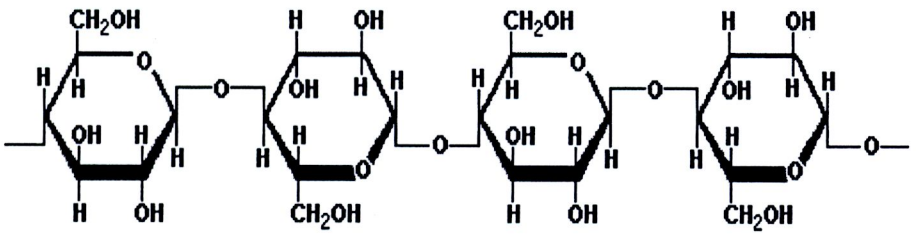
บทที่ 2
วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. การย่อยสลายเซลลูโลสในพืช

เซลลูโลส เป็นโพลีแซคคาไรด์ที่พบมากในผนังเซล (Cell Wall) ของพืชขณะที่พืชยังมีชีวิตและอยู่ในสภาพที่สมบูรณ์จะไม่ถูกทำลายโดยจุลินทรีย์ต่าง ๆ เนื่องจากมีสารที่ยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ แต่หลังจากที่พืชตายหรือมีบาดแผลเกิดขึ้น สารยับยั้งจะถูกทำลายโครงสร้างของพืชก็จะถูกย่อยสลายโดยเอนไซม์ที่ผลิตขึ้นโดยจุลินทรีย์ เซลลูโลสเป็นสารประกอบพวกโพลีแซคคาไรด์ชนิดหนึ่งที่มีมากในผนังเซลของพืช โครงสร้างของโมเลกุลเป็นแบบไม่มีกิ่งก้านสาขาประกอบด้วย หน่วยย่อยของน้ำตาลกลูโคสหลาย ๆ หน่วยมาต่อกันเป็นเส้นยาวด้วยพันธะแบบ β(1-4)-Glycosidic Bond ดังภาพที่ 1 เซลลูโลสจะไม่ละลายด้วยน้ำ ตัวทำละลายอินทรีย์ หรือสารละลายด่างอ่อน แต่จะละลายในกรดและด่างแก่ เมื่อย่อยสลายโดยสมบูรณ์ด้วยกรดหรือเอนไซม์จะได้น้ำตาลกลูโคสอย่างเดียว แต่ถ้าการย่อยสลายตัวไม่สมบูรณ์จะได้เซลโลไบโอส (Cellobiose) ซึ่งเป็นไดแซคคาไรด์ (Disaccharide) และได้โอลิโกแซคคาไรด์ (Oligosaccharide) อื่น ๆ เอ็นไซม์ที่ย่อยสลายเซลลูโลสจะเรียกว่าเซลลูเลส

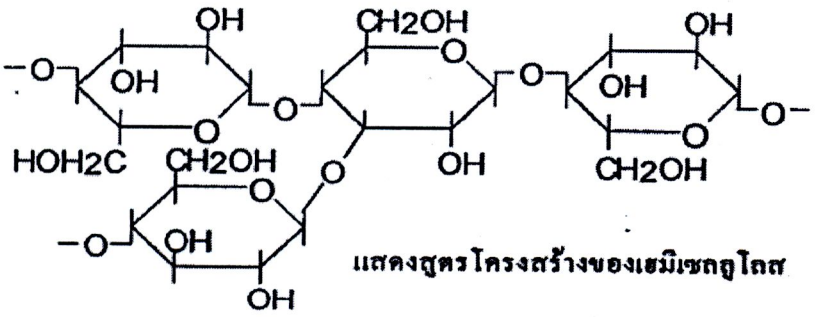


ภาพที่ 1 โครงสร้างของเซลลูโลส
ที่มา: Murray RK. et al. (1996)

1.1 การย่อยสลายเฮมิเซลลูโลส

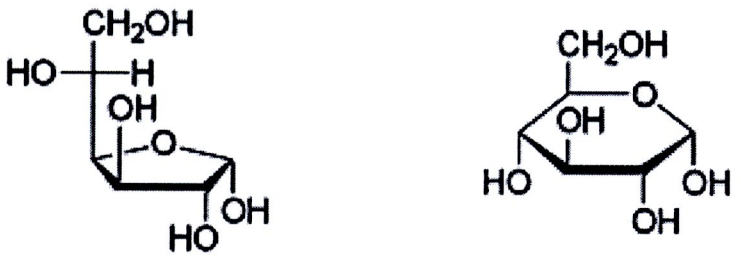
เฮมิเซลลูโลสเป็นสารประกอบพวก Amorphous Polymeric Carbohydrate พบมากในพวกไม้เนื้อแข็งและพวกพืชตระกูลหญ้า เฮมิเซลลูโลสละลายในสารละลายที่เป็นด่างเจือจาง ปกติจะอยู่รวมกับเซลลูโลส ลิกนิน และ Pectic Substances ในผนังเซลของพืช เนื่องจากเฮมิเซลลูโลสมีโครงสร้างเป็นกิ่งก้านสาขา และประกอบด้วยน้ำตาลหลาย ๆ ชนิด ดังนั้น เอนไซม์ที่ย่อยสลาย

เฮมิเซลลูโลสให้สมบูรณ์ จึงมีมากกว่าเอนไซม์ที่ย่อยสลายเซลลูโลส เอ็นไซม์ที่ย่อยสลายเฮมิเซลลูโลสจะเรียกว่าเฮมิเซลลูเลส ซึ่งได้แก่ L–Arabinanases,D-Galactanases, D-Mannanases, D-Xylanases และอื่น ๆ เป็นต้น โดยทั่วไปเฮมิเซลลูโลสในพืชจะมีโครงสร้างหลักเป็นโพลีเมอร์ของน้ำตาล Xylose ที่เชื่อมต่อกันด้วย 1, 4-β-Linkage โดยมี Branch Chain เป็นน้ำตาล Pentose, Hexose หรือ Uronic Acid อื่น ๆ การย่อยสลายโครงสร้างหลักที่เป็นโพลีเมอร์ของน้ำตาล Xylose ที่เชื่อมต่อกัน(ดังภาพที่ 2 และ 3) จะต้องอาศัยการทำงานของเอ็นไซม์ Xylanases



ภาพที่ 2 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส

ที่มา: Murray RK. et al. (1996)

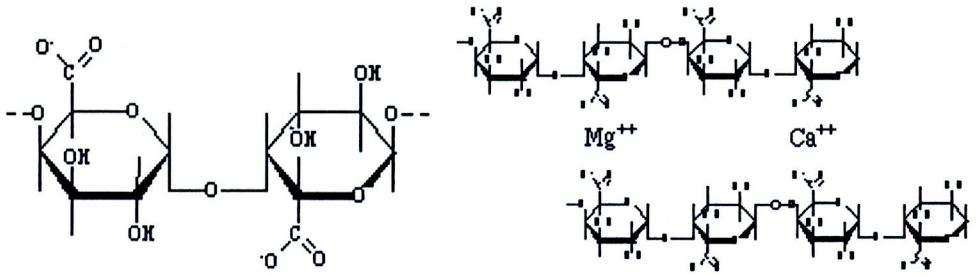


ภาพที่ 3 โครงสร้างของน้ำตาล Pyranose form และ Furanose form

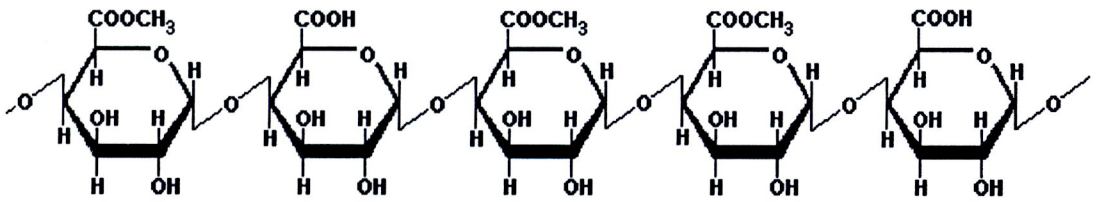
ที่มา: Murray RK. et al. (1996)

1.2 การย่อยสลาย Pectic Substances

Pectic Substances เป็นสารประกอบพวก Heteropolysaccharide ที่มีน้ำหนักประมาณ 30,000 – 300,000 ดาลตัน ส่วนใหญ่อยู่ในชั้น Middle Lamella ซึ่งเป็นส่วนเชื่อมต่อกันระหว่างเซลของผนังเซลที่อยู่ติดกัน แม้ว่าปริมาณของ Pectic Substances ในผนังเซลของพืชมีประมาณ 1-2% แต่ก็มีผลอย่างมากต่อความแข็งและความเหนียวของเนื้อเยื่อพืช โครงสร้างหลักของ Pectic Substances จะเป็นโพลีเมอร์ของ Galacturonan Chain เชื่อมกับ L–Rhamnopyranose ที่ตำแหน่ง C-1 และ C-2 Galacturonan โดยทั่วไปสารพวก Pectic Substances จะมีอยู่ 2 รูป ดังภาพที่ 5 คืออยู่ในรูปของ Free Carboxyl Group (Pectic Acid) และอยู่ในรูปที่ถูก Esterify โดย Methoxy Group (Pectin) เอ็นไซม์ที่ย่อยสลาย Pectic Substances จะเรียกว่าเพคติคเอนไซม์



Galacturonic acid **Pectic acid with salt bridges**



Pectin

ภาพที่ 4 โครงสร้าง Pectic acid และ Pectin

ที่มา: Murray RK. et al. (1996)

2. กระบวนการชีวเคมีของการผลิตเอทานอล

เอทานอล หรือ เอทิลแอลกอฮอล์ คือ แอลกอฮอล์ชนิดหนึ่งที่มีสูตรเคมี C_2H_5OH มีลักษณะเป็นของเหลวใส ไม่มีสี ติดไฟง่าย มีความไวไฟและค่าออกเทนสูง เอทานอลผลิตได้ทั้งจากกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมี โดยใช้เอทิลีนเป็นวัตถุดิบ และกระบวนการทางชีวเคมี โดยใช้พืชผลหรือวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่มีแป้งและน้ำตาลสูงเป็นวัตถุดิบ ซึ่งเป็นกระบวนการที่ได้รับความนิยมและมีวัตถุดิบที่สามารถเลือกใช้ได้หลากหลายชนิดตามความเหมาะสมของแต่ละ

ประเทศ เช่น ข้าวโพด ข้าวฟ่าง มันสำปะหลัง อ้อย กากน้ำตาล สาหร่าย ฯลฯ นอกจากนี้ ยังมีการผลิตเอทานอลจากวัตถุดิบที่มีเซลลูโลสสูง เช่น ฟางข้าว ขี้เลื่อย หญ้า เป็นต้น ถ้าเป็นประเภทแป้งหรือเซลลูโลสจะต้องนำไปผ่านกระบวนการย่อยแป้งหรือเซลลูโลสให้เป็นน้ำตาลก่อน ด้วยการใช้กรดหรือเอนไซม์ ส่วนวัตถุดิบประเภทน้ำตาลเช่นกากน้ำตาลหรือน้ำอ้อย เมื่อปรับความเข้มข้นให้เหมาะสมแล้วสามารถนำไปหมักได้เลย ในกระบวนการหมักจะเปลี่ยนน้ำตาลให้เป็นแอลกอฮอล์ โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้ยีสต์ โดยใช้เวลาในการหมักประมาณ 2 - 3 วัน กรณีที่เป็นการหมักแบบถังหมักหากหมักแบบต่อเนื่องจะใช้เวลาประมาณ 36 ชั่วโมง จะได้แอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้นประมาณร้อยละ 8 - 12 โดยปริมาตร จากนั้นจะต้องนำไปกลั่นแยกแบบลำดับส่วน จะได้แอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 95 โดยปริมาตร ในกรณีที่ต้องการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงที่จะนำไปใช้ในรถยนต์ในรูปก๊าซโซฮอล์และดีโซฮอล์ จะต้องแยกส่วนน้ำออกจากเอทานอลให้ได้มากกว่าร้อยละ 99.5 ซึ่งเรียกว่าเอทานอลบริสุทธิ์ (Absolute Alcohol) หรือเอทานอลไร้น้ำ (Anhydrous Alcohol) โดยวิธีการกลั่นกับสารตัวที่สาม หรือแยกด้วยเครื่องโมเลกคูลาซีฟ (Molecular Sieve) หรือเครื่องแยกระบบเมมเบรน

2.1 การเตรียมน้ำตาลเพื่อการหมักเอทานอล

การเตรียมเปลี่ยนแป้งหรือวัสดุเซลลูโลสให้เป็นน้ำตาล เพื่อให้มีสภาพเหมาะกับการหมัก เอทานอลด้วยยีสต์จำเป็นต้องผ่านกระบวนการย่อยสลายแป้งหรือเซลลูโลส โดยใช้ เอนไซม์ร่วมในกระบวนการ เอนไซม์นี้เป็นกลุ่มอะไมเลส (Amylase) ซึ่งมี 2 ประเภทคือ

2.1.1 Endoamylase ย่อยแป้งแบบกลุ่ม ทำให้ได้แป้งโมเลกุลเล็กและเด็กซตริน เอนไซม์ ประเภทนี้ คือ แอลฟ่าอะไมเลส (Alfa-Amylase)

2.1.2 Endoamylase ย่อยแป้งจากปลาย ทำให้ได้กลูโคส เอนไซม์ ประเภทนี้ คือ เบต้าอะไมเลส (Beta-Amylase) และกลูโคอะไมเลส Glucosamylase

2.2 กระบวนการผลิตเอทานอล

การผลิตเอทานอลจากพืชผลทางการเกษตรมี 2 กระบวนการหลัก คือ กระบวนการหมัก (Fermentation) และกระบวนการกลั่น (Distillation) ดังภาพที่ 5 และ 6

2.2.1 กระบวนการหมัก (Fermentation)

กระบวนการหมัก หมายถึง ขั้นตอนการใช้ยีสต์เพื่อเปลี่ยนน้ำตาลเป็นแอลกอฮอล์ หรือเอทานอล การผลิตเอทานอลโดยใช้ยีสต์มีองค์ประกอบสำคัญที่ต้องจัดการให้เกิด

ความสมดุลย์ 2 ส่วนคือ ลักษณะเฉพาะและคุณสมบัติของยีสต์ และใส่ปัจจัยที่จำเป็นต่อการทำงานของยีสต์

2.2.1.1 ลักษณะเฉพาะและคุณสมบัติของยีสต์

การหมักเอทานอลส่วนมากใช้ ยีสต์ สายพันธุ์ Saccharomyces Cerevisiae ซึ่งสามารถผลิตเอทานอลได้สูงและสามารถทนสภาพแวดล้อมที่มีเอทานอลได้ดีกว่าสายพันธุ์อื่น การทำงานของยีสต์ในการเปลี่ยนน้ำตาลกลูโคสเป็นเอทานอลเกิดขึ้นในระดับเซลและปลดปล่อยเอทานอลออกมาภายนอกเซลล์ ตามทฤษฎีการเปลี่ยนน้ำตาลกลูโคสเป็นเอทานอลได้ 51.1 เปอร์เซ็นต์ และส่วนที่เหลือ 48.9 เปอร์เซ็นต์ เป็นก๊าสคาร์บอนไดอ๊อกไซด์ และมีพลังงานความร้อนเกิดขึ้นอีก 28.7 กิโลแคลอรี่ (Kcal) ดังสมการที่ (1) (Zoecklein et al., 1995)

สมการที่ (1) แสดงการเปลี่ยนน้ำตาลกลูโคสเป็นเอทานอลโดยการหมักของยีสต์

$$C_6H_{12}O_6 + \text{ยีสต์} \longrightarrow 2C_2H_5OH + 2CO_2 + 28.7\ \text{Kcal}$$

	(กลูโคส)	(เอทานอล)	(คาร์บอนไดออกไซด์)
	180 กรัม	2x46 กรัม	2x44 กรัม
คิดเป็นร้อยละ	100 กรัม	51.11 กรัม	48.89 กรัม

2.2.1.2 ปัจจัยที่จำเป็นต่อการทำงานของยีสต์

เพื่อให้มีประสิทธิภาพการหมักสูงสุด และได้รับผลผลิตเอทานอลในปริมาณสูงจำเป็นต้องมีปัจจัยแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการทำงานของยีสต์ในกระบวนการหมักเอทานอล ซึ่งประกอบด้วย องค์ประกอบส่วนที่เป็นองค์ประกอบหลัก และปัจจัยแวดล้อมอื่นระหว่างการหมัก ดังนี้

ก) องค์ประกอบส่วนที่เป็นองค์ประกอบหลัก ได้แก่

- ปริมาณคาร์บอน ในการหมักยีสต์

พบว่ามีการใช้คาร์บอนจากน้ำตาลกลูโคส และฟรักโตสซึ่งใช้หมักได้ดีเท่ากัน และแหล่งน้ำตาลที่หาได้ง่ายได้จากกากน้ำตาล น้ำอ้อย ข้าวฟ่างหวาน และชูการ์บีท ส่วนน้ำตาลได้มาจาก 2 กระบวนการ คือน้ำตาลที่ได้จากการย่อยแป้งด้วยเอนไซม์ และน้ำตาลที่ได้จากการย่อยเซลลูโลสด้วยกระบวนการจุลชีวเคมีหรือกระบวนการเคมีจากกระดาษใยจากต้นพืชและขี้เลื่อย ซึ่งในปัจจุบันยังอยู่ในขั้นพัฒนาให้ต้นทุนการผลิตต่ำลง

- ปริมาณไนโตรเจน

ไนโตรเจนเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญของยีสต์ และเป็นสับสเตรทสำหรับการสังเคราะห์โปรตีนทำให้จำนวนเซลล์เพิ่มขึ้น นับว่าเป็นส่วนสำคัญที่กระตุ้นการหมักหรือการผลิต เอทานอล โดยในตัวของยีสต์จะมีปริมาณไนโตรเจน ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักแห้ง โดยส่วนใหญ่ยีสต์จะสามารถใช้ไนโตรเจนในรูปแอมโมเนียมซัลเฟตได้ ส่วนอุตสาหกรรมการผลิตเอทานอลนิยมใช้เกลือแอมโมเนียมซัลเฟต เป็นแหล่งให้ธาตุไนโตรเจนและให้ซัลเฟอร์ไปพร้อมกัน

- ปริมาณซัลเฟอร์

ซัลเฟอร์ เป็นธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญของเซลล์ ยีสต์มีซัลเฟอร์เป็นองค์- ประกอบ 0.4 เปอร์เซ็นต์ แหล่งซัลเฟอร์ที่ยีสต์ใช้ได้ดี คือกรดแอมมอโนเมทไทโอนีน เกลือซัลเฟต ในรูปแอมโมเนียมซัลเฟตที่มีราคาถูกและเป็นแหล่งไนโตรเจน พร้อมกันไป ปริมาณธาตุและธาตุอาหารอื่น ๆ ที่จำเป็นต่อการเจริญและการทำงานของยีสต์ คือแมกนิเซียม และแคลเซียม ไวตามินที่ช่วยในการเจริญได้แก่ ไบโอติน กรดแพนโทแทนนิต ไทอะมีน กรดนิโคตินิค และไพริดอกซิน ในปริมาณเล็กน้อย

ข) ปัจจัยแวดล้อมอื่นระหว่างการหมัก

เพื่อให้ประสิทธิภาพการหมักสูงสุด จึงต้องมีการควบคุมสิ่งแวดล้อมในการหมักทุกขั้นตอน แต่ทั้งนี้ต้องให้สอดคล้องกับคุณลักษณะประจำสายพันธุ์ของยีสต์ที่ใช้ในการหมักนั้น ๆ ในส่วนของกระบวนการหมักเอทานอลประกอบด้วยปัจจัยแวดล้อมที่ต้องควบคุมในระหว่างการหมัก ดังนี้

- ความเข้มข้นของน้ำตาล

ในสภาพการหมักที่มีความเข้มข้นของน้ำตาลสูงจะช่วยลดการปนเปื้อนเชื้ออื่นได้ดี แต่น้ำตาลสูงจะยับยั้งการเจริญและการหมักเอทานอล และคุณสมบัตินี้เป็นลักษณะประจำสายพันธุ์ของยีสต์ เมื่อเทียบกันกับกรณีความเข้มข้นอทานอลจะมีผลยับยั้งการหมักรุนแรงกว่า แต่หากมีภาวะทั้งน้ำตาลเข้มข้นและเอทานอลสูงจะยิ่งเสริมกันให้มีลักษณะยับยั้งการหมักรุนแรงขึ้น

- ระดับอุณหภูมิ

ในการหมักยีสต์สายพันธุ์ *S cerevisiae* สามารถเจริญได้ที่อุณหภูมิปานกลางในช่วง 25 - 30 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิต่ำสุดที่จะทนได้คือ 5 - 10 องศาเซลเซียส ในสภาพที่อาหารอุดมสมบูรณ์ยีสต์จะทนอุณหภูมิสูงได้ดี และจะหยุดเจริญเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 0 และเกินกว่า 40 องศาเซลเซียส การควบคุมอุณหภูมิในการหมักเชิงอุตสาหกรรมเป็น

สิ่งจำเป็นเพื่อประสิทธิภาพการหมักที่ดี และจำเป็นต้องมีระบบหล่อเย็นเพื่อควบคุมอุณหภูมิในถังหมัก

- พีเอช

ยีสต์สายพันธุ์ *S Cerevisiae* สามารถเจริญได้ดีในสภาพการหมักเอทานอลจากน้ำตาลที่ ค่า พีเอช อยู่ในช่วง 2.4 - 8.6 โดยมีค่าที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 4.5 ซึ่งในสภาพเป็นกรดอ่อนนี้สามารถช่วยควบคุมการปนเปื้อนแบคทีเรียได้ดี การหมักเอทานอลจากซูโครสมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชมากกว่าการใช้กลูโคส

- ความเข้มข้นของเอทานอล

ในสภาพที่มีเอทานอลสูงการเจริญและการหมักยีสต์จะถูกยับยั้งเพราะเอทานอลมีผลต่อเอนโซม์และสรีรวิทยาของเซลล์ เมื่อเปอร์เซ็นต์เอทานอลมากกว่า 1 โดยน้ำหนัก มีผลทำให้การเจริญลดลงและจะหยุดลงเมื่อมีเอทานอล 4.7 - 7.8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และทำการหมักต่อไปจนเอทานอลมีความเข้มข้น 14 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก การที่ยีสต์ไม่เจริญจะส่งผลทำให้อัตราการหมักลดลงด้วย และยีสต์สายพันธุ์ *S Cerevisiae* เป็นยีสต์ที่ทนทานต่อเอทานอลได้มากที่สุด

- ปริมาณออกซิเจน

ในขั้นตอนการเตรียมหัวเชื้อ ออกซิเจนมีความสำคัญมาก เนื่องจากยีสต์มีการเจริญสูงในสภาวะที่มีออกซิเจนมาก แต่จะมีผลให้การหมักลดลง ออกซิเจนส่งเสริมให้การออกซิเดชั่นสมบูรณ์ และมีการสร้างคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ และออกซิเจนยังเกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์กรดไขมันไม่อิ่มตัว ที่มีความสำคัญที่ทำให้ยีสต์ทนเอทานอลได้มากขึ้น ดังนั้นในสภาวะที่ขาดออกซิเจน ยีสต์ไม่สามารถสังเคราะห์กรดไขมันไม่อิ่มตัวได้ จึงต้องมีการเติมกรดไขมันไม่อิ่มตัวเพื่อให้ยีสต์สามารถอยู่รอดได้ ยีสต์ใช้ออกซิเจนในการหายใจเพื่อการเจริญเติบโต ดังนั้นในกระบวนการหมักอย่างต่อเนื่องควรมีการให้อากาศบ้างในระหว่างการหมักเพื่อเพิ่มจำนวนเซลล์ทดแทนเซลล์ที่ตายลง และยังพบว่าการให้อากาศปริมาณเพียงเล็กน้อย ทำให้ประสิทธิภาพในการใช้กลูโคสเพิ่มมากขึ้น และช่วยให้ยีสต์มีความทนทานต่อเอทานอลได้ดี

- ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์

คาร์บอนไดออกไซด์มีผลยับยั้งการเจริญเติบโตของยีสต์ ทั้งในภาวะที่มีออกซิเจนและไม่มีออกซิเจนที่ความดันบรรยากาศปกติ หากมีคาร์บอนไดออกไซด์สูงจะเกิดการยังยั้งการเจริญเติบโตของยีสต์และการหมักอย่างรุนแรง โดยคาร์บอนไดออกไซด์มีผลยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชั่นและคาร์บอนไดออกไซด์ยังมีผลต่อเยื่อหุ้มเซลล์ทำให้การขนถ่ายสารเข้าออกเซลล์เปลี่ยนไป

2.2.2 กระบวนการกลั่น (Distillation)

กระบวนการกลั่นคือ การนำเอทานอลที่ได้จากการหมักไปกลั่นที่ความดันบรรยากาศ จะได้เอทานอลที่มีความบริสุทธิ์ถึงร้อยละ 95.6 โดยปริมาตร แต่ถ้านำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง ต้องใช้เทคนิคอื่นๆ มาช่วยแยกน้ำออกอีกครั้ง เพื่อให้ได้เอทานอลที่มีความบริสุทธิ์ ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 99.5 โดยปริมาตร ซึ่งเรียกว่าเอทานอลบริสุทธิ์ (Absolute Alcohol) หรือเอทานอลไร้น้ำ (Anhydrous Alcohol) ถ้าเอทานอลมีน้ำปะปนอยู่มาก เมื่อนำไปใช้กับเครื่องยนต์จะทำให้เครื่องยนต์หยุดการทำงานได้ และชิ้นส่วนและอุปกรณ์ของเครื่องยนต์เกิดสนิมได้ กรรมวิธีหรือเทคโนโลยีในการแยกน้ำเพื่อผลิตเอทานอลที่นิยมมี 3 วิธี คือ

2.2.2.1 กระบวนการแยกน้ำด้วยวิธีการกลั่นสกัดแยกกับสารตัวที่สาม (Extractive Distillation with The Third Component) สารตัวที่สามที่ใช้คือ สารไซโคลเฮกเซน (Cyclo-Hexane)

วิธีนี้ใช้พลังงานมากและมีต้นทุนสูง โดยต้องใช้สารเติมเพื่อแยกเอทานอลจากน้ำคือ เบนซิน (Benzene) ต่อมาพบว่าเป็นสารที่อันตรายมากจึงเปลี่ยนไปใช้ สารจำพวกไซโคลเฮกเซน (Cyclo-Hexane) แล้วจึงกลั่นแยกเอทานอลออกมาจากสารที่เติมเข้าไป

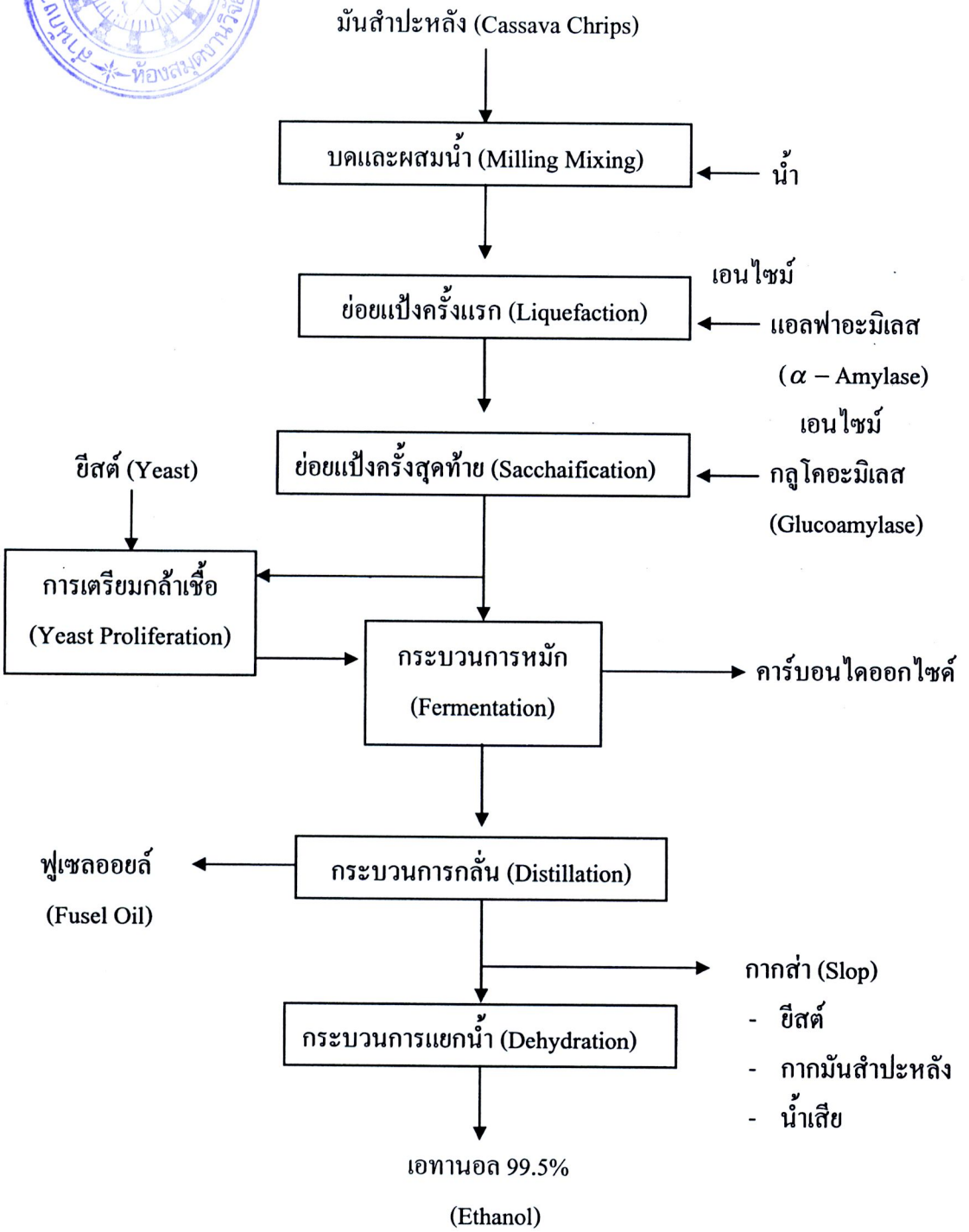
2.2.2.2 กระบวนการแยกด้วยวิธีเมมเบรน (Membrane Pervaporation)

กระบวนการ Pervaporation วิธีนี้มีความสะดวก ใช้พลังงานน้อย และได้สารที่บริสุทธิ์เช่นเดียวกับวิธีอื่น และมีส่วนช่วยทางด้านการประหยัดพลังงาน และไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม การแยกน้ำโดยกระบวนการ Pervaporation จะไม่ขึ้นอยู่กับสมดุลของเทอร์โม-ไดนามิกส์ (Vapor/Liquid Quilibrium) แต่จะอาศัยองค์ประกอบที่ต่างชนิดกันในสารละลายที่มีความสามารถในการละลาย/แพร่ ผ่าน Membrane ไม่เท่ากัน หรือกล่าวว่ามีผลต่างของศักยภาพเคมีเป็นแรงขับ (Driving Force) ทำให้ในการใช้งาน Pervaporation จะใช้ได้ดี ในกรณีที่การแยกสารโดยวิธีการกลั่นนั้นทำได้ยากและมีราคาสูง แต่กระบวนการ Pervaporation จะไม่มีปัญหาในกรณีนี้ และลดความจำเป็นที่ต้องเติมสารอื่นหรือต้องกำจัดสารอื่น และยังลดการใช้พลังงานในกระบวนการมากกว่าการกลั่น

2.2.2.3 กระบวนการแยกด้วยวิธีโมเลคูลาซีฟ (Molecular Sieve Reparation)

เป็นกระบวนการให้เอทานอลมีน้ำ (Hydrous Ethanol) ผ่านวัสดุที่มีรูพรุนสูง เช่น Zeolite เพื่อให้รูพรุนนั้นดักเอาน้ำออก และเป็นกระบวนการที่ได้รับความนิยมมากที่สุดในอุตสาหกรรมการผลิตเอทานอลในประเทศไทยในขณะนี้

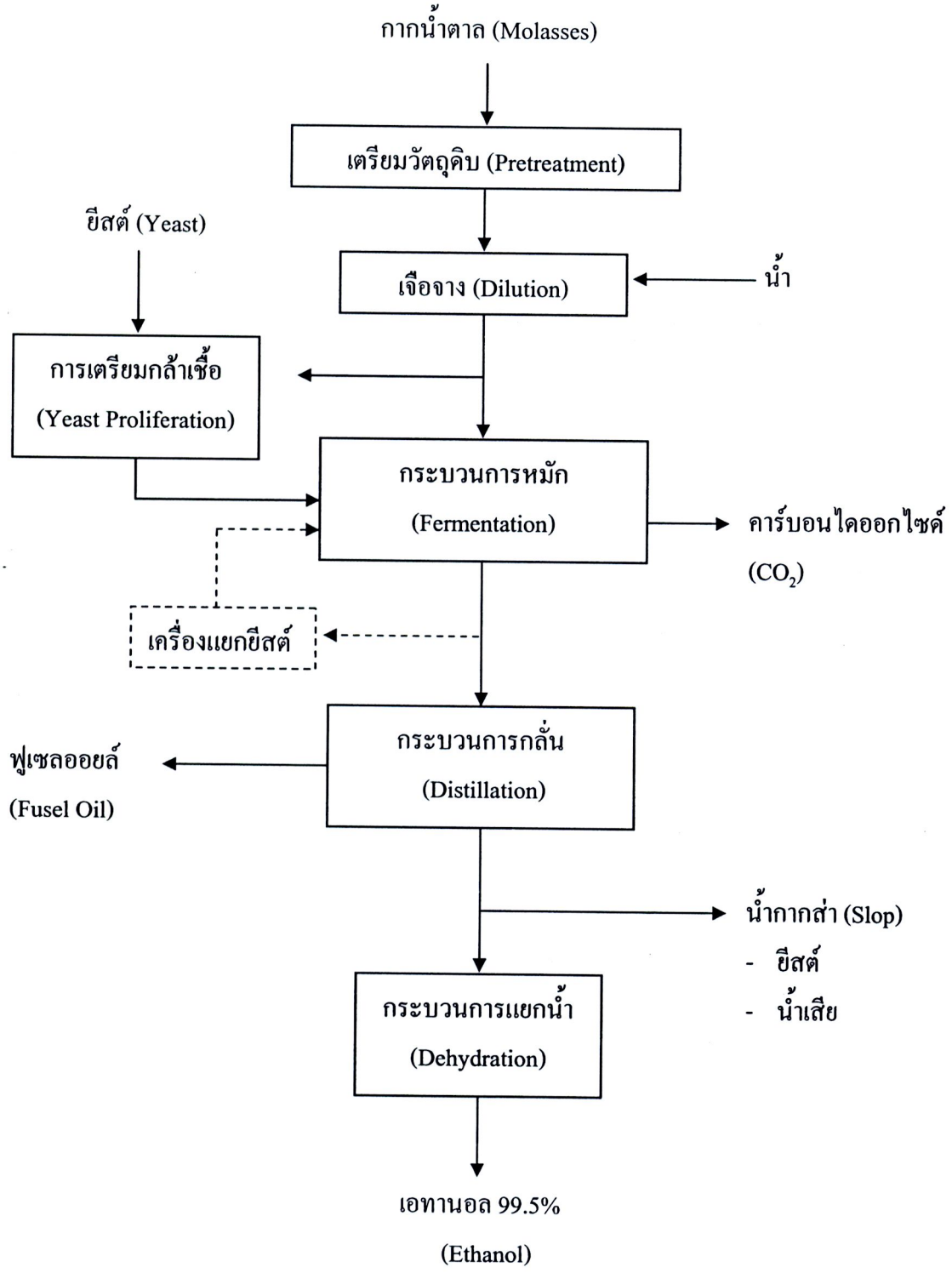
สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย



ภาพที่ 5 กระบวนการผลิตเอทานอลจากกากมันสำปะหลัง

ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (2549)

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่ 11 ส.ค. 2556
เลขทะเบียน 208822



ภาพที่ 6 กระบวนการผลิตเอทานอลจากกากน้ำตาล

ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (2549)

3. ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการผลิตเอทานอล

3.1 จุลินทรีย์ที่ใช้ในกระบวนการผลิตเอทานอล

ยีสต์ที่ใช้ในกระบวนการหมักเอทานอล เรียกว่า "*ไวน์ยีสต์ (Wine Yeast)*" ต้องมีคุณสมบัติที่ดีที่ส่งเสริมให้กระบวนการหมักเอทานอลเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วสมบูรณ์ และให้ระดับปริมาณแอลกอฮอล์สูงเมื่อสิ้นสุดกระบวนการหมัก การใช้จุลินทรีย์ในการหมักเอทานอล มีดังนี้

3.1.1 ใช้จุลินทรีย์ธรรมชาติ จุลินทรีย์ที่พบช่วงแรก ๆ ของการหมักคือยีสต์ในสายพันธุ์ *Kloeckera Apiculata* รวมทั้งที่อยู่ในรูปของสปอร์ Hanseniaspora Guilliermondii และ Hanseniaspora Uvarum และยังพบ Candida Pulcherrima ยีสต์เหล่านี้มีลักษณะทนต่อแอลกอฮอล์ได้แค่ร้อยละ 5-7 ดังนั้น เมื่อกระบวนการหมักดำเนินต่อไปและมีแอลกอฮอล์สูงขึ้น ยีสต์เหล่านี้ก็จะตายไป โดยมียีสต์อื่นที่สามารถทนต่อแอลกอฮอล์ในปริมาณสูงเจริญขึ้นมาแทนซึ่ง ได้แก่ Saccharomyces Rosei และ Saccharomyces Cerevisiae

3.1.2 เชื้ออีเอ็ม (EM หรือ Effective Microorganisms) คือจุลินทรีย์กลุ่มดีมีประสิทธิภาพ เป็นการนำมาใช้เป็นกลุ่ม ๆ ซึ่งในอีเอ็มประกอบด้วย Yeast, Photosynthetic Bacteria, Lactic acid Bacteria, Fermentative Fungi, Actinomyces รวมกัน 80 ชนิด มีการนำมาใช้ประโยชน์หลายรูปแบบ เช่น ใช้ในการหมักหากอยู่ในสภาวะปลอดอากาศก็จะได้ผลผลิตเป็นเอทานอล ใช้ในการกำจัดโรคที่มาจากจุลินทรีย์ได้ ซึ่งเชื่อว่าเป็นเทคนิคทางธรรมชาติ คือทำให้จุลินทรีย์กลุ่มดีมากกว่ากลุ่มก่อโรค

3.1.3 ใช้จุลินทรีย์บริสุทธิ์ที่คัดเลือกแล้ว ได้แก่ เชื้อยีสต์ หรือเชื้อแบคทีเรียบางชนิด เชื้อยีสต์ส่วนใหญ่จะเป็นสายพันธุ์ *Saccharomyces Cerevisiae* มีหลายสเตรน ส่วนแบคทีเรียจะใช้ในกรณีต้องการลดปริมาณกรดในเอทานอล เชื้อยีสต์และแบคทีเรียที่ใช้ในการหมักเอทานอลอยู่ในสภาพการเก็บ 2 แบบ คือ สภาพเชื้อสดเพาะเลี้ยงบนอาหารวุ้น (Nutrient Agar) และสภาพผงแห้ง (Active Dried Yeast Powder) ซึ่งเก็บได้นานและมีประสิทธิภาพดีกว่ายีสต์สด การเกิดฟองระหว่างกระบวนการหมักก่อให้เกิดการปนเปื้อนด้วยจุลินทรีย์ชนิด อื่น ๆ ได้ง่ายและมีผลต่อการหมุนเวียนสารอาหาร และการถ่ายเทก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการหมัก

3.2 สภาวะของกระบวนการผลิตเอทานอล

3.2.1 อุณหภูมิ ในขั้นตอนระหว่างการหมักจะมีพลังงานความร้อนที่ปลดปล่อยออกจากปฏิกิริยาสูงถึง 149.5 Kcal/Gsucrose ซึ่งเป็นผลจากการที่ยีสต์ใช้น้ำตาลซูโครสในการหมักเอทานอล ความร้อนนี้มีผลกระทบต่อการเจริญของยีสต์ทั้งด้านสรีระวิทยาของเซลล์ การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของน้ำหมักและอัตราการหมักเอทานอล แม้ยีสต์จะสามารถเจริญได้ที่

อุณหภูมิค่อนข้างสูงแต่ก็ทำให้เกิดการฉีกขาดของ Plasma Membrane ของเซลล์และการอยู่รอดของเซลล์ลดลงอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ยังมีการระเหยของเอทานอลและเกิดฟองมากในน้ำหมัก การเพิ่มอุณหภูมิของการหมักถึง 32 องศาเซลเซียส สามารถเพิ่มอัตราการหมักเอทานอลให้สูงขึ้นได้ (Amerine et al., 1980)

3.2.2 ในสภาวะที่มีอากาศหรือออกซิเจน ยีสต์จะสามารถแบ่งตัวเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าได้ในเวลาไม่ถึงชั่วโมงในระยะเจริญ และจะได้เซลล์ยีสต์เป็นหลายล้านเซลล์เมื่อเวลาผ่านไปภายใน 24 ชั่วโมง การเจริญของยีสต์ช่วงนี้จะให้ปริมาณแอลกอฮอล์น้อยมาก ยีสต์จะผลิตกรดน้ำส้มขึ้นมาแทน ทำให้มีรสเปรี้ยวและมีกลิ่นบูด แต่ในสภาวะไม่มีอากาศยีสต์จะแบ่งเซลล์ได้น้อยกว่าแต่จะให้แอลกอฮอล์ได้ดีกว่า ในการหมักด้วยถังขนาดเล็กจึงควรใช้อุปกรณ์ดักอากาศ หรือ Air Lock โดยเติมน้ำสะอาดลงในอุปกรณ์เพื่อป้องกันอากาศจากภายนอกเข้าสู่ถังได้ แต่ยอมให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผลิตจากยีสต์ออกมาจากถังแทน

3.2.3 ความเข้มข้นเอทานอล ในระหว่างกระบวนการหมัก ความเข้มข้นเอทานอลจะสูงขึ้นเรื่อย ๆ ซึ่งสามารถยับยั้งการเจริญของยีสต์ได้ โดยทั่วไปยีสต์ถูกยับยั้งการเจริญเมื่อความเข้มข้นเอทานอลประมาณร้อยละ 14 โดยปริมาตร แต่มียีสต์บางสายพันธุ์ที่สามารถทนต่อความเข้มข้นเอทานอลประมาณร้อยละ 18 โดยปริมาตร ได้แก่ ยีสต์สายพันธุ์ *Saccharomyces Cerevisiae*

4. การใช้ประโยชน์ผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตเอทานอล

4.1 คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะเกิดขึ้นในระหว่างการหมักน้ำตาลเป็นเอทานอลด้วยเชื้อยีสต์ ซึ่งจะมีปริมาณประมาณครึ่งหนึ่งโดยน้ำหนักของน้ำตาลกลูโคสที่ใช้ในการหมัก จากการประมาณที่กำลังการผลิตเอทานอล 150,000 ลิตร/วัน จะเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 100-120 ตัน/วัน การใช้ประโยชน์ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ สามารถใช้ได้ทั้งสถานะที่เป็นก๊าซ (Gas) ของเหลว (Liquid CO_2) และของแข็ง (Solid CO_2) โดยจะใช้มากในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น ใช้เป็นสารทำความเย็น และอุตสาหกรรมเครื่องดื่มประเภทที่มีการอัดก๊าซ นอกจากนี้ยังมีการใช้ในอุตสาหกรรมอื่นบ้าง ได้แก่ อุตสาหกรรมเคมี อุตสาหกรรมการเชื่อมโลหะ พลาสติกและยางและกสิกรรม

4.2 ฟูเซลออยล์ (Fusel Oil)

ฟูเซลออยล์ หรือที่บางครั้งเรียกว่าฟูเซลแอลกอฮอล์ (Fusel Alcohol) ใช้เรียกส่วนผสมของแอลกอฮอล์อื่นที่มีจุดเดือดสูงกว่าเอทานอล ซึ่งเป็นผลพลอยได้ที่เกิดขึ้นในระหว่าง

กระบวนการกลั่นเอทานอล ฟูเซลออยล์ประกอบด้วยแอลกอฮอล์หลายชนิด ส่วนมากเป็นองค์ประกอบที่มีคาร์บอน 3, 4 หรือ 5 อะตอม ได้แก่ ไอโซเอมิลแอลกอฮอล์ (Iso Amyl Alcohol) และแอคทีฟเอมิลแอลกอฮอล์ (Active Amyl Alcohol) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักที่มีมูลค่าสูง นอกจากนี้ยังมีบิวทานอล (Butanol) และโพรพานอล (Propanol) อยู่ด้วย การใช้ฟูเซลออยล์จะต้องมีการแยกแอลกอฮอล์ออกโดยวิธีการกลั่น วิธีทางโครมาโตกราฟฟี หรือวิธีทางเคมี และผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ แล้วจึงนำแอลกอฮอล์ที่ได้ไปใช้เป็นตัวทำละลายในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมจำพวกเรซิ่นและพลาสติก อุตสาหกรรมแล็คเกอร์ และหมึกพิมพ์

4.3 DDGS (Dry Distillers Grains with Solubles)

เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการรวมกันของกากที่เป็นวัตถุดิบตั้งต้น ซึ่งเป็นส่วนของกากส่าที่เป็นของแข็ง กับส่วนของของแข็งที่ละลายน้ำได้ในน้ำส่าหลังการกลั่นแยกเอทานอล แล้วทำแห้งเพื่อให้มีความชื้นเหลือประมาณร้อยละ 10 ถึง 12 ในประเทศสหรัฐอเมริกาซึ่งมีการใช้ข้าวโพดเป็นวัตถุดิบในการผลิตเอทานอล จะมีการผลิต DDGS ที่ได้จากการนำกากแห้งที่เป็นของแข็งผสมกับส่วนของแข็งที่ละลายน้ำได้ เพื่อใช้เลี้ยงสัตว์ โดย DDGS จะเป็นแหล่งของโปรตีนและพลังงานที่สำคัญสำหรับโคนมและโคเนื้อ อีกทั้งเป็นแหล่งของไฟเบอร์และฟอสฟอรัสของสัตว์จำพวกที่ไม่ใช่สัตว์เคี้ยวเอื้อง รวมทั้งสัตว์ปีกและสัตว์น้ำ ขั้นตอนการผลิต DDGS จะประกอบด้วยการแยกส่วนที่เป็นของเหลวและของแข็งออกจากกัน (Separation) โดยเครื่องปั่นเหวี่ยง นำส่วนที่เป็นของเหลวที่เหลือหลังจากกลั่นแยกเอทานอลไประเหย เพื่อทำให้เข้มข้นขึ้น (Evaporation) นำไปผสมกับส่วนของแข็งแล้วทำให้แห้ง (Drying) และเย็นตัวลง (Cooling) โดยรูปแบบของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตออกจำหน่ายออกสู่ตลาดมีทั้งในรูปของผงแห้ง และในรูปของ DDGS อัดเม็ด DDGS ที่ผลิตจากมันสำปะหลังจะมีปริมาณโปรตีนประมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนักแห้ง ซึ่งต่ำกว่า DDGS ที่ได้จากข้าวโพด ซึ่งมีโปรตีนประมาณร้อยละ 25 โดยน้ำหนักแห้ง

4.4 ยีสต์ (Yeast)

ยีสต์ (Saccharomyces Cerevisiae) ที่แยกได้จากการหมักเป็นแหล่งโภชนาการที่สำคัญ โดยในเซลล์ยีสต์จะประกอบด้วยโปรตีนร้อยละ 40 โดยน้ำหนักแห้ง คาร์โบไฮเดรตร้อยละ 34 โดยน้ำหนักแห้ง ไขมันร้อยละ 4 โดยน้ำหนักแห้ง และวิตามินบี จึงสามารถใช้เป็นแหล่งโปรตีนทดแทน และอาหารเสริมสำหรับการเจริญเติบโตของทั้งมนุษย์และสัตว์ หรือสกัดแยกเป็นยีสต์สกัด (Yeast Extract) และผนังเซลล์ยีสต์ (Yeast Cell Wall) ยีสต์สกัดสามารถนำมาใช้ประโยชน์สำหรับอาหารสัตว์ โดยจัดเป็นสารเสริมอาหารสัตว์ที่มีคุณภาพสูง สามารถใช้เป็นสารปรุงแต่งกลิ่นใน

อาหารสัตว์ได้เป็นอย่างดีเนื่องจากมีกลิ่นคาวคล้ายกลิ่นเนื้อสัตว์ ส่วนผนังเซลล์ยีสต์มีองค์ประกอบของเบต้า 1, 3 และ 1, 6 กลูแคน ซึ่งมีคุณสมบัติช่วยกระตุ้นระบบภูมิคุ้มกันของร่างกายมนุษย์และสัตว์ สามารถใช้ในการเลี้ยงสัตว์แบบไม่ใช้ยาปฏิชีวนะ เช่น ใช้ในการเลี้ยงกุ้งกุลาดำ เป็นต้น สารสกัดจากเซลล์ยีสต์ที่แยกได้จากน้ำกากส่าจากมันสำปะหลังมีปริมาณกรดอะมิโนเป็นส่วนใหญ่ทั้งที่จำเป็นและไม่จำเป็นสูงกว่าสารสกัดจากเซลล์ยีสต์ที่มีขายในเชิงพาณิชย์ แต่สารสกัดจากเซลล์ยีสต์ที่แยกได้จากน้ำกากส่าจากกากน้ำตาลจะมีปริมาณกรดอะมิโนทั้งหมดน้อยกว่ายกเว้นแอสพาร์ติค

4.5 ก๊าซชีวภาพ (Biogas)

ก๊าซชีวภาพ หมายถึง ก๊าซที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติจากการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ภายใต้สภาวะที่ปราศจากออกซิเจน ใช้เป็นพลังงานทดแทนซึ่งสามารถผลิตได้จากวัสดุเหลือทิ้งและน้ำเสียจากอุตสาหกรรมการเกษตร ก๊าซชีวภาพประกอบด้วยก๊าซหลายชนิด ส่วนใหญ่เป็นก๊าซมีเทน (Methane; CH_4) ประมาณร้อยละ 50 - 70 และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ประมาณร้อยละ 30 - 50 ส่วนที่เหลือเป็นก๊าซชนิดอื่น ๆ เช่น ไฮโดรเจน(H_2) ออกซิเจน(O_2) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ไนโตรเจน (N_2) และไอน้ำ ก๊าซมีเทนบริสุทธิ์ให้ค่าความร้อนประมาณ 35,800 กิโลจูล /ลูกบาศก์เมตร (kJ/m^3) ส่วนก๊าซชีวภาพที่มีสัดส่วนของก๊าซมีเทนร้อยละ 65 ให้ค่าความร้อน 22,400 กิโลจูล /ลูกบาศก์เมตร เนื่องจากก๊าซชีวภาพมีส่วนประกอบหลักเป็นก๊าซมีเทน จึงทำให้มีคุณสมบัติจุดติดไฟได้ดีและสามารถนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทนในรูปต่าง ๆ ได้ เช่น การเผาเพื่อใช้ประโยชน์จากความร้อนโดยตรง จะได้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูง จึงสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อต้มไอน้ำ (Steam Boiler) ของโรงงานซึ่งโดยทั่วไปจะใช้น้ำมันเตาเป็นแหล่งพลังงาน ก๊าซชีวภาพปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร สามารถทดแทนน้ำมันเตาได้ 0.55 ลิตร ซึ่งนำมาใช้กับ Boiler เพื่อผลิตไอน้ำสำหรับกลั่นเอทานอลได้ โดยทั่วไปกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ เช่น ไขมัน แป้ง และโปรตีน ซึ่งอยู่ในรูปสารละลายจนกลายเป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Acids) โดยจุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรด (Acid-Producing Bacteria) และขั้นตอนการเปลี่ยนกรดอินทรีย์ให้เป็นก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน (Methane-Producing Bacteria)

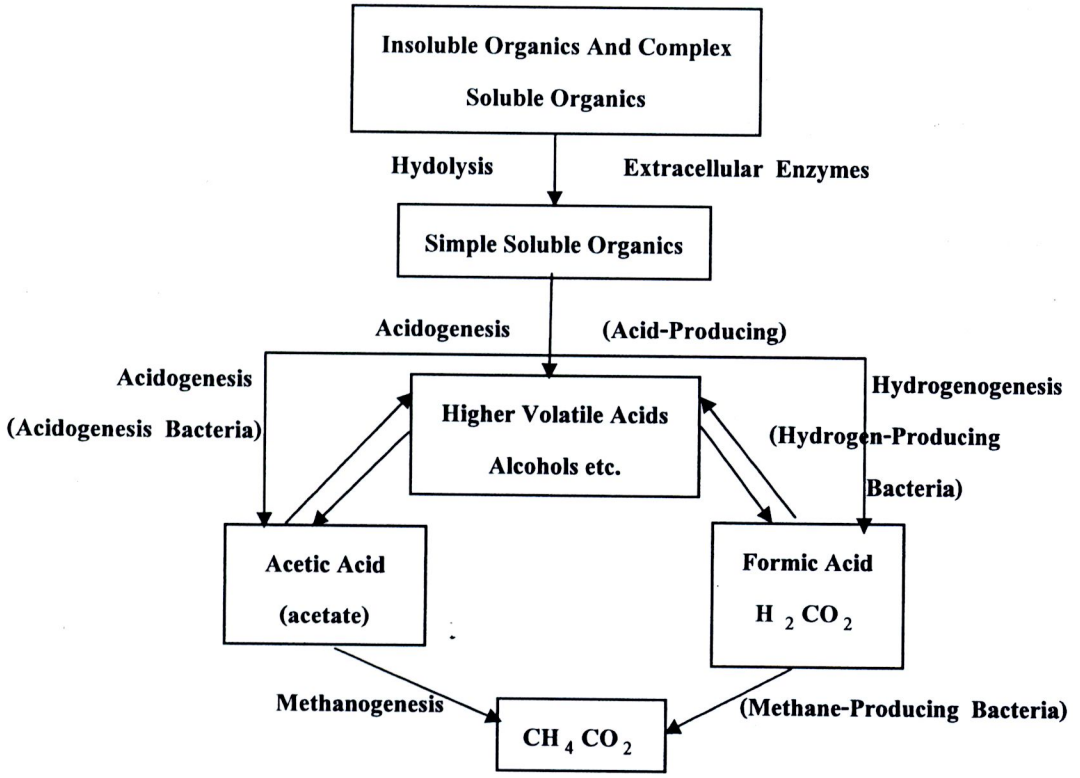
4.6 ปุ๋ยอินทรีย์

น้ำกากส่ามีอินทรีย์วัตถุและและประกอบด้วยเกลือที่ละลายได้เป็นจำนวนมาก โดยพบว่าธาตุอาหารที่จำเป็นสำหรับพืช คือ โพแทสเซียม (K) จะพบในปริมาณที่สูงมากที่สุด รองลงมาคือไนโตรเจน (N) และพอสฟอรัส (P) ตามลำดับ และประกอบด้วยธาตุอาหารรองและธาตุอาหาร

เสริมต่าง ๆ อีกมากมาย ที่สามารถใช้เป็นปุ๋ยได้ ซึ่งสามารถนำไปใช้ได้โดยตรงหรือทำเป็นปุ๋ยน้ำเข้มข้น หรือปุ๋ยแห้ง ทั้งนี้เนื่องจากข้อจำกัดของการขนส่งในกรณีที่ใช้น้ำกากส่าโดยตรง โดยในการทำปุ๋ยน้ำเข้มข้น จะนำน้ำกากส่าที่ได้ผ่านเครื่องต้มระเหย (Evaporator) ทำให้มีความเข้มข้นมากยิ่งขึ้น โดยทั่วไปน้ำกากส่าจะมีความเข้มข้นของของแข็งประมาณร้อยละ 10 – 15 สามารถทำให้เข้มข้นเป็นร้อยละ 30 ได้ แล้วนำไปใช้ในไร่ต่อไป โดยเวลาใช้จะต้องใช้เครื่องฉีดพ่นซึ่งอาจใช้แรงคน หรือเป็นเครื่องจักรก็ได้ ในกรณีที่ต้องการทำเป็นปุ๋ยแห้งจะต้องมีการนำของแข็งเช่น กากหม้อกรองของโรงงานน้ำตาลหรือชานอ้อย มาผสมกับน้ำกากส่าที่เข้มข้น

5. กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน

ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบ Anaerobic Treatment นั้น มีจุลินทรีย์หลายกลุ่มที่ทำงานร่วมกันในการย่อยสลายสารอินทรีย์ โดยได้ก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์เป็นผลผลิตสุดท้ายของกระบวนการ แต่ในระหว่างขั้นตอนการย่อยสลายจะมีก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้นสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ในน้ำเสีย เช่น แป้ง เซลลูโลส โปรตีน และไขมัน จะถูกย่อยสลายโดยเอนไซม์ต่างๆ ที่สร้างโดยจุลินทรีย์ให้กลายเป็นสารโมเลกุลเล็ก เช่น น้ำตาลกลูโคส กรดอะมิโน และกรดไขมันอิสระ จากนั้นจุลินทรีย์จะนำสารโมเลกุลเล็กเหล่านี้ไปใช้ในเซลล์โดยกระบวนการหมักเกิดเป็นกรดอินทรีย์ , ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจน ซึ่งแบคทีเรียกลุ่ม Methanogen จะนำไปใช้ต่อและสังเคราะห์ก๊าซมีเทนออกมา ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 ลำดับขั้นตอนของปฏิกิริยาชีวเคมีที่เกิดขึ้นในการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ
ที่มา: Novac (1986)

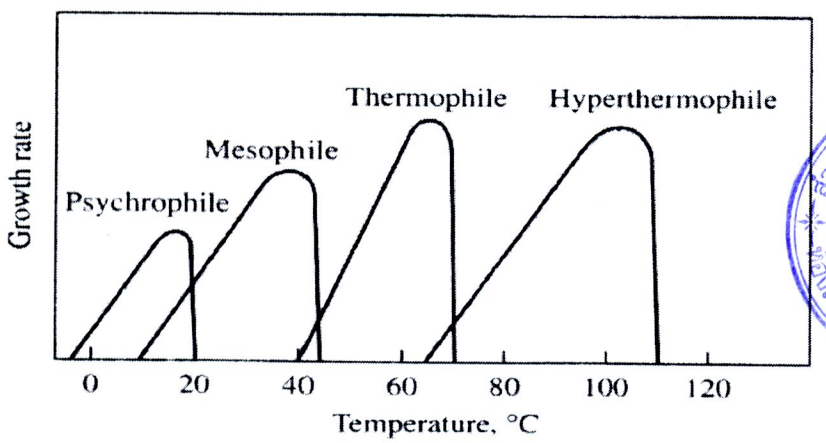
6. ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน

การบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนประกอบด้วยจุลินทรีย์ 3 กลุ่ม ทำงานอย่างต่อเนื่องกัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องรักษาสภาวะแวดล้อมให้มีสภาพที่เหมาะสมที่จะทำให้จุลินทรีย์เหล่านี้อยู่ดำรงชีพอยู่ในสิ่งแวดล้อมได้ด้วยดี ซึ่งส่งผลให้ปฏิกิริยาชีวเคมีของระบบบำบัดมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุด โดยมีปัจจัยเกี่ยวข้องที่ต้องคำนึงถึง ดังต่อไปนี้

6.1 อุณหภูมิ

อัตราของปฏิกิริยาชีวเคมีจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แต่ในระบบบำบัดทางชีวภาพจะมีอัตราเกิดปฏิกิริยาทางชีวเคมีไม่เพิ่มขึ้นมากนักเมื่อเทียบกับปฏิกิริยาเคมี ณ อุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นถ้าเพิ่มสูงเกินกว่าที่เซลล์ทำงานได้ โปรตีน กรดนิวคลีอิก และส่วนประกอบของเซลล์หลายส่วนจะถูกทำลายจนไม่อาจกลับคืนสภาพได้ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ จึงเพิ่มการเจริญเติบโตและการทำงานของเซลล์ได้จนถึงอุณหภูมิหนึ่ง เมื่ออุณหภูมิสูงกว่านั้น การทำงานและ

การเจริญเติบโตจะลดลงเป็นศูนย์อย่างรวดเร็ว (Rittmann และ McCarty, 2001) ดังแสดงในภาพที่ 8 อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนมีอยู่ 2 ช่วงคือ ช่วงการทำงานของ มีโซฟิลิกแบคทีเรีย (Mesoplilic Bacteria) ซึ่งมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 35 - 37 องศาเซลเซียส โดยในช่วงอุณหภูมินี้จะทำให้การทำงานของแบคทีเรียในกลุ่มสร้างกรดและแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนสามารถทำงานได้ดี และช่วงการทำงานของเทอร์โมฟิลิกแบคทีเรีย (Thermophilic Bacteria) ซึ่งมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 50 – 55 องศาเซลเซียส (McCarty, 1964) โดยปกติอุณหภูมิมีผลต่อการผลิตก๊าซมีเทนของแบคทีเรีย การลดหรือเพิ่มอุณหภูมิแม้เพียง 2-3 องศาเซลเซียส จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงก๊าซมีเทนเป็นอย่างมาก ซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการดำเนินระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน คือ 35 องศาเซลเซียส (Bitton, 1989)



สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

ภาพที่ 8 ผลของอุณหภูมิที่มีต่ออัตราการเจริญเติบโตของเซลล์
ที่มา: Rittmann และ McCarty (2001)

6.2 พีเอช

ค่าพีเอช เป็นตัวบ่งชี้ถึงสภาพภายในของกระบวนการไม่ใช้ออกซิเจนที่สำคัญอีกปัจจัยหนึ่ง โดยปกติค่าพีเอชที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วง 6.7 - 7.4 (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548) ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมต่อการเจริญของแบคทีเรียที่ผลิตก๊าซมีเทน และแบคทีเรียสร้างกรดอยู่ในช่วง 3.5 - 6.5 (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2543) จะเห็นว่าเป็นช่วงพีเอชที่กว้างกว่าแบคทีเรียสร้างมีเทน ดังนั้น การควบคุมพีเอชจึงมุ่งเน้นการควบคุมค่าพีเอชให้เหมาะสมกับการทำงานของแบคทีเรียสร้างมีเทนมาก กว่า นอกจากนี้ถ้าค่าพีเอชต่ำกว่า 6.6 จะเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าปกติ ระบบจะมีกลิ่นเหม็นและเกิดฝ้าตะกอนลอยมาก (ถ้าในระบบมีตะกอนเกิดขึ้นมาก) และถ้าพีเอชมีค่า 7.5-8.0 จะทำให้แบคทีเรียประเภทที่ช่วยผลิตก๊าซมีเทนมีน้อยลงและเชื่องช้า และถ้าพีเอชสูงถึง 9 ระบบ

การย่อยสลายสารอินทรีย์ของแบคทีเรียจะไม่ทำงาน จะส่งผลให้การกำจัดบีโอดีของน้ำเสียลดน้อยลงมาก จำเป็นต้องมีการควบคุมค่าพีเอชเพื่อรองรับการเกิดกรดไขมันระเหย และปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

6.3 กรดไขมันระเหยง่าย (Volatile Fatty Acids: VFAs)

กรดไขมันระเหยง่าย (VFAs) เป็นกรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ทางชีวภาพแบบไม่ใช้ออกซิเจนของกลุ่มแบคทีเรียที่สร้างกรด โดยกรดที่เกิดขึ้นในระบบได้แก่ กรดอะซิติก กรดบิวทาริก และกรดโพรไพโอนิก ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นกรดอะซิติก โดยปกติกรดไขมันระเหยง่าย ในถังบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนที่ทำงานได้ดีควรมีค่าประมาณ 50 - 500 มิลลิกรัม/ลิตร วัดในรูปกรดอะซิติก กรดไขมันระเหยง่ายที่สะสมจนมีความเข้มข้นสูงกว่าระดับที่กล่าวแสดงว่าระบบมีแบคทีเรียสร้างมีเทนน้อยเกินไป หรือแบคทีเรียสร้าง กรดผลิตกรดไขมันระเหยได้เร็วเกินไป กรดไขมันระเหยง่ายที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จะเป็นสัญญาณแสดงให้เห็นถึงการเสียสมดุลของระบบบำบัดน้ำเสีย (McKinney, 1962) เพราะทำให้ค่าพีเอชลดลงจนไม่อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการทำงานของแบคทีเรียที่อยู่ในระบบ ดังนั้น จึงควรควบคุมระบบด้วยการรักษาสภาพความเป็นด่าง (Alkalinity) ให้เหมาะสมซึ่งเป็นบัฟเฟอร์ในการรักษาการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชที่เกิดจากกรดไขมันระเหยง่าย

6.4 สภาพความเป็นด่าง

สภาพความเป็นด่างหรือค่า Alkalinity มีความสำคัญต่อระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยวัดในรูปของ ด่างไบคาร์บอเนต ซึ่งทำหน้าเป็นบัฟเฟอร์ช่วยต้านการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชเมื่อมีกรดไขมันระเหยเกิดขึ้นในระบบ ดังนั้น ค่าด่างไบคาร์บอเนตจึงต้องมีเพียงพอเพื่อรักษาระดับพีเอชในระบบ แต่โดยทั่วไปแล้วสภาพด่างทั้งหมดในระบบบำบัดน้ำเสียมักมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548) เนื่องจากในกระบวนการเกิดกรดคือกระบวนการ Hydrolysis และ Acidogenesis จะทำให้ค่า Alkalinity มีค่าลดลง แต่เมื่อปฏิกิริยาเข้าสู่กระบวนการ Methanogenesis ค่าของ Alkalinity ก็จะเพิ่มขึ้น ซึ่งตามปกติกระบวนการไม่ใช้ออกซิเจนควรมีสภาพด่างประมาณ 1,500–2,000 มิลลิกรัม/ลิตร (กรมควบคุมมลพิษ, 2546)

การตรวจสอบระบบที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือ ค่าอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยต่อระดับด่างไบคาร์บอเนต (VFAs : HCO_3) ที่อัตราส่วนน้อยกว่า 0.4 ระบบจะมีบัฟเฟอร์สูงและยังทำงานได้ดี แต่ถ้าอัตราส่วนนี้มีค่าสูงกว่า 0.8 แสดงว่าระบบกำลังอยู่ในขั้นที่พีเอชจะลดลงอย่างรวดเร็วทำให้ระบบเสียสมดุล และไม่เหมาะสมต่อการดำเนินปฏิกิริยาชีวเคมีของ

จุลินทรีย์ได้ สามารถควบคุมระบบเพื่อรักษาสภาพความเป็นด่างได้โดย การเติมสารเคมี ได้แก่ ปูนขาว โซเดียมไบคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2543)

6.5 ระยะกักพักชลศาสตร์ และ ระยะกักพักของแข็ง

ระยะกักพักชลศาสตร์(Hydraulic Retention Time: HRT) คือ ระยะกักน้ำของระบบ เป็นระยะที่แบคทีเรียสัมผัสกับน้ำเสีย การลดระยะกักพักน้ำจะทำให้ขนาดของถังปฏิกรณ์ลดลง แต่ถ้าระยะกักพักน้ำต่ำเกินไป ตะกอนแบคทีเรียจะหลุดออกจากระบบได้มาก ซึ่งมีผลให้อายุสลัดจ์ (Sludge Age) ลดลงและทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีลดลง (กรมโรงงานอุสาหกรรม, 2548) การกักพักของแข็ง (Solids Retention Time: SRT) คือระยะเวลาพักของจุลินทรีย์ในถังบำบัดน้ำเสียและการขยายพันธุ์ของแบคทีเรียชนิดไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งจะมีการขยายพันธุ์ช้า จึงส่งผลให้ถังปฏิกิริยามีขนาดใหญ่มาก ดังนั้นควรควบคุมระบบให้มีค่า SRT ให้สูงที่สุดหรืออย่างต่ำที่เพียงพอกับการขยายพันธุ์มากเท่ากับแบคทีเรียที่ไหลออกจากระบบ ปริมาณความเข้มข้นของสลัดจ์ในถังบำบัดจะแปรผันตามค่า SRT เมื่อค่า SRT สูงมาก ๆ จะส่งผลให้มีสลัดจ์ส่วนเกินมากตามไปด้วย ซึ่งเป็นข้อดีของการมีสลัดจ์ส่วนเกินอยู่ในระบบเพื่อรักษากระบวนการให้มีเสถียรภาพ และช่วยสำรองปริมาณแบคทีเรียไว้ในระบบเพื่อรองรับน้ำเสียที่มีสารพิษ หรือภาวะแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมเกิดขึ้น (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2543)

6.6 ธาตุอาหาร (nutrient)

จากอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสต่อซัลเฟอร์ (C : N : P : S) ในเซลล์มีค่าประมาณ 100 : 10 : 1 : 1 (กรมควบคุมมลพิษ, 2546) จึงจำเป็นต้องรักษาอัตราส่วนนี้ ไว้ไม่ให้น้อยกว่านี้ จุลินทรีย์จึงต้องการอาหารเสริมนอกเหนือจากคาร์บอน เช่น ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส ซึ่งอัตราส่วนระหว่างบีโอดีต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัส (BOD : N : P) อย่างน้อยควรมีค่าเท่ากับ 100 : 1 : 0.2 (McCarty, 1964) สำหรับกระบวนการไม่ใช้ ออกซิเจน นอกจากนี้ ยังมีธาตุอาหารบางอย่างที่แบคทีเรียสร้างมีเทนต้องการในปริมาณน้อยแต่ขาดไม่ได้ ได้แก่ เหล็ก โคบอลต์ นิกเกิล และซัลเฟอร์

ตารางที่ 1 ธาตุอาหารที่สำคัญอยู่ในตัวแบคทีเรียไม่ใช้ออกซิเจน

ธาตุอาหาร	กรัม/กิโลกรัมVSS	กรัม/กิโลกรัมCOD(B)*
ไนโตรเจน (N)	80-120	55-85
ฟอสฟอรัส (F)	10-25	7-18
ซัลเฟอร์ (S)	10-25	7-18
เหล็ก (Fe)	5-15	4-11

* กรัม/กิโลกรัมCOD (B) คือ ปริมาณธาตุอาหารเป็นกรัมต่อกิโลกรัม COD ของมวลแบคทีเรีย
ที่มา : เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์ (2543)

6.7 ความเป็นพิษ

สารที่เป็นพิษต่อแบคทีเรียในระบบไม่ใช้ออกซิเจนมีหลายชนิด สารที่เป็นพิษบางตัวเป็นสารอาหารที่จำเป็น แต่ต้องมีปริมาณพอเหมาะ ถ้ามีปริมาณมากเกินไปจะกลายเป็นพิษได้ ดังนี้

6.7.1 ไอออนบวก ไอออนบวกในน้ำเสียที่อาจเป็นพิษต่อแบคทีเรีย ได้แก่ โซเดียม, โปแตสเซียม แมกนีเซียม และแคลเซียม ไอออนเหล่านี้ถ้ามีความเข้มข้นที่พอเหมาะก็จะเป็นผลดีต่อแบคทีเรีย แต่ถ้าความเข้มข้นสูงเกินไปก็จะเริ่มเป็นพิษต่อแบคทีเรียโดยไอออนบวกที่มีวาเลนซีสูงจะมี ความเป็นพิษมากกว่าไอออนที่มีวาเลนซีต่ำ ซึ่งพิษจากไอออนของแมกนีเซียมและแคลเซียมมีมากกว่าโซเดียมและโปแตสเซียมถึง 10 เท่า ดังนั้นพิษของไอออนบวกจึงเพิ่มขึ้นเมื่อ วาเลนซีสูงขึ้น แต่ความเข้มข้นของไอออนบวกที่ทำให้เกิดการยับยั้งการผลิตมีเทนยังไม่เป็นที่แน่ นอนว่าเกิดขึ้น ณ ความเข้มข้นเท่าใด มีรายงานถึงความเข้มข้นของโซเดียมที่ทำให้เกิดการยับยั้งการผลิตมีเทนที่ 50 เปอร์เซ็นต์อยู่เป็นจำนวนมาก โดยค่าความเข้มข้นในงานเหล่านั้นมีค่าอยู่ระหว่าง 6 – 40 กรัม/ลิตร (กรมควบคุมมลพิษ, 2546)

6.7.2 แอมโมเนีย เกิดจากการสลายตัวของโปรตีนและเกิดจากไนโตรเจนในสารอินทรีย์ซึ่งจะปล่อยออกมาในรูปของแอมโมเนีย (NH_3) และแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ดังสมการ

$$NH_4^+ \longleftrightarrow NH_3 + H^+$$

ถ้าค่าพีเอชต่ำกว่า 7.2 ปฏิกิริยาจะดำเนินไปทางซ้าย ถ้าค่าพีเอชมากกว่า 7.2 ปฏิกิริยาจะดำเนินไปทางขวา ดังนั้นที่ค่าพีเอชสูงขึ้นก็จะมีแอมโมเนียอยู่ในระบบมากขึ้น ซึ่ง

แอมโมเนียจะเป็นพิษต่อแบคทีเรียไม่ใช้ออกซิเจนมากกว่าแอมโมเนียมไอออน ผลของแอมโมเนียไนโตรเจนต่อระบบบำบัดน้ำเสียแสดงได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลของแอมโมเนียไนโตรเจนที่มีต่อระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน

แอมโมเนีย (มิลลิกรัมN/ลิตร)	ผลกระทบ
50-200	ปริมาณพอเหมาะ
200-1,000	ยังไม่เกิดผลเสีย
1,500-3,000	เริ่มยับยั้งเมื่อพีเอชสูง
มากกว่า 3,000	เป็นพิษโดยตรง

ที่มา: McCarty (1964)

6.7.3 ซัลไฟด์ ในระบบไม่ใช้ออกซิเจนจะเกิดการรีดักชันของซัลเฟตที่มีอยู่ในน้ำเสียและการสลายตัวของโปรตีน ซัลไฟด์เพียงเล็กน้อยจะเป็นอาหารของแบคทีเรียสร้างมีเทนในขณะเดียวกันก็มีผลเสียต่อแบคทีเรียสร้างมีเทนเช่นกัน เนื่องจากสามารถตกผลึกเหล็ก นิกเกิล และโลหะที่จำเป็นต่างๆ และเมื่อซัลไฟด์ในรูปของก๊าซไฮโดรเจนที่ระดับความเข้มข้นสูงกว่า 100-150 มิลลิกรัม/ลิตร จะเป็นพิษต่อแบคทีเรียที่สร้างมีเทน (กรมโรงานอุตสาหกรรม, 2548)

6.7.4 โลหะหนัก แบคทีเรียที่สร้างมีเทนต้องการธาตุจำเป็นหลัก 4 ชนิดคือ เหล็ก โคบอลต์ นิกเกิล และซัลเฟอร์ แต่ในปริมาณที่ต่ำมาก ส่วนโลหะหนักที่อาจเป็นพิษต่อแบคทีเรียได้แก่ แมงกานีส สังกะสี แคดเมียม นิกเกิล ทองแดง และโครเมียม โลหะหนักเหล่านี้จะอยู่ในรูปไอออน พบว่า ลำดับความเป็นพิษของโลหะหนักจะเรียงตามลำดับดังนี้ คือทองแดง เหล็ก แคดเมียม และสังกะสี แต่ความเป็นพิษของโลหะหนักลดลงได้ถ้าน้ำเสียมีปริมาณซัลไฟด์พอเหมาะเพราะสามารถรวมกับโลหะหนักเกิดเป็นโลหะซัลไฟด์ซึ่งสามารถตกตะกอนได้ (กรมควบคุมมลพิษ, 2546)

6.7.5 ศักยภาพในการให้และรับอิเล็กตรอน (Oxidation-Reduction Potential) ปฏิกิริยาที่มีการถ่ายเทอิเล็กตรอนจากสารหนึ่งไปสู่อีกสารหนึ่งเรียกว่าปฏิกิริยาออกซิเดชั่น-รีดักชั่น (Oxidation-Reduction Reaction) หรือปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox Reaction) ความแตกต่างด้านความสามารถในการให้และรับอิเล็กตรอน ของสารละลายระหว่างปฏิกิริยาทั้งสอง อาจวัดได้ด้วยค่าออกซิเดชั่น-รีดักชั่นโพเทนเชียล หรือเรียกสั้นๆ ว่า ORP ค่าโออาร์พีในทางทฤษฎีจะแสดงถึงความสามารถในการรับอิเล็กตรอนของสารละลาย ถ้าวัดค่าโออาร์พีได้ค่าเป็นบวกมากแสดงว่า

ระบบมีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนได้ดี เช่น มีออกซิเจนละลาย แต่ถ้าค่าโออาร์พีได้ค่าเป็นลบแสดงว่า มีความสามารถในการให้อิเล็กตรอนได้ดี เนื่องจากปฏิกิริยาชีวเคมีที่เกิดขึ้นในระบบบำบัดน้ำเสียส่วนใหญ่มักเป็นปฏิกิริยารีดอกซ์ โดยที่สารอินทรีย์ในน้ำเสียมักเป็นตัวให้อิเล็กตรอนและเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญ ในระบบไม่ใช้ออกซิเจน คาร์บอนไดออกไซด์ หรือกรดอะซิติก จะเป็นตัวรับอิเล็กตรอน โดยถังย่อยไม่ใช้ออกซิเจนที่ทำงานได้ดีจะต้องมีค่าโออาร์พีอยู่ในช่วง -300 ถึง -500 มิลลิโวลท์ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548) และถังย่อยที่ผลิตก๊าซมีเทนได้ดีควรมีค่าโออาร์พีอยู่ในช่วง -520 ถึง 530 มิลลิโวลท์ (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2543) ถ้าค่าโออาร์พีมีค่าเป็นลบน้อย ๆ หรือมีค่าความเป็นบวกย่อมแสดงว่าปฏิกิริยาย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนเกิดขึ้นน้อยหรือ ไม่เกิดขึ้น

7. ระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ

ระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งอาศัยจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ (Biodegradable Organic Compound) โดยจุลินทรีย์จะใช้สารอินทรีย์เป็นอาหาร และสารตั้งต้นในกระบวนการดำรงชีวิต การเจริญเติบโต และการสังเคราะห์เซลล์ใหม่ (New Cell) และได้ผลผลิตเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) น้ำ (H_2O) และสารตกค้างซึ่งไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Non Biodegradable Residual)

กระบวนการบำบัดทางชีวภาพ สามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ ตามชนิดของจุลินทรีย์ที่มีบทบาทสำคัญในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ได้แก่ การบำบัดน้ำเสียแบบใช้อากาศ หรือใช้ออกซิเจน (Aerobic Wastewater Treatment) และการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ หรือไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Wastewater Treatment)

7.1 กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบใช้อากาศ (Aerobic Wastewater Treatment)

เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียโดยจุลินทรีย์กลุ่มที่ต้องอาศัยออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved Oxygen) หรือ ออกซิเจนอิสระ ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบคทีเรียกลุ่มที่ใช้อากาศ (Aerobic Bacteria) สามารถจำแนกได้เป็น 2 ขั้นตอน ตามลำดับดังนี้ คือ

ขั้นตอนที่ 1 เป็นกระบวนการนำสารอินทรีย์หรือสารอาหารเข้าไปในเซลล์ โดยจุลินทรีย์จะส่งเอนไซม์ (Enzyme) ออกมาย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มาเกาะติดที่ผนังเซลล์เพื่อเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของสารโมเลกุลเล็กที่จะสามารถซึมผ่านเข้าไปในเซลล์ของจุลินทรีย์ได้

ขั้นตอนที่ 2 เป็นกระบวนการทางชีวเคมีภายในเซลล์จุลินทรีย์ เพื่อที่จะผลิตพลังงานไปใช้ในกิจกรรมต่าง ๆ และการสร้างเซลล์ใหม่ โดยเขียนอยู่ในรูปของสมการโดยรวมได้ ดังนี้

$$\text{สารอินทรีย์} + N + P \xrightarrow[O_2\ (\text{จากอากาศ})]{\text{จุลินทรีย์ที่ใช้}\ O_2\ \text{อิสระ}} \text{เซลล์ใหม่} + CO_2 + H_2O + \text{พลังงาน}$$

เมื่อสารอินทรีย์ในน้ำเสียถูกเปลี่ยนรูปมาเป็นจุลินทรีย์เซลล์ใหม่ จะรวมตัวกันเป็นฟล็อก (Biological Blocculation) ก็จะมีน้ำหนักมากขึ้น และแยกออกจากน้ำเสียได้ง่ายด้วยการตกตะกอน กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบใช้อากาศ จำแนกได้เป็น 2 ประเภทหลัก คือ

1) ระบบบำบัดที่จุลินทรีย์แขวนลอยอยู่ในระบบ (Suspended System) เช่น บ่อแอโรบิก (Aerobic Pond) บ่อเติมอากาศ (Aerated Lagoon) ระบบแอคติเวทเต็ดสลัดจ์ (Activated Sludge)

2) ระบบบำบัดที่จุลินทรีย์เกาะติดผิวตัวกลาง หรือ ระบบฟิล์มตรึง (Fixed Film System) เช่น ระบบโปรยกรอง (Trickling Filter) และระบบแผ่นหมุนชีวภาพ (Rotating Biological Contactor)

7.2 กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ (Anaerobic Wastewater Treatment)

เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียในสภาวะไร้ออกซิเจน โดยจุลินทรีย์จะอาศัยสารประกอบอื่นเป็นตัวรับอิเล็กตรอนแทนออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved Oxygen) หรือออกซิเจนอิสระ ระบบกำจัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศมี 5 ชนิด ดังนี้

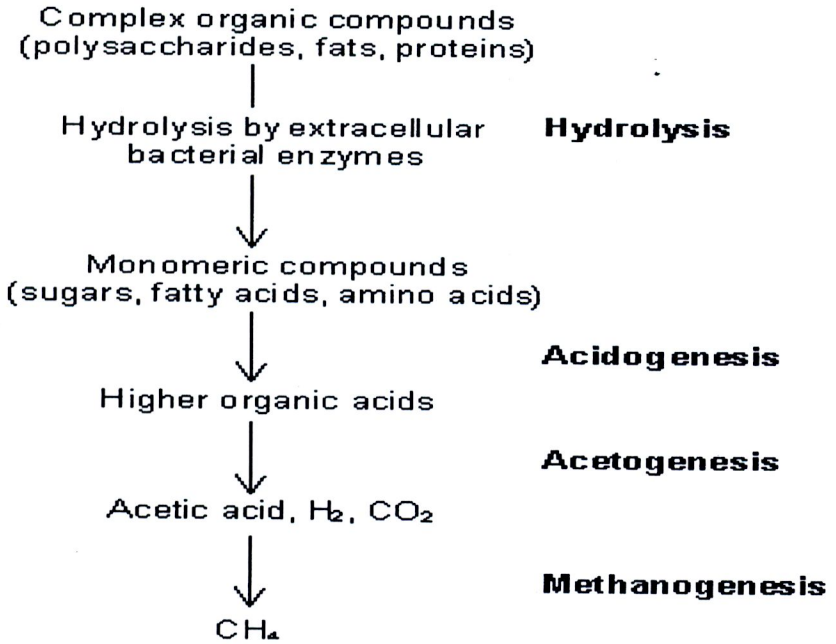
7.2.1 Anaerobic Contatc Process (AC) เป็นระบบเลี้ยงตะกอนแบบแขวนลอยอยู่ในถังกำจัดโดยอาศัยเครื่องกวนซึ่งช่วยสร้างการสัมผัสระหว่างน้ำเสียกับแบคทีเรียอย่างทั่วถึง ระบบดังกล่าวใช้วิธีกักเก็บแบคทีเรียโดยอาศัยถังตกตะกอนในการแยกตะกอนแบคทีเรียออกจากน้ำเสีย และหมุนกลับมายังถังการจัดเพื่อประสิทธิภาพการกำจัดและลดปริมาณถังกำจัด

7.2.2 Anaerobic Filter Process (AF) เป็นระบบเลี้ยงตะกอนแบบเกาะเป็นแผ่นฟิลม์อยู่บนตัวกลาง (Media) ที่อยู่กับที่น้ำเสียจะสัมผัสกับมวลของแบคทีเรียโดยการไหลขึ้น (up flow) หรือลง (down flow) ผ่านถังกำจัดซึ่งมีตัวกลางบรรจุอยู่

7.2.3 Anaerobid Rotating Biological Contractor Process(ARBC) เป็นระบบเลี้ยงตะกอนแบบเกาะเป็นแผ่นฟิลม์อยู่บนตัวกลางที่หมุนอยู่ในน้ำเสียและการผสมกันของน้ำเสีย ตัวกลางมีลักษณะเป็น 2 แบบคือ แบบแผ่น (Discmedia) และแบบบรรจุกรง (Packed Drum Media)

7.2.4 Anaerobic Fluidiized Bed Process (AFB) เป็นระบบเลี้ยงตะกอนแบบเกาะเป็นแผ่นฟิลม์อยู่บนเม็ดตัวกลางขนาดเล็กที่แขวนลอยในถังกำจัดเม็ดตัวกลางถูกยกให้ลอยตัวและแขวนลอยอยู่ด้วยอัตราการไหลปริมาณสูง ที่เกิดจากการหมุนเวียนของน้ำเสียที่ออกจากระบบ รวมกับน้ำเสียที่เข้าระบบจากก้นถังกำจัดอัตราการไหลดังกล่าวจะต้องมีขนาดพอดีที่จะยกเม็ดตัวกลางให้ลอยขึ้น แต่ไม่มากเกินไปจนพาเม็ดตัวกลางหลุดออกจากระบบ

7.2.5 Upflow Anaerobic Sludge Blanket Process (UASB) เป็นระบบเลี้ยงตะกอนให้เป็นแบบก้อนเม็ด ที่มีขนาดใหญ่พอที่จะจมได้ด้วยน้ำหนักของตัวเองจึงไม่ถูกพาออกไปจากระบบ น้ำเสียถูกนำเข้าระบบแบบไหลขึ้นจากก้นถึงกำจัดเป็นการช่วยการสัมผัสกับแบคทีเรีย และป้องกันไม่ให้ก้อนเม็ดแบคทีเรียจมตัวจนสะสมกันแน่นที่ก้นถังกำจัด



ภาพที่ 9 กระบวนการเมตาบอลิซึมของจุลินทรีย์พวก Anaerobe ในการย่อยสลายสารอินทรีย์
ที่มา: Glazer and Nikaida (1995)

กลไกการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้อากาศหรือออกซิเจน สามารถแบ่งได้เป็น 4 ขั้นตอน ตามลำดับดังนี้ (ดังภาพที่ 9)

ขั้นตอนที่ 1 เป็นกระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) โดยอาศัยเอนไซม์ (Enzyme) ที่ถูกส่งออกมานอกเซลล์ เพื่อเปลี่ยนสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ให้เป็นสารโมเลกุลเล็ก เป็นปฏิกิริยาแรกที่เกิดขึ้นเพื่อสลายอินทรีย์เชิงซ้อนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ที่มักจะไม่ละลายน้ำให้แตกตัวเป็น

สารอินทรีย์เชิงเดี่ยวที่เป็นอนุมูลเริ่มต้น (Building Blocks) ของชีวโมเลกุลต่าง ๆ ได้แก่ คาร์โบไฮเดรท โปรตีน ไขมัน ปฏิกิริยาเหล่านี้ต้องอาศัยการขับ Exocellular Enzymes จากจุลินทรีย์หลายชนิดที่อยู่ร่วมกันในระบบ และโดยที่เป็นการเปลี่ยนสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ให้เล็กลงทำให้ละลายน้ำได้ดีขึ้น และสามารถถูกดูดซึมเข้าไปภายในเซลของจุลินทรีย์ประเภท Saprophytes ได้ บางครั้งจะเรียกขั้นตอนนี้ว่า Solubilization

ขั้นตอนที่ 2 เป็นกระบวนการสร้างกรด (Acidogenesis) โดยแบคทีเรียประเภทสร้างกรด (Acid Forming Bacteria) จะย่อยสลายสารละลายอินทรีย์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮโรไลซิส ให้เป็นกรดอินทรีย์โมเลกุลสั้น ๆ ที่ระเหยได้ง่าย หรือ Volatile Fatty Acids (VFAs) เช่น Valeric Acid, Butyric Acid, Propoinic Acid เป็นต้น จากนั้นก็จะมีจุลินทรีย์อีกกลุ่มมาย่อยสลายกรดอินทรีย์เหล่านี้ได้เป็น Acetic acid, Formic Acid, H_2 และ CO_2

ขั้นตอนที่ 3 เป็นกระบวนการสร้างกรดอะเซติกจากกรดไขมันระเหย (Acetogenesis) โดยแบคทีเรียกลุ่มอะซีโตเจนิก (Acetogenic Bacteria) จะเปลี่ยนกรดไขมันระเหย ไปเป็นผลผลิตสำคัญในการสร้างก๊าซมีเทน ได้แก่ กรดอะเซติก กรดฟอร์มิก ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจน

ขั้นตอนที่ 4 เป็นกระบวนการสร้างมีเทน (Methanogenesis) โดยผลผลิตที่ได้จากแบคทีเรียสร้างกรดในขั้นตอนที่ 3 จะถูกเปลี่ยนไปเป็นก๊าซมีเทนโดยแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน (Methanogenic Bacteria) แบคทีเรียกลุ่มที่สร้างมีเทนนี้ แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ชนิดแรก คือ แบคทีเรียที่สร้างมีเทนจากคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน (Hydrogenotrophic Bacteria) โดยได้คาร์บอนมาจากคาร์บอนไดออกไซด์และได้พลังงานจากไฮโดรเจน ชนิดที่สอง คือ แบคทีเรียที่สร้างมีเทนจากกรดอะเซติก (Acetotrophic Bacteria) ซึ่งใช้อะเซเตดเป็นตัวรับอิเล็กตรอน และใช้ไฮโดรเจนเป็นแหล่งพลังงาน ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการโดยรวมได้ ดังนี้

$$\text{สารอินทรีย์} + N + P \xrightarrow[O_2 \text{ (จากสารประกอบ)}]{\text{จุลินทรีย์ที่ไม่ใช้ } O_2 \text{ อิสระ}} \text{เซลล์ใหม่} + CO_2 + H_2O + CH_4 + \text{พลังงาน}$$

จากกลไกการย่อยสลายของสารอินทรีย์ในระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศทั้ง 4 ขั้นตอน สรุปได้ว่าในกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่สร้างกรด และกลุ่มที่สร้างมีเทน ดังนั้น จึงจำเป็นต้องรักษาสภาวะแวดล้อมให้เหมาะสมต่อการทำงานร่วมกันอย่างต่อเนื่องของแบคทีเรียทั้ง 2 กลุ่ม หากการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มหนึ่ง

เปลี่ยนไป ก็จะมีผลต่อการทำงานแบคทีเรียอีกกลุ่มหนึ่ง และประสิทธิภาพโดยรวมของระบบได้ ตัวอย่างเช่น กรณีที่ระบบได้รับสารอาหารหรือปริมาณสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นมากกว่าปกติ แบคทีเรียกลุ่มที่สร้างกรดก็จะมีอัตราการเจริญเติบโตสูงขึ้น มีการสร้างกรดอินทรีย์และผลผลิตต่าง ๆ เพิ่มขึ้น ก็จะส่งผลให้แบคทีเรียกลุ่มที่สร้างมีเทนซึ่งมีความสามารถในการเจริญเติบโตต่ำกว่า ไม่สามารถย่อยสลายกรดอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นได้ทัน ก็จะมีปริมาณกรดอินทรีย์สะสมเพิ่มขึ้น ซึ่งถ้าระบบไม่มีกำลังของบัฟเฟอร์เพียงพอ ค่า pH ของระบบที่ลดลงก็จะไปมีผลยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กลุ่มที่สร้างมีเทน จนอาจทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง หรือการทำงานของระบบล้มเหลวได้ในที่สุด

กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ สามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภทหลัก เช่นเดียวกับกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบใช้อากาศ คือ

1) Suspended System เช่น บ่อแอนแอโรบิก (Anaerobic Pond) ถังย่อยแบบธรรมดา (Anaerobic Digester) ถังย่อยแบบสัมผัส (Anaerobic Contact) เป็นต้น

2) Fixed Film System เช่น ถังกรองไร้อากาศ (Anaerobic Filter) ระบบชั้นลอยตัวไร้ออกซิเจน (Anaerobic Fluidized Bed) เป็นต้น

8. ข้อดีของระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบไม่ใช้ออกซิเจน

8.1 สารอินทรีย์กลายเป็นก๊าซ CH_4, CO_2 80-90% สร้างเป็น Cell ใหม่ได้ 10-20%

8.2 มีปริมาณอาหารเสริม เช่น N, P, K, Ca และอื่น ๆ น้อย

8.3 ควบคุมได้ง่าย และแบคทีเรียเจริญเติบโตต่ำ

9. ข้อเสียของระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบไม่ใช้ออกซิเจน

9.1 Growth Rate ของ Bacteria ต่ำทำให้ใช้เวลามาก และ น้ำเสียอยู่ในระบบนาน ทำให้เปลือง Capacity ในการรับภาระ

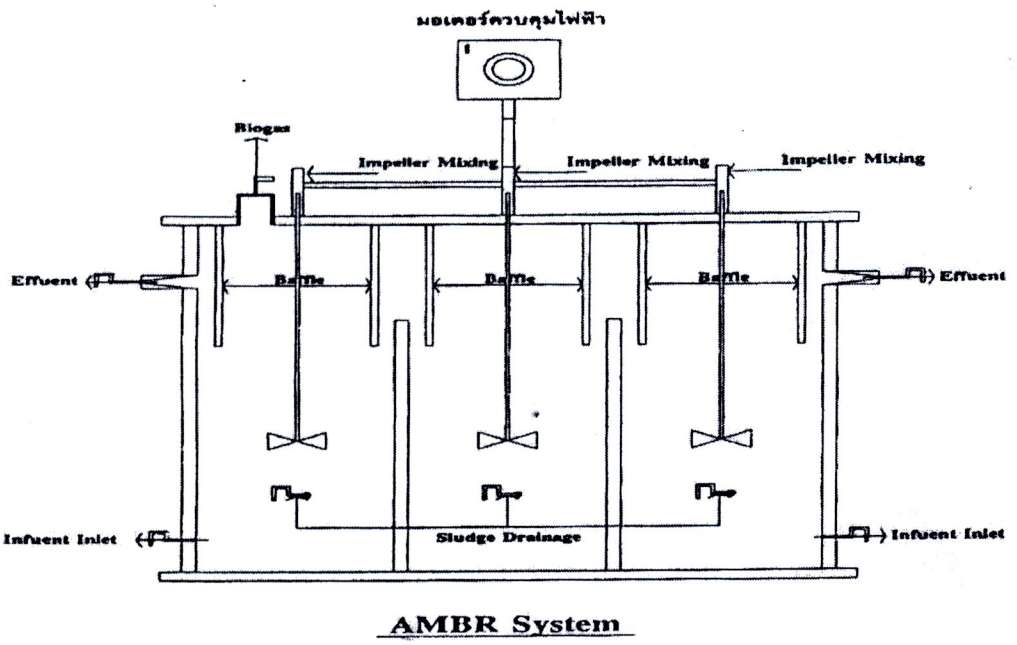
9.2 Start up ช้า (ไม่เหมาะกับ Batch Process) และปรับตัวรับ Shock Load ไม่ดี

9.3 H_2S ทำให้เน่าเหม็น น้ำดำ (สารประกอบซัลไฟด์)

10. ระบบเอเอ็มบีอาร์ (Anaerobic Migrating Blanket Reactor ; AMBR)

ระบบเอเอ็มบีอาร์ เป็นระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน มีการบำบัดแบบต่อเนื่องและสามารถสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ได้ โดยเม็ดตะกินจุลินทรีย์มีลักษณะหนา ทรงกลม สีดำ ภายในระบบถูกแบ่งออกเป็นห้อง ๆ อย่างต่ำ 3 ห้องมี Baffies กั้นระหว่างห้องในห้องมีใบพัดติดอยู่

ตรงกลางเพื่อทำการกวนให้เม็ดจุลินทรีย์และน้ำเกิดการสัมผัสกันอย่างทั่วถึง น้ำเสียที่เข้าสู่ระบบจะมีการไหลในแนวนอนจากห้องไปยังห้องสุดท้าย ในระบบนี้ทางเข้าและทางออกของน้ำเสียจะติดตั้งอยู่ตรงกลางห้องและไม่มีการติดตั้งระบบแยกก๊าซและของแข็ง (Complex Gas-Solid-Separation) และระบบการกระจายอาหาร (Feed-Distribution System) ในระบบจะมีการไหลของน้ำเสียในแนว นอนเท่านั้น จะไม่มีการไหลในแนวขึ้นลง และในแต่ละห้องของระบบบำบัดมีการติดตั้งใบพัดทุกห้อง ๆ ละ 1 อันเพื่อใช้ในการกวนให้น้ำเสียและเม็ดตะกอนจุลินทรีย์เกิดการสัมผัสกันอย่างทั่วถึง ในการเดินระบบจะทำการเดินเครื่องให้ใบพัดหมุนสลับกันไปมาเพื่อให้น้ำเสียเกิดการไหลแบบย้อน กลับ เป็นการช่วยป้องกันการสะสมของ Biomass และ Biomass ที่มีขนาดเล็กจะสามารถหลุดออกจากระบบได้ดีกว่า Biomass ที่มีขนาดใหญ่



ภาพที่ 10 แบบจำลองระบบเอเอ็มบีอาร์ในห้องปฏิบัติการ (AMBR System Model)
ที่มา: Angenent and Sung (2001)

สรุปได้ว่าระบบเอเอ็มบีอาร์มีจุดเด่น(Angenent and Sung, 2001) คือ ระบบเอเอ็มบีอาร์ไม่มีการติดตั้งระบบแยกแก๊สและของแข็ง (Complex Gas-Solid-Separation) และระบบกระจายอาหาร (Feed-Distribution System) การเคลื่อนที่ของน้ำเสียในระบบจะมีการไหลของน้ำเสียในแนวนอนเท่านั้น และภายในระบบมีการแบ่งเป็นห้อง ๆ อย่างต่ำ 3 ห้อง ดังภาพที่ 10

11. ลักษณะสมบัติของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์

11.1 ประเภทของเม็ดตะกอนจุลินทรย์ จำแนกได้ 4 ชนิด ดังนี้ (Lettinga et al., 1984)

11.1.1 Rod เป็นเม็ดตะกอนมีลักษณะรูปร่างทรงกลมและมีการรวมตัวแบคทีเรียค่อนข้างหนาแน่น ประกอบด้วยแบคทีเรียกลุ่ม *Methanothrix sp.* ที่มีรูปร่างเป็นท่อนสั้น พบในถังหมักที่ใช้บำบัดน้ำเสียประเภทโรงงานแป้งและน้ำตาล

11.1.2 Filamentous เป็นเม็ดตะกอนที่ประกอบด้วยแบคทีเรียแบบท่อนต่อกันเป็นสายยาวมีลักษณะของการจับตัวของแบคทีเรียไม่หนาแน่นเท่าประเภท Rod

11.1.3 Sarcina Granules เป็นเม็ดตะกอนที่มีลักษณะรูปร่างทรงกลมและมีการรวมตัวเกาะกันเป็นกลุ่มพบได้ในถังหมักที่มีความเข้มข้นของกรดอะซีติกในระดับสูง ส่วนใหญ่ประกอบด้วย แบคทีเรียกลุ่ม Methanosacina-like cells เป็นเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่มีขนาดเล็กทำให้หลุดออกจากระบบได้ง่าย

11.1.4 Spinky Granules เป็นเม็ดตะกอนที่ประกอบด้วยแบคทีเรียพวกเส้นใยยาวเป็นส่วนใหญ่ พบว่า เม็ดตะกอนประเภทนี้ประกอบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตมากกว่าร้อยละ 60 (Lettinga et al., 1984)

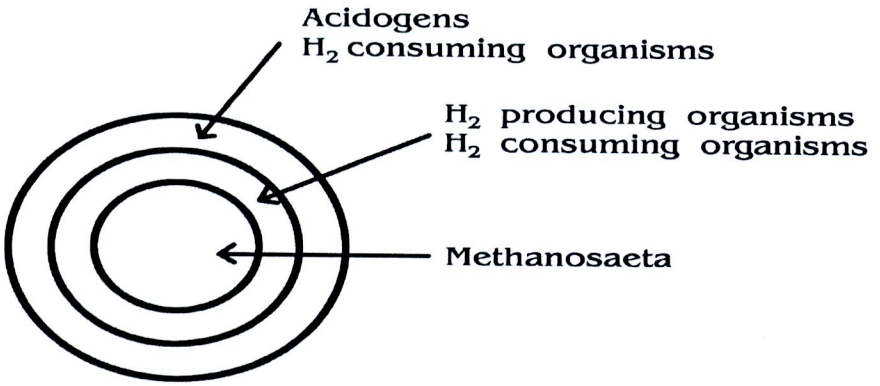
11.2 โครงสร้างของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์

เม็ดตะกอนจุลินทรีย์มีโครงสร้างและขนาดของแต่ละชั้นขึ้นอยู่กับอัตราการย่อยสลายสารอาหาร และการแพร่ของสารที่ได้จากปฏิกิริยาภายในเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ โดยโครงสร้างชั้นกลางของเม็ดตะกอนประกอบด้วย Methanotrix Aggregates Rod และมี Methanotrix ที่มีรูปร่างเป็นวงล้อมรอบ มีการจับตัวกันเป็นชั้นตามปฏิกิริยาและมีการส่งผ่านสารอาหารเข้าภายในชั้น สามารถแบ่งได้ 3 ชั้นคือ ดังภาพที่ 11

11.2.1 ชั้นนอก ประกอบด้วยแบคทีเรียกลุ่ม Acidogens และ H_2 Consuming Organisms

11.2.2 ชั้นกลาง ประกอบด้วยแบคทีเรียกลุ่ม H_2 Consuming Organisms และ H_2 Producing Organisms

11.2.3 ชั้นใน ประกอบด้วยแบคทีเรียกลุ่มAcetoclastic โดยมี Methanosaeta เป็นส่วนใหญ่



ภาพที่ 11 แบบจำลองโครงสร้างของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์

ที่มา: McLoad et al. (1990)

11.3 กระบวนการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์

จากการศึกษาวิจัยของ Sam - Soon และคณะ (1987) พบว่าเม็ดตะกอนจุลินทรีย์เกิดจากปฏิกิริยาของ *Methanobacterium Stain AZ* ซึ่งเป็น H_2 - Utilizing methane Bacteria ชนิดหนึ่งต่อสภาพแวดล้อมโดยสภาพแวดล้อมที่มี Hydrogen Partial Pressure สูง อัตราส่วน ATP/ADP สูง *Methanobacterium Stain AZ* จะสามารถใช้ H_2 เป็นแหล่งพลังงานและกรดอะมิโนที่จำเป็นได้ แต่จะไม่สามารถสร้าง Cysteine ได้ ซึ่ง Cysteine เป็นกรดอะมิโนชนิดหนึ่งที่มีส่วนสำคัญในกระบวนการสร้างโปโต- พลาสซึม จึงทำให้ *Methanobacterium Stain AZ* ต้องใช้ Cysteine จากภายนอกเซลล์ในสภาพ แวดล้อมข้างต้นและมีปริมาณ NH_3 - N เพียงพอ แต่ Cysteine จากภายนอกมีปริมาณจำกัด ทำให้ *Methanobacterium Stain AZ* สร้างกรดอะมิโนขึ้นในปริมาณมาก เมื่อภายในเซลล์มีปริมาณกรดะมิโนมากเกินไปก็จะถูกปล่อยออกสู่ภายนอกและกรดอะมิโนที่ถูกปล่อยออกมานั้นจะรวมตัวกันเป็น Polypeptide ล้อมรอบจุลินทรีย์ทำให้เกิดกลุ่มของเม็ดตะกอนขึ้น ซึ่งสามารถนำมาสรุปเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การเคลื่อนย้ายทางฟิสิกส์โดยมีแรงเข้ามาเกี่ยวข้อง ได้แก่ แรงดันของน้ำ แรงจากการแพร่ และแรงโน้มถ่วงของโลก เป็นต้น ซึ่งทำให้เกิดการชนกันระหว่างแบคทีเรีย

ขั้นตอนที่ 2 การทำให้เซลล์สัมผัสกันเกิดการรักษาสภาพ โดยมีแรงที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ แรงตึงผิว แรงดึงดูดระหว่างประจุ แรง Hydrophobicity และ Van Der Walls Forces เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 3 การทำให้เกิดการรวมตัวกันใหญ่ขึ้น โดยมีแรงที่เกี่ยวข้องคือ Microbial Forces ได้แก่ การเพิ่มจำนวนจากการรวมตัวของเซลล์ ผลผลิตของ Extracellular Polymer จากแบคทีเรีย และการเปลี่ยนแปลงของ Metabolic

12. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Angenent และ Sung (2001) ได้ศึกษาการพัฒนาระบบเอเอ็มบีอาร์ ในระดับห้องปฏิบัติการ โดยการเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับระบบยูเอเอสบี และระบบเอเอสบีอาร์ ในการบำบัดสารอินทรีย์ ในน้ำเสียสังเคราะห์พบว่าระบบเอเอ็มบีอาร์มีอัตราการกำจัดค่าซีโอดีดีที่สุดคือ 30 g/l-d เม็ดตะกอนจุลินทรีย์มีความทนทานและมีขนาดใหญ่กว่าระบบยูเอเอสบี 3 เท่า Biomass สูงสุดหลังเดินระบบ 55 วัน และระบบเอเอสบีอาร์มีอัตราการกำจัดค่าซีโอดีต่ำที่สุด คือ 19 g/l-d

Angenent, Sung และ Raskin (2004) ได้ทำการศึกษาการสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรย์ และเส้นใย Methanosaeta ในระบบเอเอ็มบีอาร์ ในระดับห้องปฏิบัติการในน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่าเส้นใย Methanosaeta ยาวประมาณ 1 เซนติเมตร และBiomass มีส่วนประกอบของเส้นใย Methanosaeta ร้อยละ 30 โดยมี Archaea และMethanosaeta Concilii เป็นองค์ประกอบสำคัญ เม็ดตะกอนจุลินทรีย์มีลักษณะหนา ทรงกลม สีขาวเทา การรวมตัวของเม็ดตะกอนจุลินทรย์ขึ้นอยู่กับชนิดของจุลินทรีย์และแรงดันของน้ำเสียในระบบ

Lin และ Haw-Tay (2004) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ของระบบเอเอ็มบีอาร์ และระบบยูเอเอสบีที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูง ภายใต้เงื่อนไขการทดลองเดียวกัน พบว่าเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ของระบบเอเอ็มบีอาร์ มีสีเข้มเกือบดำ ขนาดเล็ก และมีความหนาแน่นมากกว่าในการทดลองในระบบยูเอเอสบี และมีอัตราการเคลื่อนย้ายของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ต่ำกว่าในระบบยูเอสบี

สุมลรัตน์ นิ่มกิ่งรัตน์ (2548) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของการบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยระบบเอเอ็มบีอาร์ พบว่า ที่ระยะเวลากักเก็บน้ำ 12 และ 24 ชั่วโมง สามารถบำบัดซีโอดีที่ค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์สูงสุด 2.0 g COD/m^3 มีประสิทธิภาพในการบำบัดมากกว่าร้อยละ 80 มีสภาวะที่เหมาะสมต่อการดำเนินระบบคือ อุณหภูมิ 30 - 40 องศาเซลเซียส ค่าพีเอชอยู่ในช่วง 7.61 - 8.51 ค่ากรดไขมันระเหยง่ายที่เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์ คือ 50 - 500 มิลลิกรัม/ลิตร as $CaCO_3$ และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้น

ธนัสนี สมบูรณ์ (2550) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของการบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียจากโรงงานผลิตน้ำมันปาล์มโดยระบบเอเอ็มบีอาร์ พบว่า ที่ระยะเวลากักเก็บน้ำ 72, 48 และ 24 ชั่วโมง ระบบสามารถรองรับบรรทุกสารอินทรย์ได้ที่ 1.0 - 4.0 g BOD/m^3, 2.0 g BOD/m^3 และ 2.0-5.0 g BOD/m^3 ตามลำดับ มีประสิทธิภาพในการบำบัดมากกว่าร้อยละ 90 มีสภาวะที่เหมาะสมต่อการดำเนินระบบคือ อุณหภูมิ 23-35 องศาเซลเซียส ค่าพีเอชอยู่ในช่วง 6.70-7.88 ค่ากรดไขมันระเหยง่ายที่เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์ คือ 170-1,450 มิลลิกรัม/ลิตร as $CaCO_3$ ค่าของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายอยู่ในช่วง 74 - 7,875 มิลลิกรัม/ลิตร และมีปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซ

มีเทนสูงสุดโดยเฉลี่ยที่เวลากักเก็บน้ำ 144 ชั่วโมง เท่ากับ 45.05 และ 31.99 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ