ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการหมักย่อยแบบไร้อากาศเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ
Factors Affecting Anaerobic Digestion Efficiency to Produce Biogas

ปิยะวดี ศรีวิชัย[1*] และชุมาพร รถสีดา[1]
Piyavadee Srivichai[1*] and Chumaporn Rodsrida[1]

Received: December 17, 2019; Revised: May 22, 2020; Accepted: May 22, 2020

บทคัดย่อ

จากวิกฤติการขาดแคลนพลังงานที่เกิดขึ้น การพิจารณาหาแหล่งพลังงานทดแทน (Renewable Energy) จึงมีความสำคัญในยุคปัจจุบัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งพลังงานทดแทนจากก๊าซชีวภาพ (Biogas) ซึ่งมาจากกระบวนการหมักย่อยแบบไร้อากาศ (Anaerobic Digestion) ของสารชีวมวล และของเสียอินทรีย์ต่าง ๆ เนื่องจากก๊าซชีวภาพเป็นพลังงานทดแทนที่สะอาดเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เช่น การให้ความร้อน (Heating) การขนส่ง (Transportation) แสงสว่าง (Lighting) และการผลิตกระแสไฟฟ้า (Electricity) ดังนั้นเพื่อให้ได้ก๊าซชีวภาพที่มีคุณภาพจากกระบวนการหมักย่อยแบบไร้อากาศที่มีประสิทธิภาพ บทความนี้จึงสนใจทำการทบทวนและรวบรวมผลของปัจจัยต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิ (Temperature) ค่าพีเอช (pH) อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate) ระยะเวลากักเก็บ (Retention Time) ปริมาณธาตุอาหาร (Nutrients) ความชื้น (Moisture) ปริมาณของแข็งรวม (Total Solids) การกวนผสม (Mixing) และอัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพความเป็นด่าง (Volatile Fatty Acids to Alkalinity) ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ เพื่อเป็นแนวทางเบื้องต้นในการพิจารณาแก่ผู้ที่สนใจใช้ระบบหมักย่อยแบบไร้อากาศในการผลิตก๊าซชีวภาพเป็นพลังงานทดแทน

คำสำคัญ : ก๊าซชีวภาพ; การหมักย่อยแบบไร้อากาศ; ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดก๊าซชีวภาพ

[1] *คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา*
[1] *Faculty of Medicine, University of Phayao*
[*] *Corresponding Author E - mail Address: u4108047@hotmail.com*

Abstract

Under the energy crisis, searching for the source of renewable energy plays an important role nowadays. Especially, biogas as the renewable energy generated from the anaerobic digestion process of various biomass and organic wastes. Due to biogas is clean renewable energy and environmentally friendly, it can be used beneficially in many ways such as heating, transportation, lighting, and electrical production. Thus, to obtain a qualified biogas from an efficient anaerobic digestion process, this paper is interested in reviewing several factors such as pH, carbon to nitrogen ratio, organic loading rate, retention time, moisture, total solids, nutrient, mixing, and volatile fatty acids to alkalinity ratio, etc. These factors are the vital factors influencing the biogas production efficiency. Moreover, it can be used as the basic guideline for considering the anaerobic digestion application to produce further biogas as a renewable energy.

Keywords: Biogas; Anaerobic Digestion; Factor; Efficiency

บทนำ

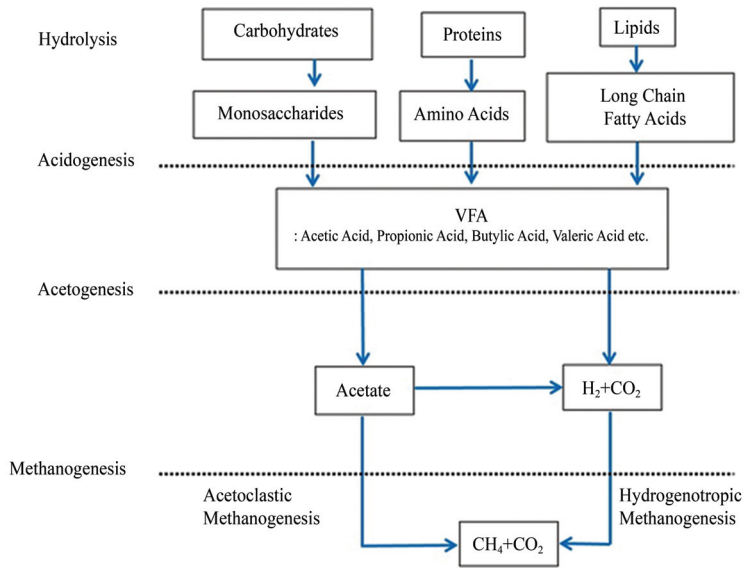
พลังงานเป็นสิ่งสำคัญต่อการดำรงและพัฒนาคุณภาพชีวิตของมนุษย์ พลังงานได้ถูกนำไปใช้ประโยชน์ให้หลายภาคส่วน เช่น ทางอุตสาหกรรม การเกษตร ภาคครัวเรือน เป็นต้น จากการขยายตัวทางเศรษฐกิจและสังคมเมืองอย่างรวดเร็ว รวมถึงปัญหาแหล่งพลังปิโตรเลียม ก๊าซธรรมชาติและถ่านหินที่มีอยู่อย่างจำกัด ส่งผลให้ความต้องการใช้พลังงานทดแทนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยกระทรวงพลังงานได้กำหนดให้มีสัดส่วนการใช้พลังงานทดแทนเพิ่มขึ้นจาก 7,413 พันตัน น้ำมันดิบ ในปี พ.ศ. 2555 เป็น 25,000 น้ำมันดิบ ในปี พ.ศ. 2564 หรือคิดเป็นร้อยละ 25 ของการใช้พลังงานรวมทั้งหมด [1]

จากความต้องการดังกล่าวได้มีความพยายามที่หาแหล่งพลังงานทดแทนจากแหล่งต่าง ๆ เช่น แสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานน้ำ เป็นต้น และได้มีการศึกษาพบว่า การผลิตก๊าซชีวภาพจากชีวมวลหรือของเสียต่าง ๆ เป็นแหล่งพลังงานที่มีศักยภาพเหมาะที่จะนำมาช่วยในการแก้ปัญหาข้างต้นได้ [2] การนำมาใช้เป็นการช่วยลดมลพิษผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการใช้เชื้อเพลิงถ่านหิน โดยช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gases, GHGs) จากการใช้ถ่านหินในการผลิตกระแสไฟฟ้า [3] – [4] ซึ่งก๊าซชีวภาพเป็นพลังงานที่ผลิตได้จากกระบวนการหมักย่อยแบบไร้อากาศ โดยใช้สารอินทรีย์จากแหล่งต่าง ๆ เป็นวัสดุตั้งต้น เช่น เศษพืชจากการเกษตร เศษอาหาร หรือของเสียจากกระบวนการต่าง ๆ เป็นการนำกระบวนการย่อยสลายของสารอินทรีย์มาใช้ และมีการเก็บเกี่ยวมีเทนจากกระบวนการย่อย เป็นการช่วยลดปริมาณก๊าซมีเทนที่ปลดปล่อยออกสู่บรรยากาศ ซึ่งปกติก๊าซมีเทนจะส่งผลกระทบให้เกิดภาวะโลกร้อนได้มากกว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกือบ 21 เท่า [5] และพบว่ากากที่เหลือจากการหมักย่อยสามารถนำไปใช้ประโยชน์เป็นปุ๋ยชีวภาพ (Bio Fertilizer) และสารปรับปรุงดิน (Soil Amendments) ได้อีกด้วย [6] – [7] โดยก๊าซชีวภาพที่ดีมีความเหมาะสมและคุ้มค่าต่อการนำมาใช้ประโยชน์ทางเศรษฐศาสตร์

ควรมีร้อยละของก๊าซมีเทนมากกว่าร้อยละ 50 [8] ดังนั้นเพื่อให้ได้ก๊าซชีวภาพที่มีคุณภาพจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องศึกษาและทำความเข้าใจกระบวนการหมักย่อยแบบไร้อากาศ และความสัมพันธ์ของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ งานวิจัยนี้จึงสนใจทบทวนปัจจัยต่าง ๆ ที่มีความสำคัญส่งผลต่อประสิทธิภาพการย่อยแบบไร้อากาศ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการควบคุมระบบหมักย่อยให้มีความเหมาะสมต่อไป

กระบวนการหมักย่อยแบบไร้อากาศ (Anaerobic Digestion Process)

กระบวนการหมักย่อยแบบไร้อากาศ (Anaerobic Digestion Process) เป็นกระบวนการที่ย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศและมีการผลิตก๊าซชีวภาพขึ้น ซึ่งโดยทั่วไปก๊าซชีวภาพ (Biogas) จะประกอบด้วยก๊าซมีเทน (CH_4) ประมาณร้อยละ 55 - 70 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ร้อยละ 30 - 45 ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) และแอมโมเนีย (NH_3) อีกเล็กน้อยประมาณร้อยละ 1 - 2 และความชื้นอีกประมาณร้อยละ 1 - 5 [9] ก๊าซมีเทนเป็นก๊าซที่ต้องการจากกระบวนการหมักย่อยแบบไร้อากาศเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทน โดยกระบวนการหมักย่อยแบบไร้อากาศเพื่อได้มาซึ่งก๊าซมีเทนจะประกอบด้วย 4 ขั้นตอน [10] ดังนี้ (รูปที่ 1)



รูปที่ 1 กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ (Biogas Production Process) [11] - [12]

1. ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

เป็นขั้นตอนแรกของการหมักย่อยแบบไร้อากาศ ซึ่งจะเป็นการย่อยสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่ซับซ้อน เช่น ไขมัน คาร์โบไฮเดรต โปรตีน เป็นต้น ให้อยู่ในรูปสารที่มีโครงสร้างขนาดเล็ก เช่น น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว กรดอะมิโน และกรดไขมัน ซึ่งกลายเป็นสารที่จุลินทรีย์สามารถดูดซึม (Absorption) และใช้เป็นแหล่งพลังงานได้ โดยจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับขั้นตอนนี้ส่วนใหญ่เป็นกลุ่ม Cellulomonas, Eubacteria, Clostridium, และ Ruminococcus [13]

2. **แอซิโดจิเนซิส (Acidogenesis)**

เป็นการย่อยสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างขนาดเล็กข้างต้นให้กลายเป็นแอลกอฮอล์ (Alcohols) และกรดไขมันระเหย (Volatile Fatty Acids, VFA) เช่น กรดอะซิติค โพรไพโอนิคและบิวทิริค โดยมีแบคทีเรียในกลุ่ม Acid Forming Bacteria ประกอบด้วย Pseudomomas, Bacillus, Clostridium, และ Streptococcus [14]

3. **อะซิโตรจิเนซิส (Acetogenesis)**

เป็นการเปลี่ยนกรดไขมันระเหย และแอลกอฮอล์ ให้อยู่ในรูปของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน และกรดอะซิติค โดยแบคทีเรียที่เกี่ยวข้องคือกลุ่ม Syntrophobacteria และ Syntrophomnas [15] ขั้นตอนนี้มีความสำคัญ เนื่องจากมีการผลิตอะซิติคสูงถึงร้อยละ 25 และก๊าซไฮโดรเจนร้อยละ 11 ซึ่งทั้ง 2 ตัวเป็นตัวกลางหลักในการเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทน ในขณะที่สารตัวกลางบางตัว เช่น น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว ก็สามารถย่อยสลายกลายเป็นกรดอะซิติค ก๊าซไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ได้โดยตรงเช่นกัน

4. **เมทาโนจิเนซิส (Methanogenesis)**

เป็นขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทน โดยทั่วไปมี 3 วิธีหลัก ๆ คือ [16]

4.1 การเปลี่ยนเมทิลของโมเลกุลอะซิเตดให้กลายเป็นก๊าซมีเทนเรียกขั้นตอนนี้ว่า Acetoclastic Methanogenesis โดยเมทาโนเจนที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการนี้เรียกว่า Acetoclastic Methanogens

4.2 การรีดักชั่นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซค์ด้วยก๊าซไฮโดรเจน เรียกขั้นตอนนี้ว่า Hydrogenotrophic Methanogenesis โดยเมทาโนเจนที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการนี้เรียกว่า Hydrogenotropic Methanogens

4.3 เป็นการเปลี่ยนกลุ่มเมทิล (Methyl Group) ของสารต่าง ๆ ให้กลายเป็นก๊าซมีเทน เรียกขั้นตอนนี้ว่า Methylotropic Methanogenesis โดยเมทาโนเจนที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการนี้เรียกว่า Methylotropic Methanogens

การเกิดมีเทนโดยส่วนใหญ่จะมาจาก 2 ขั้นตอนเป็นหลัก คือ Acetoclastic Methanogenesis และ Hydrogenotrophic Methanogenesis ซึ่งโดยทั่วไปพบว่า เกือบร้อยละ 70 ของก๊าซมีเทนที่ผลิตได้มาจากโมเลกุลอะซิเตดของขั้นตอน Acetoclastic Methanogenesis [17]

ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการหมักย่อยโดยไร้อากาศ (Factors Affecting Efficiency of Anaerobic Digestion)

1. **อุณหภูมิ (Temperature)**

เป็นปัจจัยที่สำคัญต่อประสิทธิภาพการหมักย่อยแบบไร้อากาศ ซึ่งส่งผลถึงคุณภาพและปริมาณก๊าซที่ผลิตได้อีกด้วย เช่น การศึกษาของ Rameshprabu, R. and Yuwalee, U. [18] พบว่าการหมักย่อยแบบไร้อากาศของจอกแหน (Duckweed) ในขวดทดลองขนาด 2 ลิตร ด้วยระยะเวลากักเก็บ 45 วันที่อุณหภูมิช่วงมีโซฟีลิค (35 ^{o}C) สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้เท่ากับ 10,377 มิลลิลิตรต่อลิตร และในช่วงเทอร์โมฟีลิค (50 ^{o}C) ผลิตได้ลดลงเล็กน้อยเหลือเท่ากับ 9,981 มิลลิลิตรต่อลิตร ขณะที่อุณหภูมิห้อง (23 - 28 ^{o}C) ลดลงเหลือเพียง 7,864 มิลลิลิตรต่อลิตร ซึ่งโดยทั่วไปเราแบ่งช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการหมักไว้ 3 ช่วงด้วยกัน ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สภาวะในการหมักย่อยแบบไร้อากาศในแต่ละช่วงอุณหภูมิ

สภาวะในการหมัก	ช่วงอุณหภูมิในการเดินระบบ (°C)	ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสม (°C)
Psychrophilic	< 15	-
Mesophilic	15 - 45	35
Thermophilic	45 - 65	55

หมายเหตุ อุณหภูมิต่ำกว่า 10 °C ส่งผลกระทบให้เกิดการหยุดผลิตก๊าซชีวภาพ [19]

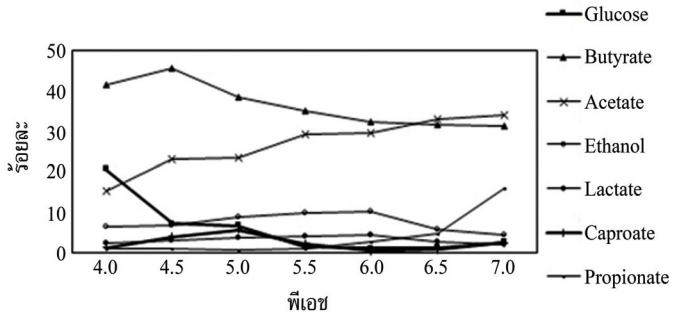
สภาวะ Mesophilic และ Thermophilic เป็นสภาวะที่นิยมใช้ในการหมักย่อยแบบไร้อากาศ ซึ่งสภาวะที่ Thermophilic เหมาะสำหรับขั้นตอนในช่วงแรกของการย่อยในขั้นตอน Hydrolysis และ Acidogensis ในขณะที่ช่วงหลังของขั้นตอน Acetogenesis และการผลิตมีเทน Methanogenesis ควรใช้สภาวะ Mesophilic เพื่อไม่ให้มีสภาวะเป็นกรด (Acidification) เกิดมากและเร็วเกินไป ทำให้กรดไขมันระเหยไม่สามารถเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทนได้ทัน [20] ส่งผลกระทบต่อการผลิตก๊าซมีเทนลดลงของเมทาโนเจน (Methanogen) ซึ่งเมทาโนเจนค่อนข้างไว (Sensitivity) ต่อพีเอชที่ลดลงจากการสะสมของกรดไขมันระเหย อีกทั้งการหมักด้วยสภาวะ Thermophilic ยังเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานในการให้ความร้อนกับระบบหมักย่อย ด้วยเหตุนี้จึงควรคำนึงถึงความเหมาะสมคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในการเลือกใช้อุณหภูมิในแต่ละช่วงของการหมักย่อย โดยการให้ความร้อนกับระบบหมักย่อยอาจนำไปใช้สำหรับการย่อยสารที่ย่อยสลายยาก ๆ เช่น ลิกนิน ไขมัน และโปรตีน [21] หรือในพื้นที่ที่มีอุณหภูมิค่อนข้างต่ำอากาศหนาว [22] เป็นต้น

2. **ค่าพีเอช (pH Value)**

เป็นพารามิเตอร์ในการวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง ของระบบการหมักแบบไร้อากาศ ซึ่งในแต่ละขั้นตอนของการหมักต้องการช่วงพีเอชที่เหมาะสมไม่เหมือนกัน โดยขั้นตอน Acidogenesis มีช่วงพีเอชที่เหมาะสมเท่ากับ 5.5 - 6.5 [23] อีกทั้งยังพบว่าค่าพีเอชของระบบหมักย่อยมีผลต่อชนิดกรดไขมันระเหยที่เกิดขึ้นจากขั้นตอน Acidogenesis ซึ่งจากการศึกษาของ Herbert, H. P. F. and Hong, L. [24] พบว่าที่พีเอชต่ำกว่า 5.5 พบกรดบิวทิริค (Butyric Acid) เป็นกรดหลักที่พบ แต่ที่พีเอชมากกว่า 5.5 จะพบกรดอะซิติค (Acetic Acid) เป็นหลัก ในขณะที่กรดโพรไพโอนิค (Propionic Acid) พบได้มากที่พีเอชค่อนข้างเป็นกลางจากการหมักย่อยน้ำตาลกลูโคส ดังรูปที่ 2 ด้วยเหตุนี้ขั้นตอน Acidogenesis เกิดได้ดีที่พีเอช 5.5 - 6.5 จึงควรพบกรดอะซิติค เป็นหลักและรองลงมาเป็นกรดบิวทิริค

สำหรับขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทน (Methanogenesis) มีช่วงพีเอชที่เหมาะสมเท่ากับ 6.8 - 7.2 [25] - [26] ซึ่งโมทาโนเจนที่ทำหน้าที่สร้างก๊าซมีเทนค่อนข้างไว (Sensitivity) ต่อค่าพีเอชที่เปลี่ยนแปลงเป็นอย่างมาก พบว่าเมื่อค่าพีเอชน้อยกว่า 6.6 อัตราการเจริญเติบโตของเมทาโนเจนจะลดลง [27] และมีการแนะนำว่าในระบบหมักย่อยแบบไร้อากาศควรมีความเข้มข้นของกรดอะซิติคไม่ควรเกิน 3,000 - 5,000 มิลลิกรัม/ลิตร [28] และกรดโพรไพโอนิคไม่เกิน 900 มิลลิกรัม/ลิตร [29] จึงจะไม่ส่งผลกระทบต่อการผลิตก๊าซชีวภาพและการเจริญเติบโตของเมทาโนเจน จากปัญหาดังกล่าวจึงมีหลาย ๆ งานวิจัยแก้ไขปัญหาดังกล่าว โดยปรับไปใช้การหมักย่อยไร้อากาศแบบสองขั้นตอนแทน (Two - Stage Anaerobic Digestion) ซึ่งมีการแยกถังปฏิกิริยาระหว่างการหมักกรดและถังหมักก๊าซชีวภาพ เพื่อไม่ให้พีเอชที่ลดลงจากการผลิตกรดไขมันระเหยส่งผลกระทบต่อเมทาโนเจนที่ทำหน้าที่ผลิตก๊าซมีเทน เช่น

การศึกษาของ Liu, X., Li, R., and Ji, M. [30] พบว่าการหมักร่วมระหว่างตะกอนจากระบบเอเอสและเศษอาหาร โดยใช้ระบบหมักแบบสองขั้นตอน ช่วยให้ระบบมีเสถียรภาพดีขึ้นเมื่อเดินระบบด้วยอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์สูง ๆ เมื่อเทียบกับระบบหมักหนึ่งขั้นตอนซึ่งมีปัญหาเรื่องของการสะสมของกรดไขมันในระบบเกิดขึ้น



รูปที่ 2 ผลของค่าพีเอชต่อประเภทของผลิตภัณฑ์ที่พบในน้ำหมักจากการย่อยกลูโคส [24], [31]

3. **อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio)**

เป็นอัตราส่วนที่สะท้อนให้เห็นระดับของสารอาหารในระบบหมักย่อยแบบไร้อากาศ ซึ่งช่วงของอัตราส่วน C/N ที่เหมาะสมแนะนำไว้ที่ระหว่าง 20 - 30 [32] โดยทั่วไปการหมักย่อยจึงใช้ที่เท่ากับ 25 ในการเดินระบบ ซึ่งอัตราส่วน C/N จะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่นำมาหมัก (ตารางที่ 2) สำหรับการหมักย่อยของวัสดุที่มีอัตราส่วน C/N สูงกว่าค่าที่เหมาะสม ส่งผลให้ปริมาณไนโตรเจนซึ่งจำเป็นสำหรับการสร้างเซลล์ของแบคทีเรียจะลดลงอย่างรวดเร็ว เหลือแต่คาร์บอนในระบบ ส่งผลให้แบคทีเรียและเมทาโนเจนไม่สามารถเจริญเติบโตและหยุดการผลิตก๊าซชีวภาพ ในขณะที่วัสดุนำมาหมักมีอัตราส่วน C/N ต่ำ โดยมีปริมาณไนโตรเจนที่สูง เมื่อเกิดการย่อยส่งผลให้มีการผลิตก๊าซแอมโมเนียเป็นจำนวนมากในระบบหมักย่อย ทำให้ระบบมีความเป็นด่างรุนแรง และอาจส่งผลให้การผลิตก๊าซชีวภาพลดลง และเกิดความเป็นพิษต่อเมทาโนเจนจนเกิดการตายได้ [33] - [34]

ตารางที่ 2 อัตราส่วน C/N และประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของวัสดุหมักแต่ละชนิด

วัสดุหมัก	อัตราส่วน C/N	ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ (l/kg TVS)	วัสดุหมัก	อัตราส่วน C/N	ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ (l/kg TVS)
1. ฟางข้าว	90	280	6. ใบสะเดา	26	650
2. มูลแกะ	24	700	7. เศษหญ้า	25	350
3. มูลวัว	13	500	8. มูลหมู	15	28
4. มูลม้า	22	550	9. ต้นอ้อย	53	200
5. มูลไก่	15	350	10. ชานอ้อย	82	150

ดังนั้นเพื่อเป็นการปรับให้อัตราส่วน C/N ให้เหมาะสมกับกระบวนการหมักย่อยแบบไร้อากาศ จึงมีการนำวัสดุหมักต่างชนิดมาทำการหมักร่วมกัน และหาอัตราส่วนการหมักร่วมที่เหมาะสม เช่น การศึกษาของ Siddiqui, Z., Horan, N. J., and Anaman, K. [35] ทำการหมักร่วมระหว่างของเสียจากอุตสาหกรรมอาหาร (อัตราส่วน C/N เท่ากับ 30) กับกากตะกอนจากระบบเอเอส (อัตราส่วน C/N เท่ากับ 5.4) โดยพบว่าสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้ดีที่สุดเท่ากับ 239 ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหยที่ถูกกำจัด เมื่อใช้อัตราส่วนของเสียจากอุตสาหกรรมอาหารต่อตะกอนเท่ากับ 11/89 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีอัตราส่วน C/N เท่ากับ 15

4. **อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate, OLR)**

เป็นการวัดปริมาณสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ถังปฏิกิริยาต่อปริมาตรของถังและระยะเวลา เป็นปัจจัยที่จำเป็นต้องควบคุมให้เหมาะสมเนื่องจาก OLR ที่ป้อนมากเกินไป (Overloading) ส่งผลให้ปริมาณสารอินทรีย์ถูกย่อยกลายเป็นกรดไขมันระเหยปริมาณมากและไม่สามารถกลายเป็นก๊าซมีเทนได้ทัน ทำให้เกิดสภาวะเป็นกรด (Acidification) [36] ในขณะที่ OLR ต่ำเกินไปก็จะส่งผลตรงกันข้ามคือเกิดสภาวะความเป็นด่างเช่นกัน ซึ่งเป็นสภาวะที่ไม่เหมาะสมสำหรับแบคทีเรีย [37] อีกทั้งยังพบว่า OLR ยังมีผลต่อชนิดของแบคทีเรียและอาร์เคีย ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่าง OLR กับชนิดของแบคทีเรียไร้อากาศและอาร์เคีย

อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์	ชนิดแบคทีเรียไร้อากาศ (**Anaerobic Bacteria**) [38] - [39]	ชนิดอาร์เคีย (**Archeae**) [40]
สูง	- *Chloroflexi* - *Gammaproteobacteria* - *Actinobacteria* - *Bacteroidetes* - *Deferribacteres* - *Methanobacterium* - *Methanocelleus*	- *Methanosarcina*
ต่ำ	- *Firmicutes* - *Syntrophomonas* - *Synergistacea* - *Anaerovibrio*	- *Methanosaeta*

5. **ระยะเวลาในการกักเก็บ (Retention Time)**

เป็นระยะเวลาที่ใช้ในการย่อยสารอินทรีย์จนเสร็จสมบูรณ์กลายเป็นก๊าซมีเทนเกิดขึ้น โดยส่วนใหญ่จะต้องย่อยสารอินทรีย์ได้มากกว่าร้อยละ 70 ขึ้นไป ซึ่งคำนวณจากสมการที่ (1) [41]

$$\text{ระยะเวลากักเก็บ (Retention Time, RT)} = \frac{\text{(V) ปริมาณถังปฏิกิริยา}}{\text{(Q) อัตราการไหล}} \quad (1)$$

ระยะเวลาในการกักเก็บที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่น ๆ ด้วย เช่น อุณหภูมิที่ใช้ในการหมักย่อย อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าระบบ และลักษณะองค์ประกอบของสารอินทรีย์ โดยสรุปความสัมพันธ์ได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่าง ๆ ที่มีต่อระยะเวลาในการกักเก็บ [42]

ปัจจัย	ความสัมพันธ์ต่อระยะเวลาในการกักเก็บ	
	ระยะเวลาในการกักเก็บนาน	ระยะเวลาในการกักเก็บน้อย
อุณหภูมิในการหมักย่อย	อุณหภูมิในการหมักย่อยปานกลาง โดยใช้สภาวะ Mesophilic ส่งผลให้ต้องใช้ระยะเวลาในการกักเก็บนานขึ้น	อุณหภูมิในการหมักย่อยสูง โดยใช้สภาวะ Thermophilic ส่งผลให้ใช้ระยะเวลาในการกักเก็บสั้นลง ระบบก็สามารถย่อยได้สมบูรณ์
อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (OLR)	OLR ที่ป้อนเข้าระบบสูง จำเป็นต้องใช้ระยะเวลาในการกักเก็บนานขึ้น เพื่อให้การย่อยเกิดสมบูรณ์ ขนาดของถังอาจต้องมีขนาดใหญ่ขึ้นด้วย	OLR ที่ป้อนเข้าระบบต่ำ ส่งผลให้ใช้ระยะเวลาในการกักเก็บสั้นลงการย่อยก็สามารถเกิดสมบูรณ์ ไม่มีสารอินทรีย์ค้างในระบบ
ลักษณะองค์ประกอบของสารอินทรีย์	สารอินทรีย์มีองค์ประกอบซับซ้อนย่อยยาก เช่น ลิกนิน เซลลูโลส เป็นต้น ทำให้ใช้ระยะเวลาในการกักเก็บนาน	สารอินทรีย์มีองค์ประกอบไม่ซับซ้อน เช่น น้ำตาล แป้ง เป็นต้น สามารถย่อยได้โดยง่ายและใช้ระยะเวลาในการกักเก็บสั้นลง

โดยทั่วไประยะเวลาในการกักเก็บสำหรับการหมักที่สภาวะมีโซฟิลิคจะเสร็จสมบูรณ์ภายในระยะเวลา 15 - 30 วัน [43] ถ้าระยะเวลาในการกักเก็บต่ำกว่าค่าที่เหมาะสม จะส่งผลให้การหมักย่อยเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์มีการสะสมของกรดไขมันระเหยปริมาณมากที่ไม่สามารถเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทนได้ทัน ทำให้พีเอชของระบบลดลงต่ำ และในที่สุดแล้วอาจส่งผลให้ระบบล้มเหลว การผลิตก๊าซชีวภาพลดลงจนถึงขั้นการหยุดผลิตได้ [44] ในขณะที่ระยะเวลาในการกักเก็บสูงเกินไป จะทำให้ขนาดของถังปฏิกิริยามีขนาดใหญ่เกินความจำเป็น และเป็นการสิ้นเปลืองค่าลงทุนในการก่อสร้างถังที่สูงเกินไป ด้วยเหตุนี้จึงควรควบคุมระยะเวลาในการกักเก็บให้เหมาะสมมากที่สุด เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด

6. ธาตุอาหาร (**Nutrients**)

เป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบหมักย่อยแบบไร้อากาศ ซึ่งมีการแบ่งประเภทของสารอาหารตามปริมาณที่จุลินทรีย์ต้องการออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

6.1 ธาตุอาหารหลัก (Macro - Nutrients) ได้แก่ ไนโตรเจน คาร์บอน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม ซัลเฟอร์และแมกนีเซียม เป็นธาตุอาหารที่ต้องการปริมาณมากมีความสำคัญ เป็นส่วนประกอบหลักของเซลล์และมีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ โดยอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัส (C:N:P) ที่แนะนำสำหรับการหมักแบบไร้อากาศเท่ากับ 200:5:1 [26]

6.2 ธาตุอาหารรอง (Micro - Nutrients) เป็นธาตุอาหารที่ต้องการปริมาณน้อยแต่มีความสำคัญเช่นกัน ซึ่งถ้าขาดอาจส่งผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ เนื่องจากช่วยในการทำงานของเอนไซม์และปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ ภายในเซลล์จุลินทรีย์ ความสำคัญของธาตุอาหารแต่ละชนิดและปริมาณธาตุอาหารที่เหมาะสมต่อระบบหมักย่อยแบบไร้อากาศดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ความสำคัญของธาตุอาหาร และปริมาณธาตุอาหารที่เหมาะสมต่อระบบหมักย่อยแบบไร้อากาศ [9], [45]

สารเคมี	ความสำคัญ	ความเข้มข้นที่เหมาะสม
ธาตุอาหารหลัก		
- คาร์บอน	โครงสร้างเซลล์และแหล่งพลังงาน	-
- ไนโตรเจน	การสังเคราะห์โปรตีน	น้อยกว่า 400 mg/l
- โพแทสเซียม	เพิ่มความสามารถในการผ่านเข้าออกบริเวณผนังเซลล์ของสารเคมี (Permeability)	465 mg/l
- ฟอสฟอรัส	การสังเคราะห์ดีเอ็นเอ	3.05 - 6.18 g/kg TS
- ซัลเฟอร์	ส่วนประกอบเอนไซม์หลายชนิด	3.05 - 6.18 g/kg TS
- แมกนีเซียม	ส่วนประกอบเอนไซม์หลายชนิด	0.02 mg/l
ธาตุอาหารรอง		
- เหล็ก	ส่วนประกอบของเอนไซม์ CODH	1,000 - 5,000 ppm
- นิเกิล	ส่วนประกอบของเอนไซม์ CODH, การสังเคราะห์ F430 และสำคัญต่อ Sulfate Reducing Bacteria	0.029 - 27 mg/l
- เซลีเนียม	เมตาบอลิซึมของกรดไขมัน, ส่วนประกอบของเอนไซม์ FDH	0 - 10 mg/kg TVS
- ทังสเตน	ส่วนประกอบของเอนไซม์ FDH	0.658 - 100 mg/l
- สังกะสี	ส่วนประกอบของเอนไซม์ FDH และ CODH	0.0327 - 2 mg/l
- โครเมียม	ส่วนประกอบของเอนไซม์ Hydrogenase	4 - 5 mg/l
- โมลิบดีนัม	ส่วนประกอบของเอนไซม์ FDH, ยับยั้งการทำงานของ Sulfate Reducing Bacteria	0.029 - 5 mg/l

หมายเหตุ: CODH; เอนไซม์ Carbon Monoxide Dehydrogenase, FDH; เอนไซม์ Formate Dehydrogenase, F430; โคเอนไซม์จากเมทาโนเจน, TVS; Total Volatile Solids

7. **ความชื้น (Moisture) ปริมาณของแข็งรวม (Total Solids)**

ระบบการหมักย่อยแบบไร้อากาศที่ใช้เป็นแบบเปียกหรือแบบแห้งนั้น ขึ้นอยู่กับระดับความชื้นของวัสดุหมัก ซึ่งการหมักย่อยแบบเปียกนิยมนำมาใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพมากกว่าแบบแห้ง โดยในการหมักย่อยนั้นจะมีปริมาณของแข็งรวมน้อยกว่าร้อยละ 15 วัสดุหมักจึงมีลักษณะค่อนข้างเหลว โดยมีน้ำเป็นองค์ประกอบมากกว่าร้อยละ 85 ในขณะที่การหมักย่อยแบบแห้งจะมีร้อยละความชื้นน้อยกว่าร้อยละ 85 ซึ่งความชื้นมีความสำคัญในระบบหมักย่อยเป็นอย่างมาก เนื่องจากช่วยในการละลายสารอาหารให้กับจุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ได้ นอกจากนี้ยังช่วยในการเคลื่อนที่ของจุลินทรีย์ภายในวัสดุหมักเพื่อไปสัมผัสกับสารอินทรีย์และทำการย่อย พบว่าถ้าความชื้นในระบบหมักย่อยไม่เหมาะสมหรือมีค่าต่ำโดยมีร้อยละของแข็งมากเกินไปจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการย่อยสารอินทรีย์และการผลิตก๊าซชีวภาพลดลง

8. **การกวนผสม (Steering/Mixing)**

การกวนผสมภายในถังปฏิกิริยาหมักย่อยเป็นการกระตุ้นให้การย่อยดีขึ้น เนื่องจากจุลินทรีย์มีโอกาสในการสัมผัสวัสดุหมัก อีกทั้งยังเป็นการทำให้วัสดุหมักมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น ซึ่งพบว่าในการทดลองที่ไม่มีการกวนผสมอาจจะส่งผลเสียให้เกิดฝาแข็ง (Scum) ลอยที่ผิวหน้าปิดกั้นการปล่อยก๊าซมีเทนออกจากถังปฏิกิริยา โดยมีการศึกษาของ Kozłowski, K., Mazurkiewicz, J., Chełkowski, D., Jeżowska, A., Cieślik, M., Brzoski, M., Smurzyńska1, A., Dongmin, Y., and Wei, Q. [46] พบว่าการกวนผสมทุกวันช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นร้อยละ 17 ผลิตได้เท่ากับ 265 ลิตรต่อกิโลกรัมของของแข็งระเหย เมื่อเทียบกับการทดลองที่ไม่มีการกวนผสมในถังปฏิกิริยาผลิตได้ 225 ลิตรต่อกิโลกรัมของของแข็งระเหย แต่อย่างไรก็ตามการกวนผสมที่มากเกินไปก็อาจส่งผลเสียต่อเสถียรภาพและประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของระบบหมักย่อย เนื่องจากระบบเกิดการย่อยอย่างรวดเร็วส่งผลให้มีการสะสมกรดไขมันระเหยในระบบจำนวนมากเกินไป ทำให้พีเอชของระบบลดลงต่ำมากจนในที่สุดระบบหมักย่อยล้มเหลว อีกทั้งการนำการกวนผสมไปใช้ในระบบหมักย่อยแบบไร้อากาศ จะต้องมีการวิเคราะห์ความเหมาะสมระหว่างประสิทธิภาพที่มากขึ้นกับความคุ้มค่าของพลังงานที่ใช้ในการกวนผสมซึ่งทำให้ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ (Operating Cost) เพิ่มขึ้นว่ามีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์หรือไม่

9. **อัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพความเป็นด่าง (Volatile Fatty Acids to Alkalinity Ratio)**

อัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพความเป็นด่างใช้แสดงเสถียรภาพของระบบหมักย่อยแบบไร้อากาศ โดยอัตราส่วนดังกล่าวเป็นผลมาจาก 2 พารามิเตอร์ คือ ความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยและสภาพความเป็นด่าง ซึ่งทั้งสองพารามิเตอร์สามารถทำการวิเคราะห์ได้ง่ายและสะดวกเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้วัดเสถียรภาพของระบบหมักย่อยแบบไร้อากาศอย่างต่อเนื่อง ในการเดินระบบหมักย่อยแบบไร้อากาศจำเป็นอย่างยิ่งต้องควบคุมอัตราส่วนให้เหมาะสม โดยจากการศึกษาของ Lili, M., Biro, G., Sulyok, E., Petis, M., Borbely, J., and Tamas, J. [47] พบว่าอัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพความเป็นด่างระหว่าง 0.3 - 0.4 มีความเหมาะสมสำหรับระบบหมักย่อยแบบไร้อากาศสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงสุด โดยระบบมีเสถียรภาพไม่เสี่ยงต่อสภาพความเป็นกรดจากกรดไขมันระเหยที่สะสมในระบบ ในขณะที่อัตราส่วนที่น้อยกว่า 0.3 เป็นผลมาจากปริมาณสารอินทรีย์ที่เข้าระบบต่ำเกินไป และอัตราส่วนที่มากกว่า 0.4 อาจมาจากปริมาณสารอินทรีย์ที่เข้าระบบมากเกินไป หรือระบบมีสภาพความเป็นด่างต่ำ

สรุปผล

ปัจจุบันมีงานวิจัยจำนวนมากที่ทำการศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการหมักแบบไร้อากาศ ซึ่งประสิทธิภาพของระบบหมักย่อยจะถูกประเมินจากความสามารถในการผลิตก๊าซชีวภาพ (Biogas Production Potential) ของจุลินทรีย์ และสภาวะการทำงานของระบบหมักย่อยว่ามีเสถียรภาพ (Stability) มากน้อยเพียงใด โดยปัจจัยสำคัญต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพและเสถียรภาพของระบบหมักย่อยแบบไร้อากาศประกอบด้วย อุณหภูมิ ค่าพีเอช อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ ระยะเวลาในการกักเก็บธาตุอาหาร ความชื้น ปริมาณของแข็งรวม และการกวนผสม เป็นต้น ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งในการเดินระบบหมักย่อยแบบไร้อากาศที่จะต้องทำการควบคุมปัจจัยเหล่านี้ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการหมักย่อยสูงสุด

ซึ่งอาจนำเกณฑ์ที่มีการแนะนำหรือจากการศึกษาวิจัยของผู้อื่นที่มีลักษณะใกล้เคียงกับการทดลองที่ทำการศึกษาอยู่ไปใช้เป็นแนวทางในการควบคุมระบบหมักย่อยแบบไร้อากาศ ทำให้กรอบของการศึกษาวิจัยแคบลง ช่วยให้ประหยัดเวลาและงบประมาณในการทำวิจัย ด้วยเหตุนี้ผู้ทำการศึกษาเกี่ยวกับระบบหมักย่อยแบบไร้อากาศจึงควรศึกษาและทำความเข้าใจก่อนเบื้องต้นเกี่ยวกับปัจจัยสำคัญต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการเดินระบบหมักย่อยแบบไม่ใช้อากาศ เพื่อวางแผนการวิจัยได้อย่างถูกต้องและเหมาะสมต่อไป

References

[1] Rapephat, S. (2017). Review-Renewable Energy for National Security. **NDC Security**. Thailand National Defence College. Vol. 4, pp. 1-12

[2] Ministry of energy. (2017). **Annual report 2017**. Bangkok: Office of the Permanent Secretary.

[3] Buadit, T., Aroonsrimorakot, S., Bhaktikul, K., and Thavipoke, P. (2013). Biogas Production and Greenhouse Gases Reduction from Wastewater at Mahidol University, Salaya Campus, Thailand. **APCBEE Procedia**. Vol. 5, pp.169-174. DOI: 10.1016/j.apcbee.2013.05.030

[4] Saeed, E., Ramin, K., and Masih, S. (2011). Greenhouse Gas Emissions Reduction through a Biogas Plant: A Case Study of Waste Management Systems at FEKA Dairy Farm. In **2nd International Conference on Environmental Science and Technology IPCBEE**. IACSIT Press, Singapore. Vol. 6, pp. 445-448

[5] Mohajan, H. K. (2012). Dangerous Effects of Methane Gas in Atmosphere. **International Journal of Economic and Political Integration**. Vol. 1, No. 2, pp. 3-10

[6] Dragicevic, I., Sogn, T. A., and Eich-Greatorex, S. (2018). Recycling of Biogas Digestates in Crop Production Soil and Plant Trace Metal Content and Variability. **Frontiers in Sustainable Food Systems**. Vol. 2, pp. 1-14. DOI: 10.3389/fsufs.2018.00045

[7] Sogn, T. A., Dragicevic, I., Linjordet, R., Krogstad, T., Eijsink, V. G. H., and Eich-Greatorex, S. (2018). Recycling of Biogas Digestates in Plant Production: NPK Fertilizer Value and Risk of Leaching. **International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture**.Vol. 7, No. 1, pp. 49-58. DOI: 10.1007/S40093-017-0188-0

[8] Ahmmad, R. M. and Haque, S. (2014). Providing Electricity by Digester Types on Biogas Productions from Municipal Solid Waste in Dhaka City, Bangladesh. **International Journal of Energy, Information and Communications**. Vol. 5, Issue 3, pp. 13-22. DOI: 10.14257/ijeic. 2014.5.3.02

[9] Jorgensen, P. J. (2009). **Biogas-Green Energy**. 2nd Faculty of Agricultural Sciences, Aarhus University: Digisource Danmark A/S

[10] Bharathiraja, B., Sudharsana, T., Jayamuthunagai, J., Praveenkumar, R., Chozhavendhan, S., and Iyyappan, J. (2018). Biogas Production-A Review on Composition, Fuel Properties, Feed Stock and Principles of Anaerobic Digestion. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Vol. 90, No. C, pp. 570-582. DOI: 10.1016/j.rser.2018.03.093

[11] Merlin, C. P., Gopinath, L. R., and Divya, D. (2014). A Review on Anaerobic Decomposition and Enhancement of Biogas Production through Enzymes and Microorganisms. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Vol. 34, pp. 167-173. DOI: 10.1016/j.rser.2014.03.010

[12] Wenche, H. B., Carlos, D., and Rune, B. (2015). Temperature Effects in Anaerobic Digestion Modeling. In **Proceedings of the 56th Conference on Simulation and Modelling (SIMS 56)**. October, 7-9, 2015, Linköping University, Sweden. pp. 261-269. DOI: 10.3384/ecp15119261

[13] Sithara, M. S. and Kiran, J. (2018). Review on Factors Affecting Biogas Production. **International Journal for Technological Research in Engineering**. Vol. 5, Issue 9, pp. 3693-3697

[14] Aderonke, K. A., Wasiu, A. A., and Moses, O. O. (2017). Microbial Dynamics and Biogas Production During Single and Co-Digestion of Cow Dung and Rice Husk. **Applied Environmental Research**. Vol. 39, No. 2, pp. 67-76. DOI: 10.35762/AER.2017.39.2.6

[15] Ali, S. F., Mahmood, Q., Maroof, S. M., Pervez, A., and Asad, A.S. (2014). Microbial Ecology of Anaerobic Digesters: The Key Players of Anaerobiosis. **Scientific World Journal**. Vol. 2014, pp. 1-21. DOI: 10.1155/2014/183752

[16] Neeti, L., Preeti, L., Amir, A. S., Rakshanda, B., Rouf, R. D., and Pooja, D. (2017). Methanogenesis: Are Ruminants only Responsible: A Review. **Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry**. Vol. 6, No. 6, pp. 2347-2352

[17] Sikora, A., Detman, A., Chojnacka, A., and Blaszczyk, M. K. (2017). Anaerobic Digestion: I. A Common Process Ensuring Energy Flow and the Circulation of Matter in Ecosystems. II. A Tool for the Production of Gaseous Biofuels. **Fermentation Processes**. DOI: 10.5772/64645

[18] Rameshprabu, R. and Yuwalee, U. (2016). Effect of Temperature on the Performance of Biogas Production from Duckweed. **Chemistry Research Journal**. Vol. 1, No. 1, pp. 58-66

[19] Lokendra, S., Alam, S. I., and Ramana, K. V. (1999). Effect of Fluctuating Temperature Regime on Psychrophilic Anaerobic Digestion of Night Soil. **Defence Science Journal**. Vol. 49, No. 2, pp. 135-140. DOI: 10.14429/dsj.49.3798

[20] Kim, M., Gomec, C. Y., Ahn, Y., and Speece, R. E. (2003). Hydrolysis and Acidogenesis of Particulate Organic Material in Mesophilic and Thermophilic Anaerobic Digestion. **Environ Technol**. Vol. 24, Issue 9, pp. 1183-1190. DOI: 10.1080/09593330309385659

[21] Salihu, A. and Alam, M. Z. (2016). Pretreatment Methods of Organic Wastes for Biogas Production. **Journal of Applied Sciences**. Vol. 16, Issue 3, pp. 124-137. DOI: 10.3923/jas.2016.124.137

[22] Zhang, T., Tan, Y., and Zhang, X. (2016). Using a Hybrid Heating System to Increase the Biogas Production of Household Digesters in Cold Areas of China: An Experimental Study. **Applied Thermal Engineering**. Vol. 103, pp. 1299-1311. DOI:10.1016/J.APPLTHERMALENG.2016.05.027

[23] Ozcan, K. (2018). **Bioenergy and Biofuels**. Taylor & Francis Group

[24] Herbert, H. P. F. and Hong, L. (2002). Effect of pH on Hydrogen Production from Glucose by Mixed Culture. **Bioresource Technology**. Vol. 82, Issue 1, pp. 87-93. DOI: 10.1016/s0960-8524 (01)00110-9

[25] Appels, L., Baeyens, J., Degrève, J., and Dewil, R. (2008). Principles and Potential of the Anaerobic Digestion of Waste-Activated Sludge. **Progress in Energy and Combustion Science**. Vol. 34, Issue 6, pp 755-781. DOI: 10.1016/j.pecs.2008.06.002

[26] Rajeshwari, K. V., Balakrishnan, M., Kansal, A., Kusum, L., and Kishore, V. V. N. (2000). State-of-the-art of Anaerobic Digestion Technology for Industrial Wastewater Treatment. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Vol. 4, No. 2, pp. 135-156. DOI: 10.1016/S1364-0321(99)00014-3

[27] Gary, N. F. (2004). **Biology of Wastewater Treatment**. Imperial College Press

[28] Holm-Nielsen, J. B., Lomborg, C. J., Oleskowicz-opiel, P., and Esbensen, K. H. (2008). On-line Near Infrared Monitoring of Glycerol-Boosted Anaerobic Digestion Processes: Evaluation of Process Analytical Technologies. **Biotechnology Bioengineering**. Vol. 99, Issue 2, pp. 302-313. DOI: 10.1002/bit.21571

[29] Wang, Y., Zhang, Y., Wang, J., and Meng, L. (2009). Effects of Volatile Fatty Acid Concentrations on Methane Yield and Methanogenic Bacteria. **Biomass and Bioenergy**. Vol. 33, No. 5, pp. 848-853. DOI: 10.1016/j.biombioe.2009.01.002

[30] Liu, X., Li, R., and Ji, M. (2019). Effects of Two-Stage Operation on Stability and Efficiency in Co-Digestion of Food Waste and Waste Activated Sludge. **Energies**. Vol. 12, Issue 14, pp. 1-21. DOI: 10.3390/en12142748

[31] Kebreab, E., Dijkstra, J., Bannink, A., and France, J. (2009). Recent Advances in Modeling Nutrient Utilization in Ruminants. **Journal of Animal Science**. Vol. 87, Issue Supple 1414, pp. 111-122. DOI: 10.2527/jas.2008-1313

[32] Dioha, I. J., Ikeme, C. H., Nafi'u, T., Soba, N. I., and Yusuf, M. B. S. (2013). Effect of Carbon to Nitrogen Ratio on Biogas Production. **International Research Journal of Natural Sciences**. Vol. 1, No. 3, pp. 1-10.

[33] Kigozi, R., Aboyade, A., and Muzenda, E. (2014). Biogas Production Using the Organic Fraction of Municipal Solid Waste as Feedstock. **International Journal of Advances in Mechanical & Automobile Engineering**. Vol. 1, No. 1, pp. 107-114

[34] Dieter, D. and Angelika, S. (2008). **Biogas from Waste and Renewable Resources**. Germany: John Wiley & Sons

[35] Siddiqui, Z., Horan, N. J., and Anaman, K. (2011). Optimisation of C:N Ratio for Co-Digested Processed Industrial Food Waste and Sewage Sludge Using the BMP Test. **International Journal of Chemical Reactor Engineering**. Vol. 9, Issue 1, pp. 1-12. DOI: 10.1515/1542-6580.2327

[36] Mel, M., Mohd, S. N., Avicenna, Ihsan, S. I., Ismail, A. F., and Yaacob, S. (2015). Effect of Organic Loading Rate (OLR) of Slurry on Biogas Production Quality. **Advanced Materials Research**. Vol. 1115, pp. 325-330. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1115.325

[37] Mahanta, P., Saha, U. K., Dewan, A., Kalita, P., and Buragohain, B. (2005). Biogas Digester: A Discussion on Factors Affecting Biogas Production and Field Investigation of a Novel Duplex Digester. **Journal of the Solar Energy Society of India**. Vol. 15, No. 2, pp. 1-12

[38] Rincón, B., Borja, R., González, J. M., Portillo, M. C., and Sáiz-Jiménez, C. (2008). Influence of Organic Loading Rate and Hydraulic Retention time on the Performance, Stability and Microbial Communities of One-Stage Anaerobic Digestion of Two-Phase Olive Mill Solid Residue. **Biochemical Engineering Journal**. Vol. 40, Issue 2, pp. 253-261. DOI: 10.1016/j.bej. 2007.12.019

[39 He, J., Wang, X., Yin, X. B., Li, Q., Li, X., Zhang, Y. F., and Deng, Y. (2018). Insights Into Biomethane Production and Microbial Community Succession During Semi-Continuous Anaerobic Digestion of Waste Cooking oil Under Different Organic Loading Rates. **AMB Express**. Vol. 8, No. 1, pp. 1-12. DOI: 10.1186/s13568-018-0623-2

[40] Franke-Whittle, I. H., Walter, A., Ebner, C., and Insam, H. (2014). Investigation Into the Effect of High Concentrations of Volatile Fatty Acids in Anaerobic Digestion on Methanogenic Communities. **Waste Management**. Vol. 34, Issue 11, pp. 2080-2089. DOI: 10.1016/j.wasman.2014.07.020

[41] Mogens, H., Mark, V. L., George, E., and Damir B. (2008). **Biological Wastewater Treatment: Principles, Modeling and Design**. IWA Publishing

[42] Masila, N., Salmi, N. A. S., Omar, S. J. E., Mohd, Z. S., and Ku, H. K. H. (2017). Factors Affecting Production of Biogas from Organic solid Waste via Anaerobic Digestion Process: A Review. **Journal of Solid State Science & Technology**. Vol. 25, No. 1, pp. 29-39

[43] Meegoda, J. N., Li, B., Patel, K., and Wang, L. B. (2018). A Review of the Processes, Parameters, and Optimization of Anaerobic Digestion. **International Journal of Environmental Research and Public Health**. Vol. 15, No. 10, pp. 1-16. DOI: 10.3390/ijerph15102224

[44] Chen, C., Guo, W., Ngo, H. H., Lee, D. J., Tung, K. L, Jin, P., Wangd, J., and Wud, Y. (2016). Challenges in Biogas Production from Anaerobic Membrane Bioreactors. **Renewable Energy**. Vol. 98, pp. 120-134

[45] Boonyakitsombut, S., Kim, M. I., Ahn, Y. H., and Speece, R. E. (2002). Degradation of Propionate and its Precursors: The Role of Nutrient Supplementation. **KSCE Journal of Civil Engineering**. Vol. 6, Issue 4, pp. 379-387. DOI: 10.1007/BF02841992

[46] Kozłowski, K., Mazurkiewicz, J., Chełkowski, D., Jeżowska, A., Cieślik, M., Brzoski, M., Smurzyńska1, A., Dongmin, Y., and Wei, Q. (2018). The Effect of Mixing During Laboratory Fermentation of Maize Straw with Thermofilic Technology. **Journal of Ecological Engineering**. Vol, 19, No. 5, pp. 93-98. DOI: 10.12911/22998993/91270

[47] Lili, M., Biro, G., Sulyok, E., Petis, M., Borbely, J., and Tamas, J. (2011). Novel Approach on the Basis of FOS/TAC Method. In **Proceeding International Symposia Risk Factors for Environment and Food Safety & Natural Resources and Sustainable Development & 50 Years of Agriculture Researche in Oradea;** University of Oradea, Oradea: Faculty of Environmental Protection. pp. 802-807