gray (1981)

ความเป็นพิษของโลหะสามารถทำให้ลดลงได้โดยการเติมซัลไฟด์ลงในถังบำบัด ทั้งนี้เนื่องจากซัลไฟด์ซึ่งเป็นสารสร้างตะกอนผลึกซึ่งจะจับตัวกับโลหะหนักและสามารถตกตะกอนแยกออกจากน้ำเสียได้ การกำจัดโลหะหนักนี้จะทำในขั้นตอนแรกของกระบวนการบำบัดน้ำเสียก่อนปล่อยเข้าสู่ระบบบำบัดแบบไร้อากาศ มีรายงานผลการศึกษาว่าการใช้ซัลไฟด์จำนวน 0.5 มิลลิกรัม/ลิตร สำหรับกำจัดโลหะหนักปริมาณ 1 มิลลิกรัม/ลิตร ออกจากน้ำเสีย หรืออาจจะเติมซัลไฟด์ หรือ ซัลเฟตปริมาณมากกว่าร้อยละ 10 ของปริมาณโลหะหนักที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียความเป็นพิษของ ทองแดง สังกะสี นิกเกิล และเหล็ก จะหมดไปเมื่อเติมซัลไฟด์ยกเว้นโครเมียม สำหรับซัลไฟด์พบว่าสามารถส่งผลกระทบต่อการผลิตมีเทนของเชื้อแบคทีเรียได้เช่นกันหากในระบบมีซัลไฟด์มากกว่า 200 มิลลิกรัม /ลิตร จะมีผลยับยั้งกิจกรรมของมีเทนได้อย่างสมบูรณ์

- แอมโมเนีย (Ammonia)

แอมโมเนียในถังบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศเกิดจากการแตกตัวของสารอินทรีย์ไนโตรเจน เช่นโปรตีน และยูเรีย หรือได้จากการเติมสารประกอบแอมโมเนียเพื่อใช้เป็นด่างในการปรับค่าพีเอชของน้ำเสีย แอมโมเนียในน้ำเสียมีอยู่ด้วยกันสองรูปซึ่งจะอยู่แบบสมดุลกัน คือ แอมโมเนียม (NH_4) และแอมโมเนีย (NH_3) ดังสมการ 5

$$NH_4^+ \longleftrightarrow NH_3 + H^+ \qquad (5)$$

สมดุลของแอมโมเนียนี้จะเป็นบัฟเฟอร์ที่สำคัญของการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศหากน้ำเสียมีปริมาณไนโตรเจนต่ำ แอมโมเนียที่แตกตัวจะถูกจุลินทรีย์นำไปใช้เพื่อการเจริญและสร้างเซลล์ใหม่ทำให้ความเป็นบัฟเฟอร์ลดลงส่งผลให้ความคงตัวของระบบลดลง แอมโมเนียมและแอมโมเนียไนโตรเจนที่เกิดขึ้นในถังหมักของระบบไร้อากาศจะมีผลยับยั้งกิจกรรมการผลิตมีเทนของแบคทีเรียในระบบที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนีย 150 มิลลิกรัม/ลิตร และแอมโมเนียม 3,000 มิลลิกรัม/ลิตร จะมีผลยับยั้งการเจริญและการสร้างมีเทนของมีทาโนจินิคแบคทีเรียในระบบได้โดยไม่เกี่ยวข้องกับค่าพีเอชของน้ำเสียในระบบ

2.3. ชนิดของระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่ใช้กับน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

ชนิดของถังปฏิกรณ์ที่นำมาใช้สำหรับบำบัดน้ำเสียของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ซึ่งมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์จนนำไปสู่การผลิตก๊าซชีวภาพภายใต้สภาวะไร้อากาศ สำหรับระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่มีความสำคัญ ได้แก่ ระบบ Up-flow Anaerobic Sludge Blanket (UASB), Up-flow Anaerobic Filter (UFAF), Down Flow Anaerobic Filter (DFAF) และ Fluidize Bed Reactor (FB) (Hickey *et. al*., 1991) เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศซึ่งมีความสำคัญสำหรับการบำบัดน้ำเสีย การย่อยสลายแบบไร้อากาศซึ่งเป็นกระบวนการที่ไม่ต้องการอากาศและสามารถให้ผลผลิตที่สำคัญ คือ มีเทน ดังนั้นระบบไร้อากาศจึงเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพและสามารถให้ผลผลิตที่เป็นสารพลังงานได้ (Sekiguchi *et. al*., 2001)

การบำบัดน้ำเสียโดยมีทาโนจินิคแบคทีเรียพบว่าจะมีการสร้างตะกอนส่วนเกินน้อยกว่าระบบบำบัดน้ำเสียแบบที่ใช้อากาศ สำหรับผลผลิตของระบบไร้อากาศส่วนใหญ่จะให้ผลผลิตที่มีพลังงานสูงอยู่โดยจะถูกเก็บรักษาอยู่ภายในสารอินทรีย์วัตถุซึ่งสามารถนำไปผลิตเป็นก๊าซชีวภาพ สำหรับระบบบำบัดน้ำเสียส่วนใหญ่จะใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีความสกปรกปานกลางและที่ความสกปรกสูงโดยมีค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand; COD) มากกว่า 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร โดยส่วนใหญ่จะนำไปใช้กับการบำบัดน้ำเสีย (Organic wastewater) และของเสียที่เป็นของแข็ง (Solid wastes) ที่มีอุณหภูมิปานกลางคือที่ 25-40 องศาเซลเซียส (Sekiguchi *et. al*., 2001) สำหรับในระบบไร้อากาศสามารถแบ่งชนิดของระบบออกเป็นสองแบบ คือ ถังบำบัดแบบขั้นตอนเดียวและถังบำบัดแบบสองขั้นตอน (Loehr, 1974; Gray, 1981)

2.3.1. ถังบำบัดขั้นตอนเดียว (Single Stage Digestion)

เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่รวมเอากระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์และกระบวนการตกตะกอนที่สองไว้ในถังบำบัดเพียงใบเดียวและไม่มีระบบกวนผสมจึงทำให้ระบบใช้ระยะเวลาในการเก็บกักน้ำเสียนานกว่าปกติ คือ ประมาณ 30-60 วัน จึงเป็นระบบบำบัดที่เหมาะสมต่อการบำบัดน้ำเสียที่มีค่าบีโอดีต่ำและมีอัตราการไหลของน้ำเสียต่อวันไม่มากนัก เช่น น้ำเสียจากกระบวนการเกษตรกรรมและจากโรงงานอุตสาหกรรมขนาดเล็ก หรือ อาจจะเรียกถังบำบัดชนิดนี้ว่าถังบำบัดแบบไร้อากาศที่มีอัตราการย่อยสลายต่ำ (Low rate anaerobic digestion) หลักการทำงานของระบบเหมือนกับระบบบำบัดแบบไร้อากาศโดยทั่วไป ข้อเสียของระบบนี้ คือ น้ำเสียสามารถไหลลัดวงจรได้ง่าย ส่วนลักษณะของถังบำบัดแบบขั้นตอนเดียวที่มีการกวนผสมมีระบบปรับสภาพของตะกอนเซลล์ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายดีกว่าแบบแรก เนื่องจากจุลินทรีย์สามารถสัมผัสกับสารอินทรีย์แขวนลอยในถังบำบัดได้อย่างทั่วถึง ซึ่งเป็นสาเหตุ

ให้ระบบสามารถรับอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ได้มากขึ้นและใช้ระยะเวลาเก็บกักน้อยลงเหลือประมาณ 15-20 วัน แต่น้ำเสียที่ออกจากถังบำบัดประเภทนี้จะต้องแยกเอาตะกอนเซลล์ออกก่อน ซึ่งอาจเรียกว่าถังบำบัดแบบไร้อากาศชนิดอัตราการย่อยสลายสูง (High rate anaerobic digestion) สำหรับถังบำบัดแบบขั้นตอนเดียวที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียโรงงานผลิตน้ำมันปาล์ม ได้แก่

- Modified Anaerobic Baffled Bioreactor (MABR)

MABR เป็นถังหมักที่พัฒนามาจากถัง Anaerobic Baffled Bioreactor (ABR) เดิม โดยเป็นการปรับปรุงรายละเอียดของถังซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ ได้แก่ การปรับปรุงโดยออกแบบให้ส่วนก้นของถังหมักให้มีขนาดใหญ่และเพิ่มปริมาตรของช่องที่ใช้กั้นโดยแบ่งถังปฏิกรณ์ออกเป็น 5 ส่วน ทำให้จุลินทรีย์สามารถยึดติดกับถังได้เพิ่มขึ้นส่วนของก้นถังหมักทำมุม 45 องศา ขนานกับพื้นดินทำให้อัตราส่วนของ Up come และ Down come มีอัตราส่วน เท่ากับ 4 :1 ทำให้สามารถลดความเร็วของ Up come เป็นการป้องกันการไหลเข้ามาโดยตรงของน้ำเสียเข้าสู่ศูนย์กลางของ Chambers โดยจะมี Baffles วางตั้งฉากกับแนวระนาบอย่างต่อเนื่องสำหรับลดแรงดันของน้ำเสียที่เข้ามา การออกแบบถังปฏิกรณ์ใหม่นี้ทำให้สามารถรองรับระยะเวลาที่ใช้เก็บกักนานขึ้นซึ่งสามารถใช้ในการบำบัดน้ำเสียของโรงงานผลิตน้ำมันปาล์ม โดยพบว่าภายใต้สถานะคงตัวของถังปฏิกรณ์จะสามารถผลิตก๊าซมีเทนอยู่ในช่วงระหว่าง 0.32-0.424 ลิตรมีเทน/ กรัมของซีโอดีถูกใช้ไป โดยสามารถให้ผลผลิตมีเทนร้อยละ 67.3-71.2 ในขณะที่ใช้ระยะเวลาในการเก็บกักน้ำเสีย (Hydraulic Retention Time; HRT) เป็นเวลา 3-10 วัน สามารถลดค่าซีโอดีได้เท่ากับร้อยละ 87.4-95.3 ไขมันและน้ำมันได้เท่ากับร้อยละ 44.1-91.3 ตามลำดับ (Faisal and Hajime, 2001)

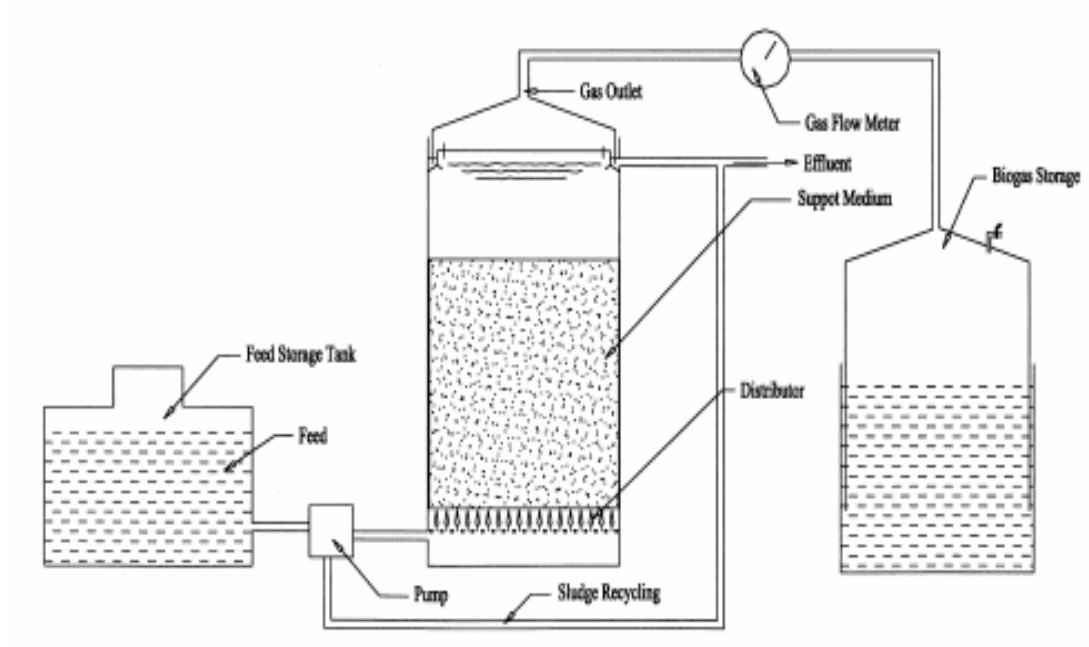
ระบบนี้สามารถผลิตกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมดโดยมีค่าสูงสุด เท่ากับ 1,450 มิลลิกรัม/ลิตร ในขณะที่ใช้ระยะเวลาในการเก็บกัก เท่ากับ 3.0 วัน ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีต่ำ ความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยง่ายจะลดลงเมื่อระยะเวลาที่ใช้ในการเก็บกักยาวนานขึ้น ในขณะที่ค่าพีเอชของระบบพบว่าจะค่อนข้างคงที่อยู่ในช่วง 6.90-7.02 ที่ระยะเวลาเก็บกักแตกต่างกัน ถังปฏิกรณ์ชนิด MABR เป็นระบบที่สามารถรักษากิจกรรมของมีทาโนจินิคแบคทีเรีย โดยระยะเวลาเก็บกักที่ยาวนานซึ่งจะทำให้สามารถเปลี่ยนอินทรียวัตถุไปเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้าย คือ มีเทนในอัตราที่สูงโดยไม่มีการสะสมของสารตัวกลางที่ใช้สร้างผลิตภัณฑ์ โดยพบว่าการใช้ระยะเวลาในการเก็บกักที่สั้นจะให้ผลผลิตของก๊าซชีวภาพสูงกว่าการใช้ระยะเวลาในการเก็บกักที่ยาวนาน คือ ปริมาณของก๊าซชีวภาพที่ถูกผลิตมีค่าเท่ากับ 12.21 และ 42.11 ลิตรต่อวัน ตามลำดับ ในขณะที่ใช้ระยะเวลาในการเก็บกัก เท่ากับ 10 และ 3 วัน ตามลำดับ ผลได้ของมีเทนค่อนข้างคงที่ประมาณ 0.381 ลิตรมีเทนต่อกรัมซีโอดีที่ถูกใช้ไป โดยสามารถพบปริมาณของแข็งแขวนลอย

ระเหยง่าย (VSS) เหลืออยู่ในน้ำทิ้งอยู่ในช่วงจาก 210 - 1,470 มิลลิกรัม/ลิตร ตลอดระยะเวลาในการดำเนินงาน (Faisal and Hajime, 2001)

ข้อได้เปรียบของถังหมักชนิด Anaerobic Baffled Bioreactor (ABR) คือ มีลักษณะที่ดีสำหรับการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากการก่อสร้างทำได้ง่ายและราคาถูก แต่ไม่สามารถเคลื่อนย้ายส่วนประกอบรวมทั้งอุปกรณ์เครื่องมือต่างๆ ได้ ระบบนี้สามารถทนทานต่อการเกิด Shock load และสามารถรองรับปริมาณน้ำเสียที่มีปริมาณมากได้ ส่วนข้อเสียของระบบนี้คือขั้นตอนการเริ่มต้นระบบ (Start-up) มีความยุ่งยาก

-Fixed Film Reactor

ถังปฏิกรณ์ชนิดนี้เป็นถังหมักซึ่งถูกติดตั้งไว้อยู่กับที่ (ภาพที่ 3) โดยจุลินทรีย์จะเจริญยึดเกาะและสร้างแผ่นฟิล์มชีวภาพที่ผิวของวัสดุตัวกลาง ได้แก่ โพลีไวนิวคลอไรด์ (Polyvinyl Chloride; PVC) ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ก้อนกรวด (Hard rock particles) หรือ Ceramic rings น้ำเสียจะกระจายจากทางด้านบนและด้านล่างของวัสดุตัวกลางนี้ สำหรับข้อได้เปรียบของถังปฏิกรณ์ชนิดนี้ คือ การก่อสร้างทำได้ง่าย ไม่ใช้เครื่องจักรในการกวนผสม มีความคงตัวสูงที่อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์สูงและสามารถทนต่อ Toxic shock loads และ Organic shock loads ที่มีจำนวนมากได้ (Rajeshwari *et al*., 2000) ถังหมักสามารถฟื้นตัวกลับคืนสู่สภาพเดิมได้อย่างรวดเร็วภายหลังที่ถังหมักเกิดการขาดแคลนสารอาหาร ข้อจำกัดที่สำคัญของการออกแบบให้ถังหมักมีปริมาตรค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับกระบวนการที่มีอัตราการย่อยสลายสูงอื่นๆ โดยปริมาตรของถังหมักจะสัมพันธ์กับปริมาณของวัสดุตัวกลาง ในขณะที่ปริมาณของแข็งแขวนลอยที่มีอยู่ในน้ำเสียจะทำให้เกิดการอุดตันและมีผลต่อการเพิ่มความหนาของแผ่นฟิล์มชีวภาพ



ภาพที่ 3 ลักษณะของถังหมักชนิด Fixed Film Reactor

Figure 3. Fixed Film Reactor.

ที่มา: Rajeshwari และคณะ (2000)

- Anaerobic Filter (AF)

ถังปฏิกรณ์ชนิด Anaerobic Filter ซึ่งใช้ในการบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม (Palm Oil Mill Wastewater; POMW) ซึ่งทำการทดลองที่อุณหภูมิปานกลาง (35 องศาเซลเซียส) โดยใช้ Clay rings ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3-0.5 มิลลิเมตร เป็นวัสดุตัวกลางรองรับจุลินทรีย์ สำหรับการเริ่มต้นระบบของถังปฏิกรณ์นี้โดยใช้ระยะเวลาในการเก็บกักประมาณ 1.5-4.5 วัน ประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดซีโอดี ซึ่งได้รับที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ เท่ากับ 17.0 กรัมซีโอดี/ลิตร/วัน โดยใช้ระยะเวลาเก็บกัก 6 ชั่วโมง พบว่าสามารถกำจัดซีโอดีได้ร้อยละ 90

ถังปฏิกรณ์ชนิดนี้ประกอบด้วย อะคริลิก (Acrylic) และท่อพลาสติก (Plastic tube) ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน เท่ากับ 6.5 เซนติเมตร และมีความยาวทั้งหมด เท่ากับ 55 เซนติเมตร ปริมาตรใช้งาน เท่ากับ 1.0 ลิตร โดยทำการวาง Clay rings ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง เท่ากับ 2-5 มิลลิเมตร ซึ่งรองรับด้วย Stainless steel mesh ในลักษณะแบบสุ่ม โดยลักษณะที่สำคัญของวัสดุที่ใช้รองรับ (Packing medium) คือ มีความพรุนร้อยละ 63 มีความจำเพาะของพื้นที่ผิว เท่ากับ 250 ตารางเมตร/กรัม ความหนาแน่น (Bulk density) เท่ากับ 1.52 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร และความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุ (Cation exchange capacity) เท่ากับ 125-140 มิลลิกรัม/

100 กรัม โดยวัสดุต่างๆ เหล่านี้ซึ่งมีความเหมาะสมต่อมีทาโนจินิคแบคทีเรีย ถังหมักชนิดนี้สามารถใช้กำจัดสารอินทรีย์ที่ทนทานต่อการย่อยสลายในน้ำเสียได้ดี สำหรับการป้อนน้ำเสียเข้าสู่ถังหมักและนำน้ำเสียออกจากถังนี้โดยอาศัย Peristaltic pump อัตราส่วนของน้ำเสียซึ่งมีการหมุนเวียนกลับต่ออาหารที่เข้ามา เท่ากับ 1:4 ในขณะที่น้ำส่วนที่เหลือจะถูกกำจัดออกไป (Borja and Banks, 1995)

- **Anaerobic Fluidized Bed Reactor (AFBR)**

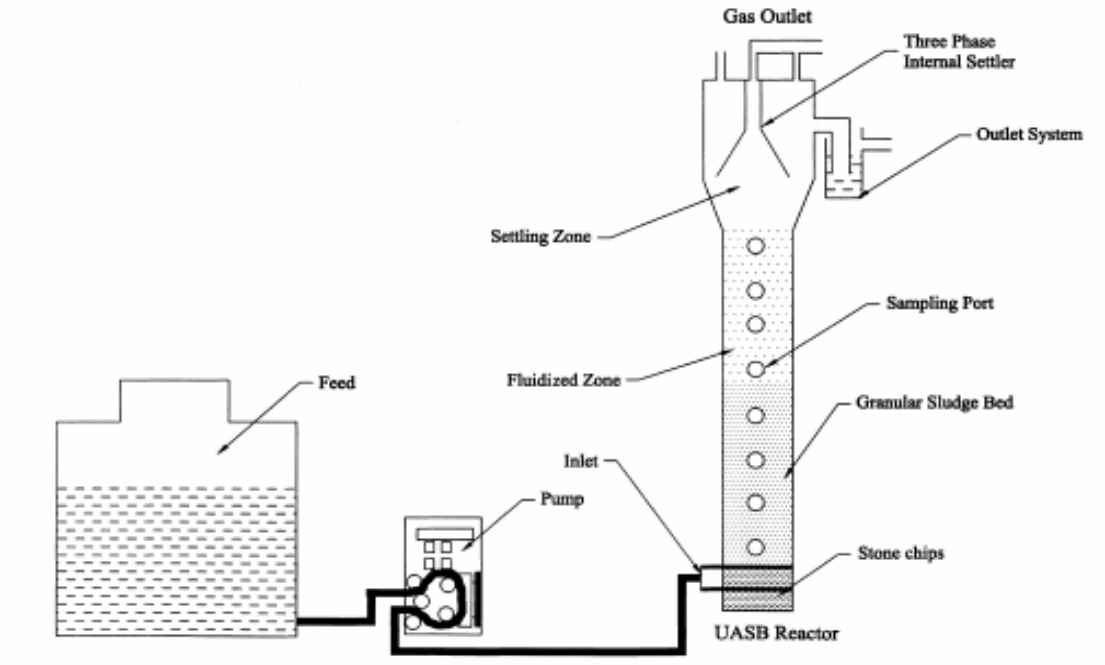
Anaerobic Fluidized Bed Reactor เป็นถังหมักที่มีวัสดุรองรับสำหรับให้จุลินทรีย์ยึดเกาะและเจริญเติบโตโดยวัสดุตัวกลางที่ใช้ในการดำเนินงานจะเป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็ก ได้แก่ ทราย และถ่านกำมันต์ (Activated carbon) เป็นต้น โดยวัสดุตัวกลางนี้จะต้องมีพื้นที่ผิวจำนวนมาก เพื่อให้เกิดการสร้างแผ่นฟิล์มชีวภาพและการเจริญเติบโตทำให้สามารถเก็บกักมวลเซลล์จุลินทรีย์ให้อยู่ในถังหมักในปริมาณที่สูง นอกจากนี้ยังช่วยส่งเสริมให้ระบบมีประสิทธิภาพและทำให้ระบบมีความคงตัวสูงจึงทำให้มีโอกาสที่จะใช้กับอัตราภาระสารอินทรีย์ที่สูงและสามารถทนต่อสารที่มายับยั้งได้ดี ถังปฏิกรณ์ชนิด Fluidized Bed พบว่ามีประสิทธิภาพสูงกว่าถังปฏิกรณ์ชนิด Anaerobic Filter เนื่องจากถังปฏิกรณ์ชนิดนี้สามารถส่งเสริมให้เกิดการสัมผัสระหว่างสารอาหารกับเซลล์จุลินทรีย์ที่ดีเนื่องจากมีบริเวณพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น (Rajeshwari *et al*., 2000)

สำหรับการนำถังปฏิกรณ์ชนิด AFBR มาใช้ในการบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม โดยถังหมักจะดำเนินงานที่อุณหภูมิปานกลาง (35 องศาเซลเซียส) โดยใช้ทรายที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง เท่ากับ 0.3-0.5 มิลลิเมตร เป็นวัสดุตัวกลางรองรับจุลินทรีย์สำหรับการเริ่มต้นระบบโดยใช้ระยะเวลาในการเก็บกักประมาณ 6 ชั่วโมง ประสิทธิภาพสูงสุดในการลดค่าซีโอดีที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ เท่ากับ 31.2 กรัมซีโอดี/ลิตร/วัน โดยใช้ระยะเวลาในการเก็บกักเป็นเวลา 6 ชั่วโมง พบว่าสามารถกำจัดซีโอดีได้ร้อยละ 90 ลักษณะของถังปฏิกรณ์ชนิดนี้ประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ คือ Conical-shaped acrylic vessel โดยมีปริมาตรใช้งาน เท่ากับ 1.0 ลิตร ความยาวของ Reactor column เท่ากับ 50 เซนติเมตร โดยมีลักษณะเรียวลง คือ ที่ฐานจะมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.0 เซนติเมตร ในขณะที่ส่วนบนมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.0 เซนติเมตร ซึ่งเชื่อมอยู่กับ Upper setting section ซึ่งมีความยาว เท่ากับ 6.0 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาด 12.0 เซนติเมตร โดย Static-bed ซึ่งจะใช้ทรายที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3-0.5 มิลลิเมตร จำนวน 75 กรัม (ปริมาตร 0.09 ลิตร) สำหรับใช้เป็นตัวนำพาเซลล์จุลินทรีย์ น้ำเสียที่ไหลออกจากถังปฏิกรณ์จะถูกหมุนเวียนจาก Settlement zone ไปยังส่วนล่างของถังหมักโดยใช้ Recycle pump อัตราการหมุนเวียน เท่ากับ 40 ลิตร/ชั่วโมง บริเวณ Settlement zone นี้ซึ่งมีลักษณะเป็นรูปกรวย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อแยก

ก๊าซและของเหลวออกจากกันโดยใช้แผ่นเหล็กกั้นทำให้เกิดเป็นช่องที่ยอมให้ก๊าซที่ถูกผลิตผ่านไปได้ (Borja and Banks, 1995)

- Up-flow Anaerobic Sludge Blanket (UASB)

การพัฒนากระบวนการผลิตมีเทนโดยอาศัยถังปฏิกรณ์ชนิด UASB ซึ่งถังปฏิกรณ์นี้ถูกผลิตขึ้นครั้งแรกโดย Since lettinga 'S group เป็นผู้พัฒนาสำหรับใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีความสกปรกสูงจากอุตสาหกรรมผลิตอาหาร (Lettinga, 1995) ถังปฏิกรณ์ชนิด UASB ซึ่งถูกนำมาใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์วัตถุภายใต้สภาวะไร้อากาศที่ประกอบด้วยถังปฏิกรณ์เพียงถังเดียว สำหรับน้ำเสียจะถูกส่งผ่านจากทางด้านล่างของถังบำบัดและไหลออกทางด้านบนของถังหมัก (ภาพที่ 4) สำหรับการย่อยสลายของสารอินทรีย์ซึ่งจะเกิดขึ้นภายในถังบำบัดและมีการผลิตก๊าซมีเทนเกิดขึ้นมา (Borja *et al*., 1996; Rajeshwari *et al*., 2000)



ภาพที่ 4 ลักษณะของถังหมักชนิด Up-flow Anaerobic Sludge Blanket Reactor (UASB)

Figure 4. Up-flow Anaerobic Sludge Blanket Reactor.

ที่มา: Rajeshwari และคณะ (2000)

ถังปฏิกรณ์ชนิด UASB ถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายโดยประสบความสำเร็จในการบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมอาหาร เนื่องจากเป็นระบบที่ไม่ต้องใช้พลังงานสูงเพื่อเติมอากาศให้กับน้ำเสีย นอกจากนี้ยังเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพสูงในการสร้างผลผลิตมีเทน สำหรับการใช้ถังปฏิกรณ์ชนิด UASB แบบขั้นตอนเดียวพบว่าสามารถกำจัดซีโอดีได้อย่างมีประสิทธิภาพและสามารถรองรับภาระสารอินทรีย์ในอัตราที่สูง นอกจากนี้ระบบยังสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิต่ำ เป็นระบบที่สามารถกำจัดสารอินทรีย์ที่ไม่ละลายน้ำซึ่งปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียได้ สำหรับประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียของถังปฏิกรณ์ชนิด UASB โดยพบว่าสามารถลดค่าบีโอดีอยู่ในช่วงค่าระหว่าง 5,000 – 15,000 มิลลิกรัม/ลิตรได้ร้อยละ 75-85 โดยใช้ระยะเวลาในการเก็บกัก 4-12 ชั่วโมง ข้อได้เปรียบของระบบนี้ คือ สามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงของสิ่งแวดล้อมในระบบได้แก่ อุณหภูมิ พีเอช และการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่เกิดขึ้นอย่างกะทันหัน (Shock load) ได้ (Gray, 1981)

สำหรับการนำถังปฏิกรณ์ชนิด UASB มาใช้ในการบำบัดน้ำเสียของโรงงานผลิตน้ำมันจากดอกทานตะวันซึ่งคุณลักษณะของน้ำเสียที่นำมาใช้งานดังแสดงในตารางที่ 6 การนำถังปฏิกรณ์ชนิด UASB มาใช้สำหรับบำบัดน้ำเสียในระดับอุตสาหกรรมโดยระบบดำเนินงานที่อุณหภูมิปานกลางพบว่าสามารถกำจัดของแข็งแขวนลอยและกรดไขมัน ได้แก่ ลิโนเลอิก (Linoleic) โอเลอิก (Oleic) ไมริสติก (Myristic) ปาล์มมิติก (Palmitic) สเตียริก (Stearic) อะราชิดิก (Arashidic) บีฮินิก (Behenic) และ กรดไขมันอื่น ๆ ได้ประมาณร้อยละ 70 ซึ่งได้รับที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์อยู่ในช่วงค่าระหว่าง 1.6 และ 7.8 กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร/วัน ในขณะที่ระยะเวลาที่ใช้ในการเก็บกักน้ำเสียของระบบที่เหมาะสม คือ 2.0 และ 2.8 วัน ตามลำดับ โดยที่อัตราการผลิตมีเทน เท่ากับ 0.354 ลูกบาศก์เมตรของมีเทน/กิโลกรัมซีโอดี (Saatci *et al*., 2003)

ตารางที่ 6 ลักษณะเฉพาะของน้ำเสียโรงงานผลิตน้ำมันจากดอกทานตะวัน

Table 6. The characteristic of sunflower oil mill wastewater.

พารามิเตอร์	อยู่ในช่วงค่าระหว่าง
พีเอช	1.5-2.6
ค่าอัลคาไลด์ (มิลลิกรัม/ลิตร ในรูปของแคลเซียมคาบอเนต)	800-1990
ซีโอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)	5,600-15,300
ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (มิลลิกรัม/ลิตร)	4,300-12,800
ของแข็งแขวนลอยระเหยง่าย(มิลลิกรัม/ลิตร)	3,700-9,680
ไนโตรเจนทั้งหมด(มิลลิกรัม/ลิตร)	19.8-125.4
ฟอสฟอรัสทั้งหมด(มิลลิกรัม/ลิตร)	216.0-556.2
วัสดุที่ประกอบด้วยไขมันทั้งหมด(มิลลิกรัม/ลิตร)	540-7640
ไขมันทั้งหมด(มิลลิกรัม/ลิตร)	364.4-1,696.0
กรดระเหยง่ายทั้งหมด(มิลลิกรัม/ลิตร)	237.0-1,293.8

ที่มา: Saatci และคณะ (2003)

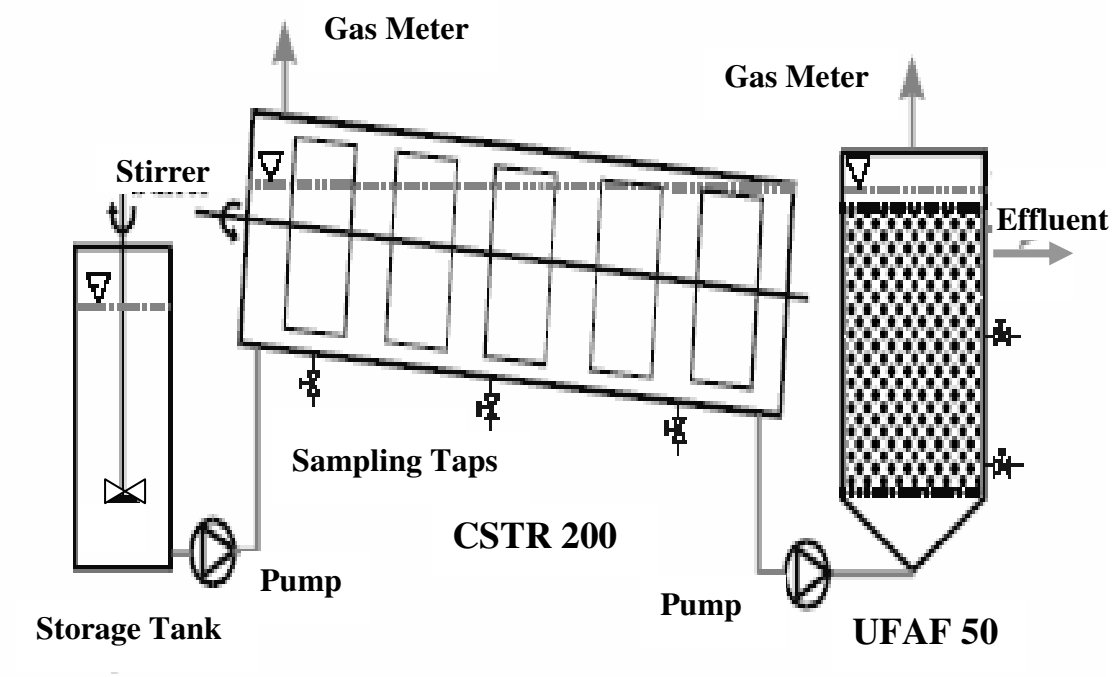
2.3.2 ถังบำบัดสองขั้นตอน (Two-stage Digestion)

ถังบำบัดน้ำเสียแบบนี้ได้ถูกพัฒนามาจากถังบำบัดแบบขั้นตอนเดียว ซึ่งระบบบำบัดแบบนี้จะใช้ถังบำบัดน้ำเสียสองถัง คือ ถังย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ติดตั้งระบบการกวนผสมเพื่อให้จุลินทรีย์ในถังบำบัดสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ให้เป็นสารโมเลกุลเล็กและกรดไขมันระเหยง่ายได้รวดเร็วและทั่วถึง ส่วนถังบำบัดใบที่สองจะถูกใช้สำหรับเป็นถังผลิตก๊าซมีเทนโดยอาศัยมีทาโนจินิคแบคทีเรีย ซึ่งสามารถเปลี่ยนกรดไขมันระเหยง่ายที่ผลิตจากถังหมักใบแรกเป็นก๊าซมีเทนโดยในแต่ละขั้นตอนจำเป็นต้องควบคุมพีเอชของน้ำเสียให้เหมาะสมต่อกิจกรรมของแบคทีเรียแต่ละกลุ่ม คือ ควบคุมค่าพีเอชของน้ำเสียในถังย่อยสลายให้อยู่ที่ประมาณ 6.0 และควบคุมค่าพีเอชในถังผลิตก๊าซให้ได้ประมาณ 7.0 ซึ่งจะทำให้ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียได้สูงขึ้นโดยใช้ระยะเวลาในการเก็บกักน้ำเสียสั้นเพียง 12 ชั่วโมง (Loehr, 1974; Gray, 1981; Tchobonoglous and Burton, 1991)

- Continuously Stirred Tank Reactor / Up-flow Anaerobic Filter (CSTR/UFAF)

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบ 2 ขั้นตอน ซึ่งมีการใช้ถังปฏิกรณ์ชนิด CSTR ร่วมกับถังปฏิกรณ์ชนิด UFAF (ภาพที่ 5) โดยถังปฏิกรณ์ชนิด CSTR มีขนาด 200 ลิตร และถังปฏิกรณ์ชนิด UFAF มีขนาด 50 ลิตร ซึ่งถูกนำไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากครัวเรือนที่มีสารอินทรีย์ปนเปื้อนอยู่ โดยใช้เวลาในการเดินระบบนาน 5 เดือน พบว่าถังปฏิกรณ์ชนิด CSTR มีอัตราการป้อนสารอินทรีย์เท่ากับ 9.8 กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร/วัน ในขณะที่ระยะเวลาที่ใช้ในการเก็บกักน้ำเสียถูกรักษาไว้ที่ 24 วัน พบว่าสามารถลดปริมาณซีโอดีได้ร้อยละ 68 และมีการผลิตก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นเท่ากับ 4.0 ลูกบาศก์เมตร/วัน ในขณะที่ถังปฏิกรณ์ชนิด UFAF ซึ่งใช้ระยะเวลาในการเก็บกักน้ำเสียเป็นเวลา 6 วัน พบว่าสามารถลดปริมาณซีโอดีได้เท่ากับร้อยละ 38 และมีการผลิตก๊าซชีวภาพเกิดขึ้น เท่ากับ 1.8 ลูกบาศก์เมตร/วัน สำหรับประสิทธิภาพของการใช้ระบบทั้งสองร่วมกันพบว่ามีประสิทธิภาพในการย่อยสลายได้เท่ากับร้อยละ 80 (Held *et al.*, 2002)

การผลิตก๊าซชีวภาพเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นโดยไม่ใช้อากาศซึ่งมักมีปัญหาเกี่ยวกับความต่อเนื่องของการผลิตกรดไขมันระเหยง่าย (VFA) เกิดขึ้น โดยเฉพาะเมื่อดำเนินงานที่ใช้ถังปฏิกรณ์ชนิด CSTR ซึ่งมีผลต่อการผลิตก๊าซมีเทนและการเปลี่ยนแปลงของพีเอชในถังบำบัด โดยพบว่าความเข้มข้นของกรดโพรพิโอนิคที่ถูกย่อยสลายจะมีผลต่อการเกิดกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมด ในขณะที่ความเข้มข้นของกรดอะซิติคที่ถูกย่อยสลายจะมีความสำคัญต่อการผลิต iso-valerate หรือ 2-methylbutyrate ผลที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายของกรดอะซิติคทำให้ได้ n-butyrate และ iso-butyrate หรือ 2-methylbutyrate เป็นผลผลิต ในขณะที่ผลที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายของ Propionate จะได้ผลผลิต คือ n-valerate เพียงอย่างเดียว (Pind *et al.*, 2002) ในกระบวนการหมักพบว่าสัดส่วนของการใช้อาหาร การสร้างผลผลิต และการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์มีความสำคัญต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ สำหรับการสร้างถังหมักเพื่อใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพนั้นเป็นเรื่องที่ท้าทาย โดยถังหมักจะต้องไม่ทำให้มีการรั่วไหลของก๊าซเกิดขึ้น และยอมให้สารที่อยู่ภายในระบบมีการกวนผสมกันได้ดีสามารถควบคุมการเติมสารอาหารและการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อมจากการเพาะเลี้ยงได้ดี (Ann *et al.*, 2004)



ภาพที่ 5 ระบบบำบัดแบบสองขั้นตอนระหว่าง CSTR และ UFAF ที่สำหรับใช้ผลิตก๊าซชีวภาพ

Figure 5. Two stage anaerobic treatment of CSTR and UFAF reactor for biogas production**.**

ที่มา: Held และคณะ (2002)

- **Up-flow Anaerobic Sludge Blanket (UASB/UASB)**

สำหรับการใช้ถังปฏิกรณ์ชนิด UASB ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตน้ำมันปาล์ม โดยอาศัยกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบสองขั้นตอน คุณสมบัติของน้ำเสียจากโรงงานผลิตน้ำมันปาล์มดังแสดงในตารางที่ 7 กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบสองขั้นตอนซึ่งการดำเนินงานโดยระบบจะถูกทำการแยกออกเป็นสองถัง คือ ถังสำหรับผลิตกรด (Acidogenic reactor) และถังผลิตมีเทน (Methanogenic reactor) (ภาพที่ 6) สำหรับให้จุลินทรีย์ทั้งสองกลุ่มเจริญแยกออกจากกัน เนื่องจากสภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญและสร้างผลผลิตของจุลินทรีย์ทั้งสองกลุ่มแตกต่างกัน โดยถังใบแรกนี้มีขนาด 12.0 ลิตร สามารถรองรับอัตราการป้อนสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate; OLR) อยู่ในช่วงระหว่าง 2.5-16.6 กรัมซีโอดี/ลิตร/วัน ในขณะที่ปริมาณของแข็งแขวนลอยที่เข้าสู่ระบบ เท่ากับ 5.4 กรัม/ลิตร ถังปฏิกรณ์นี้จะถูกใช้สำหรับผลิตกรดไขมันระเหยง่ายและสารตัวกลางที่สำคัญซึ่งสามารถเปลี่ยนไปเป็นมีเทนได้ โดยพบว่าประสิทธิภาพในการผลิตกรดอะซิติกสูงสุดของถังปฏิกรณ์นี้ เท่ากับ 4.1 กรัม/ลิตร/วัน โดยใช้ระยะเวลาในการเก็บกักเท่ากับ 0.9 วัน

ตารางที่ 7 คุณลักษณะของน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ใช้ในบำบัดโดยถังปฏิกรณ์ชนิด UASB แบบสองขั้นตอน

Table 7. The characteristic of palm oil mill wastewater.

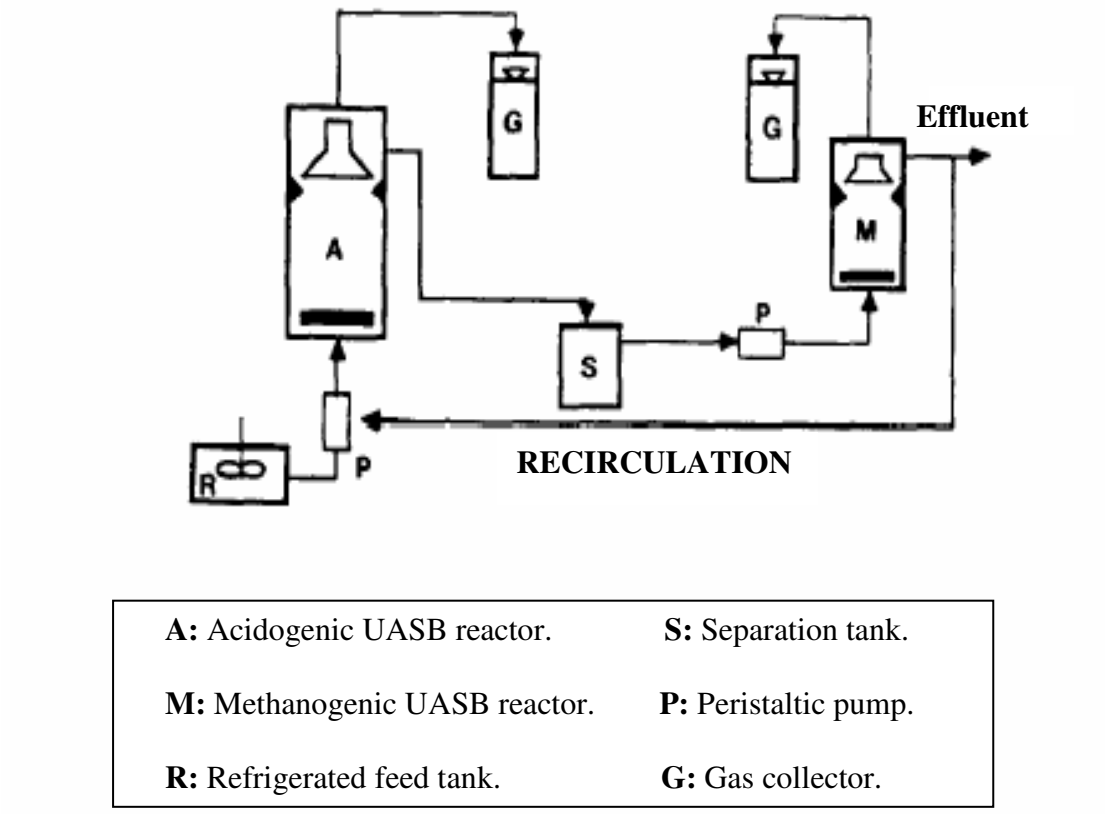
พารามิเตอร์ [ก]	Sterilizer Wastewater	Hydrocylone Wastewater	Centrifuge Wastewater	Mixed Wastewater
บีโอดี	10-25	-	17-35	11-30
ซีโอดี	30-60	-	40-75	30-70
ของแข็งทั้งหมด	40-50	5-15	35-70	30-65
ของแข็งแขวนลอย	3.5	5-15	12-18	9-25
น้ำมัน	2-3	1-5	5-15	5-13
แอมโมเนีย	0.02-0.08	-	0.02-0.08	0.02-0.08
ไนโตรเจน	0.35-0.60	0.07-0.15	0.5-0.9	0.5-0.9
พีเอช	4.5-5.5	-	3.5-4.5	3.5-4.5

[ก] กรัม/ลิตร

ที่มา: Borja และคณะ (1996)

ในขณะที่ปริมาณของแข็งแขวนลอยที่เข้าสู่ระบบจะถูกเพิ่มขึ้นเป็น 10.8 กรัม/ลิตร ในระหว่างวันที่ 101-120 ของการทดลองแบบต่อเนื่องซึ่งสัมพันธ์กับอัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้น คือ 17.3 กรัมซีโอดี/ลิตร/วัน พบว่าความสูงของชั้นตะกอนจุลินทรีย์ (Sludge blanket) เพิ่มขึ้นเนื่องการสะสมของของแข็งที่เป็นสารอินทรีย์ (Organic solids) ซึ่งไม่สามารถย่อยสลายได้ภายในถังหมัก ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยง่ายสูงเนื่องจากมีทาโนจินิคแบคทีเรียถูกทำลาย ในขณะที่ค่าความเป็นด่างของถังผลิตกรดนี้จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจากระดับเริ่มต้น คือ จาก 2,100 เป็น 5,200 มิลลิกรัมของแคลเซียมคาร์บอเนต/ลิตร ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ เท่ากับ 16.6 กรัมซีโอดี/ลิตร/วัน โดยค่าพีเอชของชั้นตะกอนจุลินทรีย์ (Sludge blanket) จะค่อนข้างคงที่อยู่ในช่วงประมาณ 5.2-5.8 แสดงให้เห็นว่ามีการผลิตกรดเพิ่มขึ้นซึ่งสามารถทดแทนกับสภาพความเป็นด่างที่เพิ่มขึ้น สำหรับผลผลิตของกรดไขมันระเหยง่ายที่ถูกสร้างขึ้น ได้แก่ กรดโพรพิโอนิก กรดบิวทิริก และกรดวาลีริก ซึ่งมีความเข้มข้นที่มากกว่า 100 ppm. สำหรับถังปฏิกรณ์ใบที่สองซึ่งใช้สำหรับผลิตก๊าซมีเทนโดยมีขนาด 5.0 ลิตร พบว่าอัตราการผลิตมีเทนอยู่ในช่วงจาก 0.30 ถึง 0.33 ลิตรมีเทน/กรัมซีโอดีที่ถูกใช้ไป ประสิทธิภาพของการผลิตมีเทนจะลดลงเมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นจาก 1.1 เป็น

22.9 กรัม/ลิตร/วัน โดยสัดส่วนปริมาณผลผลิตของมีเทนในก๊าซชีวภาพทั้งหมดจะค่อยๆ ลดลงจากร้อยละ 80 จนถึงร้อยละ 65 ในขณะที่ประสิทธิภาพของการกำจัดซีโอดีสูงสุดประมาณร้อยละ 90 โดยพบว่าความเข้มข้นของกรดโพรพิโอนิคที่มากกว่า 2.0 กรัม/ลิตร จะมีผลยับยั้งกิจกรรมของมีทาโนจินิคแบคทีเรียได้ (Borja *et al*., 1996)



ภาพที่ 6 แผนภาพของระบบ UASB reactor ที่ใช้สำหรับผลิตก๊าซชีวภาพ

Figure 6. Diagram of UASB reactor for biogas production.

ที่มา: Borja และคณะ (1996)

3. วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาอัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่เหมาะสมและจลพลศาสตร์ของการหมักต่อการผลิตกรดไขมันระเหยง่ายในถังปฏิกรณ์ชนิด UASB
2. เพื่อศึกษาอัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่เหมาะสมและจลพลศาสตร์ของการหมักต่อการผลิตมีเทนในถังปฏิกรณ์ชนิด UFAF
3. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ถังปฏิกรณ์ชนิด UASB ร่วมกับถังปฏิกรณ์ชนิด UFAF ในการผลิตก๊าซชีวภาพ