

แบบประเมินคุณภาพของบทความ

การประชุมสวนสุนันทาวิชาการด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีระดับชาติและนานาชาติ ครั้งที่ 2
“วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรม เพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน”

รหัสบทความ

ชื่อบทความภาษาไทย.....การผลิตรายวิชาโอเพ่นซอร์สจากขบวนรถม้าทางมร ๒๐๒๓ มร ๒๐๒๓ มร ๒๐๒๓

ข้อบทความภาษาอังกฤษ..... Bichythane production from agricultural and industrial waste

ชื่อผู้ทรงคุณวุฒิอ่านประเมินบทความ.....

ส่วนที่ 1 ผลการประเมินบทความ

เกณฑ์การประเมิน		คะแนนเต็ม	คะแนนที่ได้
1	บทความย่อภาษาไทย*	10	6
2	การอธิบายความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาวิจัย	10	5
3	การศึกษาเอกสารที่เกี่ยวข้องและการกำหนดกรอบแนวคิดของการวิจัยที่ปรากฏในบทนำ	10	5
4	การนำเสนอวัตถุประสงค์และวิธีดำเนินการวิจัย	10	6
5	การนำเสนอผลการวิจัย	10	6
6	การสรุปผลการวิจัย อภิปรายผลการวิจัยข้อเสนอแนะ	10	5
7	การอ้างอิงในบทความและท้ายบทความ	10	8
8	ความทันสมัย	10	8
9	ความมีประโยชน์	10	8
10	ความเหมาะสมของการใช้ภาษา	10	6
รวม		100	63

เกณฑ์การประเมิน

≥ 90 คะแนน = เห็นควรเผยแพร่ได้ โดยไม่มีการแก้ไขหรือแก้ไขภาษาเล็กน้อย

80-89 คะแนน = เห็นควรเผยแพร่หลังการปรับปรุงแก้ไข

<50-79 คะแนน = เห็นควรให้กรรมการพิจารณาอีกครั้ง หลังการปรับปรุง

สรุปผลการประเมิน 1. บทบาทหน้าที่ของกรมการศึกษานอกโรงเรียน นวัตกรรม ประยุกต์

ส่วนที่ 2 ประเด็นการแก้ไขเพิ่มเติม

ประเด็น	ประเด็นแก้ไข
1 บทคัดย่อไทย	- แก้ไขตามคำแนะนำของอาจารย์ให้ชัดเจน
2 การอธิบายความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาวิจัย	- แก้ไขตามคำแนะนำเกี่ยวกับข้อมูลที่นำมาใช้ให้มีปริมาณ, ทฤษฎีที่พอเพียงและมีความน่าสนใจ - แก้ไขตามคำแนะนำเกี่ยวกับวิธีการวิจัยโดยให้ชัดเจนและน่าสนใจ

ผลิตด้วยระบบ ๓๐ ชั่วโมง ทุกสัปดาห์ 110.9 ผลิต 1 เมตร
เพื่อใช้เป็นตัวควบคุม ปริมาณน้ำไหล 1 เมตร 110.9 ผลิตด้วย

ประเด็น	ประเด็นแก้ไข
3 การศึกษาเอกสารที่เกี่ยวข้องและการกำหนดกรอบแนวคิดของการวิจัย	- เปลี่ยนชื่อหัวข้อวิจัยให้ชัดเจน หน้า 2
4 การนำเสนอวัตถุประสงค์และวิธีดำเนินการวิจัย	- เปลี่ยนหัวข้อ ประเด็น 1 เป็น ศึกษาผลกระทบด้านสุขภาพ - เพิ่ม การคำนวณประสิทธิภาพการผลิต CO2
5 การนำเสนอผลการวิจัย	- ผลการวิจัยพบว่ามีประโยชน์ที่ได้จากการศึกษา 2 1. ผลผลิต P, R, M, L - การเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผลิต (VFA) ที่เกิดขึ้นระหว่างการผลิต
6 การสรุปผลการวิจัย อภิปรายผลการวิจัย ข้อเสนอแนะ	- ขอบเขตการวิจัย อันตรายต่อสุขภาพที่เกิดจากการผลิตก๊าซ - การเพิ่มปริมาณการผลิตให้เหมาะสมกับการผลิตก๊าซที่ได้ ด้วยงานวิจัยอื่นๆ
7 การอ้างอิงในบทความและท้ายบทความ	- เพิ่มข้อมูลอ้างอิง หน้า 1 หน้า 2 - ขาดข้อมูลอ้างอิง หน้า 2 หน้า 3
8 ความทันสมัย	- ข้อมูลมีความทันสมัย และ มีการใช้ข้อมูลการวิจัยที่เกี่ยวข้อง
9 ความมีประโยชน์	- งานวิจัยนี้มีประโยชน์ ทางด้านความรู้ทางสุขภาพ ซึ่งช่วยให้ 1. สามารถช่วยในการเลือกอาชีพที่เหมาะสม
10 ความเหมาะสมของการใช้ภาษา	ในภาษาไทย

ส่วนที่ 2 สรุปภาพรวมของต้นฉบับ

☐ ไม่มีการแก้ไข

☒ มีการแก้ไข

☐ น้อย

☐ ปานกลาง

☐ มาก

การผลิตก๊าซไฮเทนชีวภาพจากของเสียทางการเกษตรและอุตสาหกรรม

บทคัดย่อ

จากปัญหาเรื่องพลังงานขาดแคลนและผลกระทบของการกำจัดของเสียที่ไม่เหมาะสมต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมที่มีผลผลิตและเกิดของเสียทางการเกษตรและอุตสาหกรรมในปริมาณมาก โดยของเสียส่วนใหญ่เป็นชีวมวลที่สามารถเปลี่ยนแปลงเป็นพลังงานชีวภาพได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตก๊าซไฮเทนชีวภาพจากของเสียทางการเกษตรและอุตสาหกรรม ได้แก่ ขานอ้อย เหง้ามันสำปะหลัง ผักตบชวา และตะกอนแป้งมันสำปะหลัง โดยใช้กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกาศ 2 ขั้นตอน ดำเนินการทดลองแบบกะในขวดทดลอง 500 มล. ประกอบด้วยวัตถุดิบ 170 มิลลิลิตร รวมกับหัวเชื้อ 30 มิลลิลิตร ภายใต้สภาวะของอุณหภูมิที่ 35 ± 2 องศาเซลเซียส และค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นในช่วง 5.8-7.0 สำหรับการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพในขั้นตอนที่ 1 และค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นในช่วง 7.25-8.50 สำหรับการผลิตก๊าซมีเทนชีวภาพในขั้นตอนที่ 2 ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่า การผลิตก๊าซไฮเทนชีวภาพสูงสุดจากของเสียผักตบชวา + ตะกอนแป้งมันสำปะหลัง ด้วยผลผลิตของก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทนชีวภาพ มีค่าเท่ากับ 33.34 มิลลิลิตรไฮโดรเจน/กรัมชีโอดี และ 193.55 มิลลิลิตรมีเทน/กรัมชีโอดี ตามลำดับ และประสิทธิภาพการกำจัดชีโอดีร้อยละ 50 อย่างไรก็ตามควรมีการศึกษาเพิ่มเติมถึงสภาวะที่เหมาะสมของการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกาศ 2 ขั้นตอนในการส่งเสริมการผลิตก๊าซไฮเทนชีวภาพให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

9 COP added or consumed. 9

คำสำคัญ: ก๊าซไฮเทนชีวภาพ, ของเสียทางการเกษตรและอุตสาหกรรม, การย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกาศ 2 ขั้นตอน, ประสิทธิภาพการกำจัดชีโอดี

Biohythane production from agricultural and industrial wastes

Abstract

Regarding to the problems of energy deficiency and the effects of improper waste disposal on environment. Thailand is also agricultural land that has large quantities of agricultural and industrial wastes. Most of the waste is biomass that can be converted to bioenergy. Therefore, this research aims to the feasibility of biohythane production from agricultural and industrial wastes such as sugarcane bagasse, cassava rhizome, water hyacinth and cassava starch sediment by a two-stage anaerobic digestion. It was conducted in a batch test using a laboratory bottle that composited of 170 mL combined with an inoculum of 30 mL under conditions of temperature at $35\pm 2^{\circ}\text{C}$ and initial pH ranges of 5.8-7.0 for stage-I biohydrogen production and 7.25-8.50 for stage-II biomethane production, respectively. The results showed that the maximum biohythane from water hyacinth+cassava starch sediment (WH+CS) waste with hydrogen yield and methane yield of 33.34 mL $\text{H}_2/\text{g COD}$ and 193.55 mL $\text{CH}_4/\text{g COD}$, respectively. Also, COD removal efficiency was 50%. However, further studies should be taken to determine the optimum conditions of two-stage anaerobic digestion that enhance more efficient biohythane production.

Keywords: Biohythane; Agricultural and industrial waste; Two-stage anaerobic digestion; COD removal efficiency

บทนำ

ในปัจจุบันแหล่งพลังงานหลักที่ใช้ในการดำรงชีวิตประจำวัน เช่น เชื้อเพลิงฟอสซิล และถ่านหิน เริ่มเกิดภาวะขาดแคลน และมีส่วนสำคัญในการปล่อยก๊าซเรือนกระจก เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นก๊าซเรือนกระจกชั้นบรรยากาศ ส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์ภาวะโลกร้อนเพิ่มขึ้น ^{ดังนั้น} จึงต้องหาแหล่งพลังงานทดแทนที่เหมาะสมที่สามารถทดแทนพลังงานหลัก และเป็นพลังงานที่สะอาด ไม่ก่อให้เกิดมลพิษทางสิ่งแวดล้อม (Chandra et al., 2012) ก๊าซชีวภาพ (Biogas) ถือเป็นพลังงานทดแทนชนิดหนึ่งที่เป็นที่นิยม โดยเป็นก๊าซที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติจากการหมักย่อยสลายของสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะที่ปราศจากออกซิเจนหรือไม่ใช้อากาศ (Anaerobic digestion) องค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นก๊าซมีเทน (CH_4) กระบวนการนี้เป็นที่นิยมในการเปลี่ยนของเสียประเภทอินทรีย์ไปเป็นกระแสไฟฟ้า เป็นก๊าซหุงต้มเพื่อให้ความร้อนในการประกอบอาหาร และใช้เป็นก๊าซที่เป็นส่วนผสมในเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ (ชัยศรีและโกวิท, 2555) ปัจจุบันนี้ นอกจากก๊าซมีเทนแล้ว ยังมีก๊าซอีกชนิดหนึ่งที่สามารถนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนได้คือ ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานชนิดหนึ่งที่มีความน่าสนใจ เนื่องจากเป็นพลังงานที่สะอาด ลดการปล่อยมลพิษสู่สิ่งแวดล้อม และสามารถเป็นแนวทางการใช้ในเชิงพาณิชย์ในอนาคตได้ (รัชนิกร, 2554) ไฮโดรเจนและมีเทน ถือได้ว่าเป็นก๊าซชีวภาพที่เกิดจากกระบวนการย่อยสลายของสารอินทรีย์แบบไม่ใช้อากาศ ซึ่งเป็นที่นิยม เนื่องจากเป็นการนำของเสียมาผ่านกระบวนการผลิตเป็นพลังงานทดแทน การผลิตจะเป็นระบบการหมักแบบ 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนที่ 1 การผลิตก๊าซไฮโดรเจน และขั้นตอนที่ 2 การผลิตก๊าซมีเทน ในการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า ระบบการหมัก 2 ขั้นตอน มีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมากกว่าระบบการหมัก 1 ขั้นตอน (Liu et al., 2013) โดยก๊าซทั้ง 2 ชนิดจะเป็นพลังงานสะอาดและลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเมื่อเทียบกับการใช้พลังงานหลักอย่างน้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ และถ่านหิน จึงเกิดแนวคิดในการนำพลังงานทั้ง 2 ชนิดนี้มาผสมกันเพื่อก่อให้เกิดพลังงานทดแทนในรูปแบบใหม่ เรียกว่า ก๊าซไฮเทน (Hythane) (Liu et al., 2018)

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมที่มีผลผลิตทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตรอยู่เป็นจำนวนมาก จึงส่งผลให้เกิดของเสียจากกิจกรรมเหล่านี้เป็นจำนวนมาก โดยของเสียพวกนี้เป็นแหล่งชีวมวล ที่กักเก็บแหล่งพลังงาน ซึ่งหาได้ง่ายและมีศักยภาพสูง การนำวัสดุเหล่านี้มาผลิตเป็นพลังงาน ทำให้เราลดการใช้เชื้อเพลิงหลักและยังช่วยแก้ปัญหาการกำจัดของเสียทางการเกษตรได้ในเวลาเดียวกัน ชีวมวลจึงเป็นแหล่งพลังงานที่เหมาะสมต่อการพัฒนาอย่างยั่งยืนและลดปัญหาล้างแวดล้อม (จารุวรรณ, 2015) ทั้งนี้ วัตถุดิบที่จะนำมาทดสอบ ได้แก่ 1) ขานอ้อย เป็นส่วนของลำต้นอ้อยที่หีบคั้นเอาน้ำไปใช้ประโยชน์ เหลือแต่กากและเส้นใย 2) เหม้ามันสำปะหลัง เป็นส่วนที่เชื่อมต่องระหว่างหัวมันกับลำต้น มักพบที่แปลงเก็บเกี่ยวมันสำปะหลัง ซึ่งจะถูกทิ้งหลังจากที่เก็บเอาแต่หัวมันไปใช้ประโยชน์ในโรงงาน 3) ผักตบชวา เป็นวัชพืชน้ำที่ขยายพันธุ์อย่างรวดเร็วหลายในแม่น้ำ ซึ่งทำให้เกิดอุปสรรคต่อการคมนาคมและการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ และ 4) ตะกอนแป้งมันสำปะหลัง เป็นตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานผลิตแป้ง มีองค์ประกอบหลักเป็นคาร์โบไฮเดรต

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการผลิตก๊าซไฮเทนชีวภาพจากของเสียทางการเกษตรและอุตสาหกรรม ด้วยกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศ (Anaerobic digestion) 2 ขั้นตอน

ระเบียบวิธีวิจัย

1. วัตถุดิบตั้งต้นที่ใช้ในการทดลอง

วัตถุดิบตั้งต้นที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วย 1) ขานอ้อย (SB) 2) เหม้ามันสำปะหลัง (CR) 3) ผักตบชวา (WH) และ 4) ตะกอนแป้งมันสำปะหลัง (CS) นอกจากนี้จะใช้ตะกอนแป้งเป็นตัวหมักร่วมกับวัตถุดิบที่เป็นของเสียทางการเกษตรทั้ง

การทดลองทำที่ ภาว. ๖๖ ชว. ๖๖

ทง. ๖๖ ๖๖ ๖๖ ๖๖ ๖๖ ๖๖

๖๖ ๖๖ ๖๖ ๖๖ ๖๖ ๖๖

3 ชนิดแรก ได้แก่ 5) ขานอ้อย+ตะกอนแป้งมันสำปะหลัง (SB+CS) 6) เหม้ามันสำปะหลัง+ตะกอนแป้งมันสำปะหลัง (CR+CS) 7) ผักตบชวา+ตะกอนแป้งมันสำปะหลัง (WH+CS) รวมทั้งสิ้น 7 ชนิด การทดลองจะใช้กากตะกอนจุลินทรีย์ (Seed sludge) จากโรงบำบัดสิ่งปฏิกูลแบบไม่ใช้ออกมาเป็นหัวเชื้อ (Inoculum) ทั้งนี้ได้มีการปรับสภาพวัตถุดิบตั้งต้นด้วยวิธีที่ต่างกันในแต่ละวัตถุดิบ เพื่อให้มีความเหมาะสมต่อการผลิตก๊าซ โดยขานอ้อยกับเหม้ามันสำปะหลังจะทำการปรับสภาพด้วยการผสมน้ำแล้วหมักไว้ในถังดำเป็นเวลา 7 วัน เพื่อเป็นการสลายโครงสร้างวัตถุดิบและกระตุ้นจุลินทรีย์ที่มีส่วนในการผลิตก๊าซชีวภาพ ส่วนผักตบชวาจะปรับสภาพด้วยความร้อน (Preheat treatment) ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (Zheng et al., 2014) ส่วนตะกอนแป้งมันสำปะหลังไม่มีการปรับสภาพ วัตถุดิบตั้งต้นทั้งหมดจะนำมาร้อนด้วยตะแกรงคัดขนาด 2 มิลลิเมตร จากนั้นเติมน้ำกลั่นในอัตราส่วนของวัตถุดิบตั้งต้นต่อน้ำกลั่น เท่ากับ 1 ต่อ 2 และวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพและเคมีที่สำคัญ ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ซีโอดี (COD) ของแข็งทั้งหมด (TS) ของแข็งระเหยได้ (VS) ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (TOC) และปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (TKN) (APHA, 2012) สำหรับของเสียทางการเกษตรจะมีการวิเคราะห์ลิกนิน (Lignin) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และเซลลูโลส (Cellulose) (AOAC, 2016)

2. การทดลอง

การทดลองดำเนินการแบบกะ (Batch experiment) โดยใช้ขวดทดลอง (Laboratory bottle) ขนาด 250 มิลลิลิตร และต้องหุ้มด้วยถุงพลาสติกสีดำเพื่อทำให้เกิดสภาวะที่ไม่มีแสง ปริมาตรสารละลายที่ทำการทดลองคือ 200 มิลลิลิตร ประกอบด้วย หัวเชื้อ 30 มิลลิลิตร และวัตถุดิบตั้งต้น 170 มิลลิลิตร ลำดับต่อมาทำการปรับสภาพของขวดแก้วให้อยู่ในสภาพไร้ออกซิเจน โดยใช้การพ่นไล่อากาศด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2) ประมาณ 1 นาที และปิดขวดแก้วด้วยจุกยาง พร้อมติดตั้งถุงเก็บก๊าซ (Air bag) เพื่อบรรจุก๊าซที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดลอง แล้วนำมาวางลงในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิแบบเขย่า (Water bath shaker) ที่ 35 ± 2 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราเร็ว 100 รอบต่อนาที

ในการศึกษานี้จะใช้กระบวนการหมักย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกาศ 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนที่ 1 การผลิตก๊าซไฮโดรเจนด้วยหัวเชื้อตั้งต้นซึ่งปรับสภาพด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ประมาณ 15 นาที (Heat shock) เพื่อยับยั้งกิจกรรมของแบคทีเรียที่ใช้ไฮโดรเจน และเป็นการกระตุ้นแบคทีเรียที่สามารถผลิตไฮโดรเจนได้ (Valdez-Vazquez and Poggi-Varaldo, 2009) โดยค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นของวัตถุดิบตั้งต้นอยู่ในช่วงที่เป็นกรดถึงกลางตามความเหมาะสมของแต่ละชนิด คือ ขานอ้อยกับเหม้ามันสำปะหลัง (pH 5.85) ผักตบชวา (pH 6.00) และตะกอนแป้งมันสำปะหลัง ขานอ้อย+ตะกอนแป้งมันสำปะหลัง เหม้ามันสำปะหลัง+ตะกอนแป้งมันสำปะหลัง และผักตบชวา+ตะกอนแป้งมันสำปะหลัง (pH 7.00) สำหรับขั้นตอนที่ 2 การผลิตก๊าซมีเทน ซึ่งใช้หัวเชื้อตั้งต้นที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยความร้อน และวัตถุดิบตั้งต้นมีความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นจะอยู่ในช่วงที่เป็นกลางถึงด่างคือ ขานอ้อย เหม้ามันสำปะหลัง และผักตบชวา (pH 7.25) ตะกอนแป้งมันสำปะหลัง (pH 8.50) ขานอ้อย+ตะกอนแป้งมันสำปะหลัง เหม้ามันสำปะหลัง+ตะกอนแป้งมันสำปะหลัง และผักตบชวา+ตะกอนแป้งมันสำปะหลัง (pH 8.00) ซึ่งการปรับสภาพความเป็นกรด-ด่างของสารตั้งต้นในขวดทดลองใช้โซเดียมไบคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) ให้มีสภาพเป็นกลางถึงด่าง และกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ให้มีสภาพเป็นกรด

3. การติดตามตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในกระบวนการหมัก

การตรวจวัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นซึ่งถูกเก็บไว้ในถุงเก็บก๊าซ โดยใช้กระบอกฉีดยาที่ทำด้วยแก้ว (Glass syringe) ทุกๆ 24 ชั่วโมง และตรวจวัดความเข้มข้นของก๊าซ H_2 , CH_4 , N_2 และ CO_2 ที่เป็นองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นด้วยเครื่อง Gas Chromatography (GC-TCD) หลังจากเริ่มทำการทดลองไปแล้ว 4, 6, 8, 10, 12 และทุกๆ 24 ชั่วโมง จนกว่าการทดลองไม่มีการผลิตก๊าซชีวภาพเกิดขึ้น นอกจากนี้จะมีการเก็บตัวอย่างน้ำในขวดแก้วทดลอง โดยเก็บในช่วงเวลาก่อนและหลังกระบวนการหมักและตรวจวัดค่าซีโอดีเพื่อหาประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (COD removal efficiency) ตามสมการ

4. การวิเคราะห์ข้อมูล

การคำนวณปริมาณการผลิตก๊าซไฮโดรเจน จะใช้สมการ Mass balance equation ซึ่งแบ่งเป็น การผลิตก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogen production) และการผลิตก๊าซมีเทน (Methane production) (Sreela-or et al., 2011) ดังสมการที่ 1

$$V_{H_2,i} = V_{H_2,i-1} + C_{H_2}(V_{G,i} - V_{G,i-1}) + V_H(C_{H_2,i} - C_{H_2,i-1}) \quad (1)$$

เมื่อ $V_{H_2,i}$ และ $V_{H_2,i-1}$ คือ ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจน (หรือก๊าซมีเทน) สะสม ณ เวลาที่ i และ $i-1$ ตามลำดับ

$V_{G,i}$ และ $V_{G,i-1}$ คือ ปริมาตรก๊าซชีวภาพทั้งหมด ณ เวลาที่ i และ $i-1$ ตามลำดับ

$C_{H_2,i}$ และ $C_{H_2,i-1}$ คือ สัดส่วนของก๊าซไฮโดรเจน (หรือก๊าซมีเทน) บริเวณส่วนอากาศด้านบนในขวดแก้วทดลอง (headspace) ณ เวลาที่ i และ $i-1$ ตามลำดับ

ตามสมการ (1)

V_H คือ ปริมาตรทั้งหมดของบริเวณ Headspace

สมการแบบจำลอง Modified Gompertz equation เป็นอีกหนึ่งสมการที่จะนำมาใช้ในการคำนวณการปริมาณการผลิตก๊าซไฮโดรเจนสะสม (Cumulative hydrogen production) และปริมาณการผลิตก๊าซมีเทนสะสม (Cumulative methane production) (Xinyuan et al., 2013; Shan et al., 2017) ดังสมการที่ 2

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

เมื่อ H (mL) คือ ปริมาณการผลิตก๊าซไฮโดรเจนสะสม (หรือปริมาณการผลิตก๊าซมีเทนสะสม)

P (mL) คือ ปริมาณการผลิตก๊าซไฮโดรเจนสูงสุด (หรือปริมาณการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด)

R_m (mL/h) คือ อัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนสูงสุด (หรืออัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด)

λ (h) คือ ระยะเวลาการปรับสภาพของวัตถุดิบ

e คือ 2.171828

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

1. คุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของวัตถุดิบตั้งต้น

ผลการทดลองคุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีจากวัตถุดิบตั้งต้นทั้งหมด แสดงในตารางที่ 1 ดังนี้

ตารางที่ 1 คุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของเสียทางการเกษตรและอุตสาหกรรมและกากตะกอนจุลินทรีย์

พารามิเตอร์ (หน่วย)	SB	CR	WH	CS	SB+CS	CR+CS	WH+CS	Seed sludge
pH	4.50	6.28	6.68	4.12	4.65	5.33	5.15	8.16
COD (g/L)	4.00	24.00	24.00	24.00	32.00	32.00	40.00	24.00
TS (g/L)	0.06	3.37	0.21	196.03	171.57	442.46	262.61	325.69
VS (g/L)	0.04	3.11	0.14	193.93	170.85	402.52	221.77	309.03
TOC (g/L)	1.73	2.04	0.67	2.55	3.78	4.15	4.15	8.30
TKN (g/L)	0.04	0.38	0.36	0.92	0.94	1.25	0.92	2.10
Lignin (%)	7.69	20.31	3.28	-	-	-	-	-
Hemicellulose (%)	22.96	0.47	18.88	-	-	-	-	-
Cellulose (%)	41.12	37.55	43.22	-	-	-	-	-

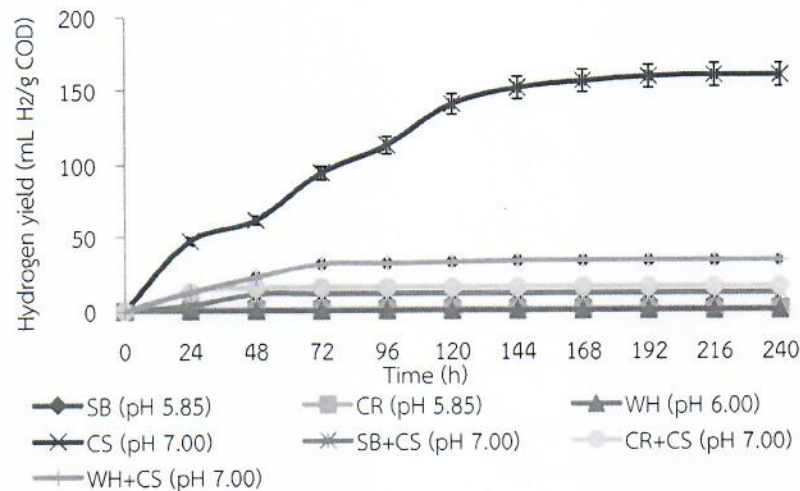
จากผลการทดลองคุณลักษณะของวัตถุดิบตั้งต้นทั้งหมดพบว่า มีค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ในช่วง 4.12 – 8.16 ซึ่งส่วนใหญ่จะมีค่าเป็นกรด ยกเว้นกากตะกอนที่มีค่าเป็นด่าง นอกจากนี้ค่าซีโอดีจะอยู่ในช่วง 4 – 40 กรัมต่อลิตร โดยผักตบชวา+ตะกอนแป้งมันสำปะหลังมีค่ามากที่สุดคือ 40 กรัม/ลิตร และชานอ้อยมีค่าน้อยที่สุดคือ 4 กรัม/ลิตร

2. การศึกษาความเป็นไปได้ของการผลิตก๊าซไฮเทน

2.1 การผลิตก๊าซไฮโดรเจน

ค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นของกระบวนการหมักขึ้นตอนที่ 1 จะอยู่ในช่วงที่เป็นกรดจนถึงกลาง โดยชานอ้อยกับเหง้ามันสำปะหลังมีค่าเท่ากับ 5.85 ผักตบชวามีค่าเท่ากับ 6 และค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นของตะกอนแป้งมันสำปะหลังกับวัตถุดิบที่ผสมกับตะกอนแป้งมันสำปะหลัง เท่ากับ 7 จากผลการทดลองในภาพที่ 1 พบว่า วัตถุดิบตั้งต้นที่มีผลผลิตก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogen yield) ที่สูงสุดคือ ตะกอนแป้งมันสำปะหลัง (159.99 มิลลิลิตรไฮโดรเจน/กรัมซีโอดี) และเรียงลำดับ

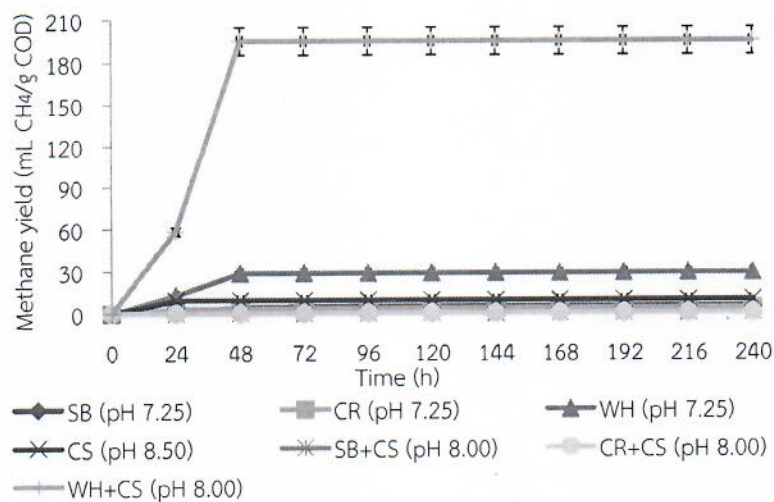
จากสูงมาต่ำดังนี้ ผักตบชวา+ตะกอนแป้งมันสำปะหลัง (33.34 มิลลิลิตรไฮโดรเจน/กรัมซีโอดี), เหง้ามันสำปะหลัง+ตะกอนแป้งมันสำปะหลัง (15.90 มิลลิลิตรไฮโดรเจน/กรัมซีโอดี), ขาน้อย+ตะกอนแป้งมันสำปะหลัง (11.50 มิลลิลิตรไฮโดรเจน/กรัมซีโอดี), เหง้ามันสำปะหลัง (1.12 มิลลิลิตรไฮโดรเจน/กรัมซีโอดี), ขาน้อย (0.36 มิลลิลิตรไฮโดรเจน/กรัมซีโอดี) และ ผักตบชวา (0.11 มิลลิลิตรไฮโดรเจน/กรัมซีโอดี) ตามลำดับ นอกจากนี้ ช่วงเวลาในการปรับสภาพ (Lag phase) สำหรับการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจะอยู่ในช่วง 8 – 14 ชั่วโมง



ภาพที่ 1 ผลผลิตก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogen yield) จากของเสียทางการเกษตรและอุตสาหกรรม

2.2 การผลิตก๊าซมีเทน

สำหรับกระบวนการหมักขั้นตอนที่ 2 ค่าความเป็นกรด-ด่างจะอยู่ในช่วงที่เป็นกลางจนถึงเบสอ่อน ซึ่งก็คือประมาณ 7-8 ในการทดสอบได้ตั้งค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นของขาน้อย เหง้ามันสำปะหลัง และผักตบชวาเท่ากับ 7.25 ตะกอนแป้งมันสำปะหลังได้ตั้งค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นเท่ากับ 8.50 ส่วนขาน้อย+ตะกอนแป้งมันสำปะหลัง เหง้ามันสำปะหลัง+ตะกอนแป้งมันสำปะหลัง และผักตบชวา+ตะกอนแป้งมันสำปะหลัง มีค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นเท่ากับ 8.00

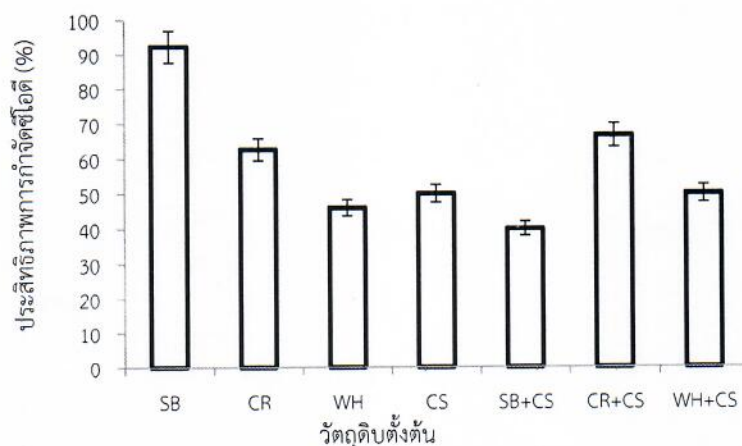


ภาพที่ 2 ผลผลิตก๊าซมีเทน (Methane yield) จากของเสียทางการเกษตรและอุตสาหกรรม

จากผลการทดลองในรอบที่ 2 พบว่า วัตถุดิบตั้งต้นที่มีผลผลิตก๊าซมีเทน (Methane yield) ที่สูงสุดคือ ผักตบชวา+ตะกอนแป้งมันสำปะหลัง (195.04 มิลลิลิตรมีเทน/กรัมชีโอดี) และเรียงลำดับจากสูงมาต่ำดังนี้ ผักตบชวา (28.61 มิลลิลิตรมีเทน/กรัมชีโอดี) ตะกอนแป้งมันสำปะหลัง (9.45 มิลลิลิตรมีเทน/กรัมชีโอดี), ขานอ้อย (5.07 มิลลิลิตรมีเทน/กรัมชีโอดี) และเหง้ามันสำปะหลัง (3.39 mL CH₄/g COD) ตามลำดับ ทั้งนี้ ขานอ้อย+ตะกอนแป้งมันสำปะหลังกับเหง้ามันสำปะหลัง+ตะกอนแป้งมันสำปะหลังไม่มีผลผลิตก๊าซมีเทนเกิดขึ้น สำหรับช่วงเวลาในการปรับสภาพของการผลิตก๊าซมีเทนจะอยู่ในช่วง 10 – 14 ชั่วโมง

3. การหาค่าประสิทธิภาพการกำจัดชีโอดีในระบบการหมัก 2 ขั้นตอน

ประสิทธิภาพการกำจัดชีโอดี เป็นการแสดงถึงการลดลงของอินทรีย์วัตถุในระบบการหมักแบบย่อยสลาย โดยอินทรีย์วัตถุจะลดลงและเปลี่ยนเป็นก๊าซชีวภาพผลการทดสอบดูได้จากภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ประสิทธิภาพการกำจัดชีโอดีในระบบการหมักวัตถุดิบตั้งต้นของเสียทางการเกษตรและอุตสาหกรรม 2 ขั้นตอน

จากผลการทดลองในภาพที่ 3 พบว่า วัตถุดิบที่มีประสิทธิภาพการกำจัดชีโอดีที่สูงที่สุดคือ ขานอ้อยร้อยละ 92.33 และเรียงลำดับจากสูงมาต่ำดังนี้ เหง้ามันสำปะหลัง+ตะกอนแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 66.67 เหง้ามันสำปะหลังร้อยละ 62.67 ผักตบชวา+ตะกอนแป้งมันสำปะหลัง และตะกอนแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 50 และตามด้วยผักตบชวาร้อยละ 46 และขานอ้อย+ตะกอนแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 40 ตามลำดับ

สรุปและอภิปรายผล

จากการทดลองด้วยกระบวนการหมักย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกาศ 2 ขั้นตอน พบว่า ขั้นตอนที่ 1 การผลิตก๊าซไฮโดรเจน ตะกอนแป้งมันสำปะหลัง มีค่าสูงสุดคือ 159.99 มิลลิลิตรไฮโดรเจน/กรัมชีโอดี ส่วนขั้นตอนที่ 2 การผลิตก๊าซมีเทน ผักตบชวา+ตะกอนแป้งมันสำปะหลัง มีค่าสูงสุดคือ 193.55 มิลลิลิตรมีเทน/กรัมชีโอดี ทั้งนี้ ตะกอนแป้งมันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบที่มีการผลิตก๊าซไฮโดรเจนที่สูงที่สุด แต่การผลิตก๊าซมีเทนมีค่าต่ำ ส่วนผักตบชวา+ตะกอนแป้งมันสำปะหลังมีการผลิตก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทนที่สูงทั้ง 2 ขั้นตอน นอกจากนี้ยังพบว่า วัตถุดิบที่เป็นของเสียทางการเกษตร ได้แก่ ขานอ้อย เหง้ามันสำปะหลัง และผักตบชวา มีคุณสมบัติในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนน้อยกว่าตะกอนแป้งมันสำปะหลัง และผักตบชวา+ตะกอนแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งโดยทั่วไปตะกอนแป้งที่มาจากกระบวนการน้ำเสียจะมีองค์ประกอบที่สามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานเช่น กลูโคส ซูโครส แป้ง และโปรตีนที่มากกว่า และยังมีกลุ่มจุลินทรีย์บางชนิดที่มีคุณสมบัติในการผลิตและเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการผลิตก๊าซ (Show et al., 2012) แต่วัตถุดิบที่มีคุณสมบัติของลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulose) มีองค์ประกอบที่สามารถ

เปลี่ยนเป็นพลังงานน้อยกว่าตะกอนแป้งมาก และยังมีกลิ่นซึ่งเป็นตัวขัดขวางการทำงานของจุลินทรีย์ในการผลิตพลังงาน (ตะวันและคณะ, 2561) การทดลองครั้งนี้ยังพบว่า ชานอ้อย+ตะกอนแป้งมันสำปะหลัง กับ เหม้ามันสำปะหลัง+ตะกอนแป้งมันสำปะหลัง เมื่อทำการทดลองพบว่า มีคุณสมบัติในการผลิตก๊าซไฮโดรเจน แต่ไม่มีการผลิตก๊าซมีเทน

ค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นของกระบวนการหมักขั้นตอนที่ 1 จะตั้งค่าให้อยู่ในช่วงที่เป็นกรดจนถึงกลาง ซึ่งสภาวะที่เป็นกรดจะส่งผลให้แบคทีเรียที่สามารถผลิตไฮโดรเจนผลิตไฮโดรเจนได้มากขึ้น (Valdez-Vazquez and Poggi-Varaldo, 2009) ซึ่งส่วนใหญ่ค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมในการผลิตจะอยู่ในช่วง 5.5-6.8 (Liu et al., 2011) แต่ก็ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบตั้งต้นที่นำมาทดสอบด้วยว่าเหมาะกับค่าความเป็นกรด-ด่างในช่วงใดจึงจะให้ผลผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้สูงที่สุด ในการศึกษานี้ได้ปรับค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นให้มีความเหมาะสมในแต่ละวัตถุดิบ โดยเฉพาะตะกอนแป้งมันสำปะหลังกับวัตถุดิบที่ผสมกับตะกอนแป้งมันสำปะหลัง มีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7.0 เพราะ จากการทดลองในเบื้องต้นพบว่า มีความเป็นไปได้ในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนที่สูงกว่าการตั้งค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นในช่วง 5.0 - 6.5 ซึ่งจะคล้ายกับการศึกษาของ Wongthanate and Mongkarothai (2018) ในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากเศษอาหารเหลือทิ้งในช่วงค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นที่ 5.0 - 9.0 พบว่า ค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น 7.0 มีการผลิตก๊าซไฮโดรเจนที่สูงที่สุด สำหรับค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นของการผลิตก๊าซมีเทนในขั้นตอนที่ 2 วัตถุดิบที่เป็นของเสียทางการเกษตร ได้แก่ ชานอ้อย เหม้ามันสำปะหลัง และ ผักตบชวา ได้ตั้งค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นอยู่ที่ 7.25 ซึ่งถือว่าเหมาะสม เพราะ โดยทั่วไปค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นของการผลิตก๊าซมีเทนควรอยู่ในช่วง 6.6 - 7.8 ถ้าความเป็นกรด-ด่างลดลงต่ำกว่า 5.0 จะหยุดกระบวนการย่อยสลาย โดยแบคทีเรีย Methanogen อ่อนไหวต่อความเป็นกรด-ด่างมาก (จารุวรรณ, 2015) แต่ตะกอนแป้งมันสำปะหลังได้ตั้งค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นเท่ากับ 8.50 ส่วนชานอ้อย+ตะกอนแป้งมันสำปะหลัง เหม้ามันสำปะหลัง+ตะกอนแป้งมันสำปะหลัง และ ผักตบชวา+ตะกอนแป้งมันสำปะหลัง มีค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นเท่ากับ 8.00 เพราะ จากการทดลองพบว่า วัตถุดิบตั้งต้นเหล่านี้จะมีการผลิตก๊าซมีเทนตั้งแต่ค่าความเป็นกรด-ด่างที่ 8-8.5 ส่วนในช่วงค่า pH 7.00 ไม่มีการผลิตก๊าซมีเทน

จากผลการทดลองที่ได้กล่าวมาในข้างต้นจะเห็นได้ว่า มีประเด็นที่อาจจะมีการศึกษาเพิ่มเติมคือ ทำไมชานอ้อย + ตะกอนแป้งมันสำปะหลัง กับ เหม้ามันสำปะหลัง+ตะกอนแป้งมันสำปะหลัง ถึงไม่เกิดก๊าซมีเทน และขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทนของวัตถุดิบตั้งต้นที่เป็นตะกอนแป้งมันสำปะหลังถึงต้องตั้งค่าความเป็นกรด-ด่างที่ 8-8.5 จึงสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้ ควรต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมต่อไปว่าคุณลักษณะของวัตถุดิบตั้งต้นเหล่านี้ มีปัจจัยใดบ้างที่ส่งเสริมหรือยับยั้งการผลิต เช่น คุณลักษณะของวัตถุดิบตั้งต้นด้านอื่น การปรับสภาพวัตถุดิบตั้งต้นด้วยวิธีการอื่น การปรับอัตราส่วนคาร์บอน/ไนโตรเจน ธาตุอาหาร กรดอินทรีย์ระเหยง่าย แอมโมเนีย-ไนโตรเจน และกลุ่มจุลินทรีย์ เป็นต้น (Roy and Das, 2016; Liu et al., 2013)

การศึกษาความเป็นไปได้ของการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพ ซึ่งประกอบไปด้วยก๊าซไฮโดรเจนกับมีเทน จากวัตถุดิบตั้งต้นทั้งหมด 7 ตัวอย่าง ด้วยกระบวนการหมักย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกาศ 2 ขั้นตอน สรุปได้ว่า ผักตบชวา+ตะกอนแป้งมันสำปะหลัง เป็นวัตถุดิบที่มีศักยภาพในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพที่สูงทั้ง 2 ขั้นตอน โดยผลผลิตของก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทนชีวภาพ มีค่าเท่ากับ 33.34 มิลลิลิตรไฮโดรเจน/กรัมซีโอดี และ 193.55 มิลลิลิตรมีเทน/กรัมซีโอดี ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีอยู่ที่ร้อยละ 50

ข้อเสนอแนะ

1. การทำวิจัยในครั้งต่อไป ควรมีการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซไฮโดรเจน เช่น ค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น อุณหภูมิ อัตราส่วนคาร์บอน/ไนโตรเจน และการปรับสภาพด้วยวิธีต่างๆ เป็นต้น เพื่อส่งเสริมให้การผลิตก๊าซไฮโดรเจนมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

2. ข้อมูลผลการทดลองในครั้งนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ขยายผลให้อยู่ในระดับที่ใหญ่ขึ้น เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบการผลิตก๊าซชีวภาพ พลังงานทดแทนในอนาคตต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- จารุวรรณ วงศ์พะเนตร. (2558). สิ่งแวดล้อมและพลังงานสีเขียว. นครปฐม: สายสีการพิมพ์.
- ชัยศรี ธาธาสวัสดิ์พิพัฒน์ และโกวิท สุวรรณหงษ์. (2555). การผลิตแก๊สชีวภาพจากซากชีวมวลในร่องสวนใน พื้นที่อำเภอ อัมพวา จังหวัดสมุทรสงคราม (รายงานผลการวิจัย). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา.
- ตะวัน มาตวง, อรวรรณ ชุนหาติ, และรัชพล พะวงศ์รัตน์. (2561). ผลของการปรับสภาพชีวมวลประเภทลิกโนเซลลูโลสด้วย คลื่นอัลตราโซนิกร่วมกับสารเคมีต่อลักษณะทางสัณฐานของเส้นใยเซลลูโลส. วารสารวิชาการ มทร.สุวรรณภูมิ, 6(1), 26-36.
- รัชนิกร วันจันทร์ทิ. (2554). ก๊าซไฮโดรเจน : ความคาดหวังเพื่อเป็นแหล่งพลังงานที่ยั่งยืน. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา, 16(1), 131-140.
- American Public Health Association (APHA). (2012). Standard methods for the examination of water and wastewater. 22nd ed. Washington D.C.
- Association of Official Analytical Chemists (AOAC). (2016). Official Methods of Analysis. (20th ed). Washington D.C.
- Chandra, R., Takeuchi, H., & Hasegawa, T. (2012). Methane production from lignocellulosic agricultural crop wastes: A review in context to second generation of biofuel production. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(3), 1462-1476. doi: 10.1016/j.rser.2011.11.035.
- Elbeshbishy, E. & Nakhla, G. (2012). Batch anaerobic co-digestion of proteins and carbohydrates. Bioresource Technology, 116, 170-178. doi: 10.1016/j.biortech.2012.04.052.
- Liu, C., Whang, L. M., Ren, W. J., & Lin, P. Y. (2011). The effect of pH on the production of biohydrogen by clostridia: Thermodynamic and metabolic considerations. International Journal of Hydrogen Energy, 36(1), 439-449. doi: 10.1016/j.ijhydene.2010.10.045.
- Liu, Z., Zhang, C., Lu, Y., Wu, X., Wang, L., ... Xing, X. H. (2013). States and challenges for high-value biohydrogen production from waste biomass by dark fermentation technology. Bioresource Technology, 135, 292-303. doi: 10.1016/j.biortech.2012.10.027.
- Liu, Z., Si, B., Li, J., He, J., Zhang, C., Lu, Y. ... Xing, X. H. (2018). Bioprocess engineering for biohydrogen production from low-grade waste biomass: technical challenges towards scale up. Current Opinion in Biotechnology, 50, 25-31. doi: 10.1016/j.copbio.2017.08.014.

- Roy, S. & Das, D. (2016). Biohythane production from organic wastes: present state of art. *Pollution Control Technology and Alternate Energy Options*, 23(10), 9391-9410. doi: 10.1007/s11356-015-5469-4.
- Shan, F.F., Xiao, H.X., Meng, D., Xian, Z.Y. & Rong, B.G. (2017). Hydrogen and methane production from vinasse using two-stage anaerobic digestion. *Process Safety and Environmental Protection*, 107, 81-86. doi: 10.1016/j.psep.2017.01.024
- Show, K.Y., Lee, D.J., Tay, J.H., Lin, C.Y. & Chang, J.S. (2012). Biohydrogen production: Current perspectives and the way forward. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(20), 15616-15631. doi: 10.1016/j.ijhydene.2012.04.109.
- Sreela-or, C., Plangklang, P., Imai, T. & Reungsang, A. (2011). Co-digestion of food waste and sludge for hydrogen production by anaerobic mixed cultures: Statistical key factors optimization. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(21), 14227-14237. doi: 10.1016/j.ijhydene.2011.05.145.
- Valdez-Vazquez, I. & Poggi-Varaldo, H. M. (2009). Hydrogen production by fermentative consortia. *Renewable and Sustainable Energy Rev*, 13(5), 1000-1013. doi: 10.1016/j.rser.2008.03.003.
- Wongthanate, J. and Mongkarohtai, K. (2018). Enhanced thermophilic bioenergy production from food waste by a two-stage fermentation process. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 7(2), 109-116. doi: 10.1007/s40093-018-0196-8.
- Xinyuan, L., Ruying, L., Min, J. & Li, H. (2013). Hydrogen and methane production by co-digestion of waste activated sludge and food waste in the two-stage fermentation process: substrate conversion and energy yield. *Bioresource Technology*, 146, 317-323. doi: 10.1016/j.biortech.2013.07.096.
- Zheng, Y., Zhao, J., Xu, F. & Li, Y. (2014). Pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biogas production. *Progress in Energy and Combustion Science*, 42(1), 35-53. doi: 10.1016/j.pecs.2014.01.001.