Research Article

Received: December 26, 2019; Accepted: October 8, 2020

# ศักยภาพการให้ค่าพลังงานความร้อนของขยะเทศบาล : กรณีศึกษาเทศบาลพรหมโลก

# Potential of Heating Energy Generation of Municipal Solid Waste: A Case Study of Promlok Municipality

วัฒนณรงค์ มากพันธ์*, ธัญญารัตน์ รัตนถาวร และอุดม ทิพย์รักษ์

*สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*

*มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช ตำบลท่างิ้ว อำเภอเมือง จังหวัดนครศรีธรรมราช 80280*

วรรธนศักดิ์ สุขสง

*คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี*

*แขวงท่าข้าม เขตบางขุนเทียน กรุงเทพมหานคร 10150*

สมพงศ์ โอทอง

*สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ*

*วิทยาเขตพัทลุง ตำบลบ้านพร้าว อำเภอป่าพะยอม จังหวัดพัทลุง 93210*

Wattananarong Markphan*, Thanyarat Rattanathavorn and Udom Tiprug

*Program in Environmental Science, Faculty of Science and Technology,*

*Nakhon Si Thammarat Rajaphat University, Tha Ngio, Muang, Nakhon Si Thammarat 80280*

Wantanasak Suksong

*School of Bioresources and Technology, King Mongkut's University of Technology Thonburi,*

*Tha Kham, Bang Khun Thian, Bangkok 10150*

Sompong O-thong

*Program in Biotechnology, Department of Biology, Faculty of Science, Thaksin University,*

*Phatthalung Campus, Ban Phrao, Pa Payom, Phatthalung 93210*

**บทคัดย่อ**

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินศักยภาพการให้ค่าพลังงานความร้อนจากขยะเผาไหม้ได้และขยะเผาไหม้ไม่ได้ เพื่อเป็นแนวทางแก้ไขปัญหาการจัดการขยะของเทศบาล งานวิจัยได้ศึกษาองค์ประกอบทางกายภาพและทางเคมี หาค่าความร้อนจากขยะเผาไหม้ได้ด้วยเครื่องบอมบ์แคลอรี่มิเตอร์ และการผลิตมีเทนจากขยะเผาไหม้ไม่ได้ด้วยการย่อยสลายมีแบบไร้อากาศสองขั้นตอน ผลการศึกษาพบว่าขยะในเทศบาลพรหมโลกมีปริมาณขยะเฉลี่ย 3.47

***ผู้รับผิดชอบบทความ** : wattananarong@gmail.com **doi:** 10.14456/tstj.2021.50

ตันต่อวัน มีองค์ประกอบเป็นขยะอินทรีย์ร้อยละ 41.67 พลาสติกร้อยละ 25.83 โดยน้ำหนัก สามารถแบ่งเป็นขยะที่เผาไหม้ได้ ขยะที่เผาไหม้ไม่ได้ และขยะคัดทิ้ง มีค่าร้อยละ 43.33, 48.33 และ 8.33 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ขยะเผาไหม้ได้มีค่าความชื้นร้อยละ 36.94 ของแข็งทั้งหมดร้อยละ 63.06 และของแข็งระเหยทั้งหมดร้อยละ 19.02 องค์ประกอบของขยะที่เผาไหม้ไม่ได้มีค่าความชื้นร้อยละ 77.79 ของแข็งทั้งหมดร้อยละ 22.21 และการผลิตมีเทนที่ได้จากการหมักขยะร่วมกับกล้าเชื้อจุลินทรีย์จากน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ แปรผันปริมาณขยะทั้งหมด 5 ระดับ คือ ความเข้มข้นร้อยละ 3, 5, 7, 9 และ 11 โดยน้ำหนักของขยะเทศบาล พบว่าการย่อยสลายแบบไร้อากาศสองขั้นตอนของเทศบาลพรหมโลกผลิตไฮโดรเจนและผลิตมีเทนได้มากที่สุดความเข้มข้นร้อยละ 3 ของขยะเทศบาล ผลิตมีเทนได้ 114.76 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย คิดเป็นค่าพลังงานความร้อนได้ 418.63 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อวัน และขยะเผาไหม้ได้มีค่า 2,729.62 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อวัน

**คำสำคัญ :** ค่าพลังงานความร้อน; พลังงาน; ขยะมูลฝอยเทศบาล

## Abstract

This research aims to study electrical energy providing from waste by combustible waste and non-combustible waste to solve the problems of municipal solid waste management. Research study includes physical and chemical elements of waste, heat from combustion waste with bomb calorimeter, and the production of methane from non-combustible waste by two-stage anaerobic digestion. The result indicated that waste in Municipality Promlok was an average amount of 3.47 tons per day, with organic waste 41.67 percent by weight, and plastic 25.83 percent by weight. The waste can be classified as the combustible waste, non-combustible, and trash with 43.33, 48.33 and 8.33 by weight of waste, respectively. The composition of combustible waste consisted of moisture (36.94 %w/w), total solids (63.06 %w/w), and volatile solids (19.02 %w/w). Those of non-combustible waste were 77.79 %w/w moisture, and 22.21 %w/w total solids. The non-combustible waste was mixed with methane-producing inoculum for biogas production. The effect of non-combustible waste loading (3, 5, 7, 9, and 11 %w/w) on the performance of hydrogen and methane production via two-stage anaerobic digestion was investigated. Two-stage anaerobic digestion of non-combustible waste of municipality Promlok was found maximum hydrogen, and methane production for 3 (%w/w) substrate loading has the largest concentration of 3 percent municipal waste. The methane production was 114.76 $m^3$-$CH_4$/tonne-VS, with a heating energy potential of 418.63 kWh/day. At the same time, the electric production potential of combustible waste was 2,729.62 kWh/day.

**Keywords:** heating energy; energy; municipal solid waste

## 1. บทนำ

นับตั้งแต่อดีตมาสู่ปัจจุบันปัญหาขยะมูลฝอยนั้นเป็นปัญหาสำคัญที่อยู่คู่กับสังคมไทยมายาวนาน และนับวันยิ่งมีแนวโน้มทวีความรุนแรงมากขึ้น สาเหตุ

เนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณขยะมูลฝอยทุกปี ตามอัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากร การขยายตัวทางเศรษฐกิจ และการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมในการอุปโภคบริโภคของประชาชน ขณะเดียวกันปริมาณขยะมูลฝอยที่ได้รับการจัดการอย่างถูกต้องเพิ่มขึ้นในอัตราที่ต่ำ แม้ว่าองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นซึ่งเป็นหน่วยงานที่มีหน้าที่รับผิดชอบในการบริหารจัดการขยะมูลฝอยทั้งการจัดเก็บ เคลื่อนย้าย รวมทั้งการทำลายจะได้รับการจัดสรรงบประมาณในการก่อสร้างระบบกำจัดขยะมูลฝอยเพิ่มขึ้น [1-4] แต่ก็ยังไม่เพียงพอกับปริมาณขยะมูลฝอยที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกปี ซึ่งในปีพ.ศ. 2555 พบปริมาณขยะชุมชนมีมากถึงประมาณ 24.73 ล้านตัน ในจำนวนนี้สามารถกำจัดได้อย่างถูกต้องตามหลักวิชาการประมาณ 5.83 ล้านตัน และถูกนำกลับไปใช้ประโยชน์ประมาณ 5.28 ล้านตัน มูลฝอยส่วนที่เหลือกว่า 13.62 ล้านตัน ยังคงถูกกำจัดทิ้งอย่างไม่ถูกหลักวิชาการด้วยวิธีการเทกองกลางแจ้งและการเผาในที่โล่ง [2,5,6]

การนำขยะมูลฝอยมาแปรรูปเป็นพลังงานเป็นแนวทางหนึ่งที่จะช่วยแก้ปัญหาการจัดการขยะดังกล่าว โดยเป็นทั้งวิธีการกำจัดขยะมูลฝอยที่ถูกต้องตามหลักสุขาภิบาลและสามารถผลิตพลังงานรูปแบบต่าง ๆ ได้ในคราวเดียวกัน เช่น พลังงานความร้อน พลังงานไฟฟ้า แท่งเชื้อเพลิงจากขยะ ซึ่งจัดเป็นแหล่งพลังงานที่มีศักยภาพภายในประเทศ สามารถนำมาใช้ประโยชน์เพื่อทดแทนการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศ ทั้งนี้ในปัจจุบันการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตพลังงานจากขยะมูลฝอยมีความก้าวหน้าอย่างมาก เช่น การนำความร้อนทิ้งจากการเผาไหม้ขยะกลับมาใช้ใหม่ (waste heat recovery), การผลิตพลังงานจากหลุมฝังกลบขยะมูลฝอยแบบถูกหลักสุขาภิบาล (sanitary landfill gas to energy) ที่เป็นการพัฒนาและปรับปรุงระบบฝังกลบขยะมูลฝอย เพื่อใช้ประโยชน์จากแก๊สมีเทนที่เกิดจากกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic digestion) ซึ่งจัดเป็นแก๊สเรือนกระจก (greenhouse gas) ชนิดหนึ่ง ที่เป็นสาเหตุของสภาวะโลกร้อนในปัจจุบัน วิธีการนี้จึงเป็นการทดแทนพลังงานเชื้อเพลิงและสามารถลดภาวะโลกร้อนได้อีกด้วย นอกจากนี้ยังมีเทคโนโลยีการจัดการขยะมูลฝอยที่มีประสิทธิภาพสูง เช่น การทำให้ขยะปลอดเชื้อโดยใช้ไอน้ำความดันสูง (steam autoclave) การแยกกากสกปรกในรูปของเซลลูโลสไฟเบอร์ ทั้งนี้เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของขยะมูลฝอยให้มีความสม่ำเสมอกลายเป็นขยะเชื้อเพลิง (refuse derived fuel, RDF) ก่อนที่จะนำไปทำเชื้อเพลิงเพื่อเผาไหม้ให้พลังงานความร้อนต่อไป วิธีนี้จะช่วยลดปัญหาความไม่แน่นอนขององค์ประกอบต่าง ๆ ในขยะมูลฝอย ซึ่งมีองค์ประกอบที่ต่างกันไปตามพื้นที่ชุมชนและตามฤดูกาล ทำให้ขยะมีความชื้นลดลง เพิ่มค่า ความร้อนที่ได้เมื่อเผาไหม้ และยังทำให้ง่ายต่อการจัดเก็บ รวมทั้งการขนส่งและการจัดการต่าง ๆ ต่อไป เทคโนโลยีหลักในการนำขยะมูลฝอยมาผลิตพลังงานความร้อนที่ใช้กันอยู่ในประเทศไทยมี 5 วิธี คือ เทคโนโลยีเตาผาขยะ (incineration) เทคโนโลยีการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic digestion, AD) เทคโนโลยีการผลิตแก๊สชีวภาพจากระบบฝังกลบแบบถูกหลักสุขาภิบาล (sanitary landfill gas to energy) เทคโนโลยีขยะเชื้อเพลิงอัดแท่ง (refuse derived fuel, RDF) เทคโนโลยีการผลิตแก๊สชื้อเพลิงจากขยะชุมชน (MSW gasification) [7]

นครศรีธรรมราชถือเป็นจังหวัดใหญ่ที่มีองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น (ยกเว้น อบจ.) ถึง 184 แห่ง ซึ่งการสำรวจข้อมูลปริมาณขยะมูลฝอย พบว่ามีขยะมูลฝอยมากถึง 519.32 ตันต่อวัน หรือคิดเป็น 192,471 ตันต่อปี และมีปริมาณขยะสะสมที่อยู่ในสถานที่กำจัดทั้งหมด 1,218,434 ตัน และในปี พ.ศ. 2560 กรมควบคุมมลพิษจัดอันดับจังหวัดสกปรกที่สุดโดยวัดจาก

2 ปัจจัย คือ ปริมาณขยะสะสมตกค้างกำจัดไม่ถูกต้องและไม่มีการเก็บขยะ ซึ่งจังหวัดนครศรีธรรมราชจัดอยู่ในอับดับที่ 4 ของประเทศไทย ซึ่งมีขยะสะสมอยู่ 1.2 ล้านตัน [5] โดยเบื้องต้นจังหวัดได้จัดเร่งจัดการปัญหาขยะมูลฝอย โดยการปรับปรุงระบบการบริหารจัดการขยะมูลฝอย เพื่อขับเคลื่อนการดำเนินงานตาม roadmap ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น พร้อมทั้งมอบหมายหน่วยงานที่เกี่ยวข้องจัดทำแผนการบริหารจัดการขยะมูลฝอยของจังหวัดอย่างครบวงจร ปัจจุบันจังหวัดนครศรีธรรมราชยังไม่มีระบบกำจัดใด ๆ ขยะถูกนำไปกองไว้ซึ่งปริมาณก็จะเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ สถานที่นำไปกอง คือ บริเวณหมู่ที่ 4 ตำบลนาเคียน อำเภอเมือง จังหวัดนครศรีธรรมราช ติดกับสวนสาธารณะทุ่งท่าลาด มีเนื้อที่ประมาณ 200 ไร่ ใช้พื้นที่ไปแล้ว 60 ไร่ พบว่านอกจากมีขยะจากเทศบาลนครศรีธรรมราชแล้วยังมีขยะจากองค์การบริหารส่วนตำบล (อบต.) อื่น ๆ ที่อยู่ข้างเคียงอีก 50 แห่ง นำมาทิ้งไว้ ซึ่งเทศบาลพรหมโลกก็เป็นอีกเทศบาลหนึ่งที่นำมูลฝอยนำไปทิ้งที่ดังกล่าว โดยคณะผู้วิจัยมองเห็นคุณค่าของมูลฝอยที่สามารถสร้างรายได้ให้กับเทศบาลและเป็นการจัดการขยะได้อีกทางเลือกหนึ่ง

คณะผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาความเป็นไปได้ในการหาค่าพลังงานความร้อนจากขยะผ่านกระบวนการเผาและการหมักแบบไร้อากาศในเขตเทศบาลพรหมโลก อำเภอพรหมคีรี จังหวัดนครศรีธรรมราช แนวทางในการกำจัดมูลฝอยอย่างถูกสุขลักษณะ มีประสิทธิภาพและเป็นอีกทางเลือกของการผลิตพลังงานทดแทน

## 2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาศักยภาพการให้ค่าพลังงานความร้อนจากขยะที่เผาไหม้ได้ และค่าพลังงานความร้อนของการผลิตมีเทนจากขยะเผาไหม้ไม่ได้แบบไร้อากาศสองขั้นตอน

## 3. วิธีการดำเนินการวิจัย

### 3.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางกายภาพของขยะเทศบาล

การคัดแยกองค์ประกอบทางกายภาพของมูลฝอยสามารถแสดงขั้นตอนการแบ่งมูลฝอยเป็น 4 ส่วน (quartering method) หลังจากแยกองค์ประกอบของมูลฝอยทางกายภาพแล้วชั่งน้ำหนักขององค์ประกอบแต่ละประเภท และบันทึกข้อมูลเพื่อนำมาเปรียบเทียบเป็นสัดส่วนขององค์ประกอบของมูลฝอยทั้งหมด ซึ่งแต่ละองค์ประกอบที่ได้มีหน่วยเป็นร้อยละโดยน้ำหนักดังแสดงในรูปที่ 1

### 3.2 การวิเคราะห์หาองค์ประมูลฝอยทางเคมีของขยะเทศบาล

3.2.1 ความชื้น (moisture) เป็นปริมาณความชื้นที่หายไป หลังจากการอบตัวอย่างของแข็งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง มีหน่วยเป็นกรัมต่อกิโลกรัม ดังสมการที่ 1 คือ ค่าความชื้นของขยะ (ร้อยละ) = [(W - D) ÷ W] x 100 เมื่อ W = น้ำหนักของขยะที่เก็บ (กิโลกรัม) และ D = น้ำหนักของขยะหลังอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส (กิโลกรัม)

3.2.2 ปริมาณของแข็งทั้งหมด (total solid, TS) หมายถึง ปริมาณของแข็งที่เป็นส่วนประกอบของมูลฝอยที่คงเหลืออยู่เมื่อไล่น้ำออกไปจนหมด มีหน่วยเป็นกรัมต่อกิโลกรัม ดังสมการที่ 2 คือ ปริมาณของแข็งทั้งหมด (ร้อยละ) = [(น้ำหนักหลังอบ 95 องศาเซลเซียส - น้ำหนักคูซิเบิ้ล) ÷ น้ำหนักตัวอย่าง] x 100

3.2.3 ค่าความร้อน (lower heating value, LHV) จากการเผาไหม้ด้วยเครื่องบอมบ์แคลอรี่มิเตอร์

3.2.4 ปริมาณของแข็งระเหย (volatile solid, VS) หมายถึง องค์ประกอบของมูลฝอยที่เป็นของแข็งระเหยที่สามารถติดไฟได้ โดยปริมาณของแข็งระเหยเป็น

ส่วนหนึ่งของปริมาณของแข็งทั้งหมดของเนื้อมูลฝอยภายหลังที่ไล่ความชื้นออกไป มีหน่วยเป็นกรัมต่อกิโลกรัม ดังสมการที่ 3 คือ ปริมาณของแข็งระเหย (ร้อยละ) = [(น้ำหนักหลังอบ 95 องศาเซลเซียส - น้ำหนักหลังเผา 550 องศาเซลเซียส) ÷ น้ำหนักตัวอย่าง] x 100

**3.3 การออกแบบการทดลองและลักษณะของชุดทดลองการผลิตไฮโดรเจนและมีเทนด้วยระบบการย่อยสลายแบบไร้อากาศสองขั้นตอน**

3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมชุดทดลองสำหรับการผลิตไฮโดรเจนนำขยะที่เผาไหม้ไม่ได้ในอัตราส่วนที่แสดงดังตารางที่ 1 นำไปกวนผสมแล้วบรรจุลงในขวดน้ำเกลือขนาด 500 มิลลิลิตร ไล่อากาศออกด้วยแก๊สไนโตรเจนเป็นเวลา 1-2 นาที แล้วปิดฝาขวดน้ำเกลือให้สนิท เติมกล้าเชื้อสำหรับการผลิตไฮโดรเจน 40 มิลลิลิตร โดยใช้เข็มฉีดยา (syringe) ฉีดลงในขวดน้ำเกลือ แล้วปรับค่าพีเอชให้เป็น 5.5 แล้วนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส โดยใช้ระยะเวลาในการหมักทั้งหมด 17 วัน โดยตรวจวัดองค์ประกอบแก๊สและวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำงานของระบบทุกวัน โดยการเก็บตัวอย่างแก๊สด้วยเข็มฉีดยา แล้วนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบแก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี่ โดยปรับอุณหภูมิ (injector port) 120 องศาเซลเซียส อุณหภูมิของเครื่อง (oven) 40 องศาเซลเซียส ใช้แก๊สอาร์กอนนำพาแก๊ส (carrier gas) และฉีดด้วยเข็มฉีดแก๊ส (gas tight syringe) ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร

3.3.2 ขั้นตอนการเตรียมชุดทดลองเพื่อการผลิตมีเทน ทำได้โดยการผสมกับหัวเชื้อจุลินทรีย์สำหรับการผลิตมีเทนปริมาตร 80 มิลลิลิตร ลงในขวดน้ำเกลือ (ขั้นตอนการผลิตไฮโดรเจน) ขนาด 250 มิลลิลิตร ปรับค่าพีเอชให้เป็น 7 โดยใช้โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ($NaH_2CO_3$) 5 กรัมต่อลิตร นำไปไล่อากาศออกด้วยแก๊สไนโตรเจนเป็นเวลา 1-2 นาที จากนั้นปิดฝาขวดน้ำเกลือแล้วนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส โดยใช้ระยะเวลาในการหมักทั้งหมด 45 วัน ซึ่งในการตรวจวัดองค์ประกอบแก๊สจะตรวจวัดทุก 2-3 วัน โดยการเก็บตัวอย่างแก๊สด้วยเข็มฉีดยา แล้วนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบแก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี่ โดยปรับอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส อุณหภูมิของเครื่อง 40 องศาเซลเซียส ใช้แก๊สอาร์กอนนำพาแก๊ส และฉีดด้วยเข็มฉีดแก๊สปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร

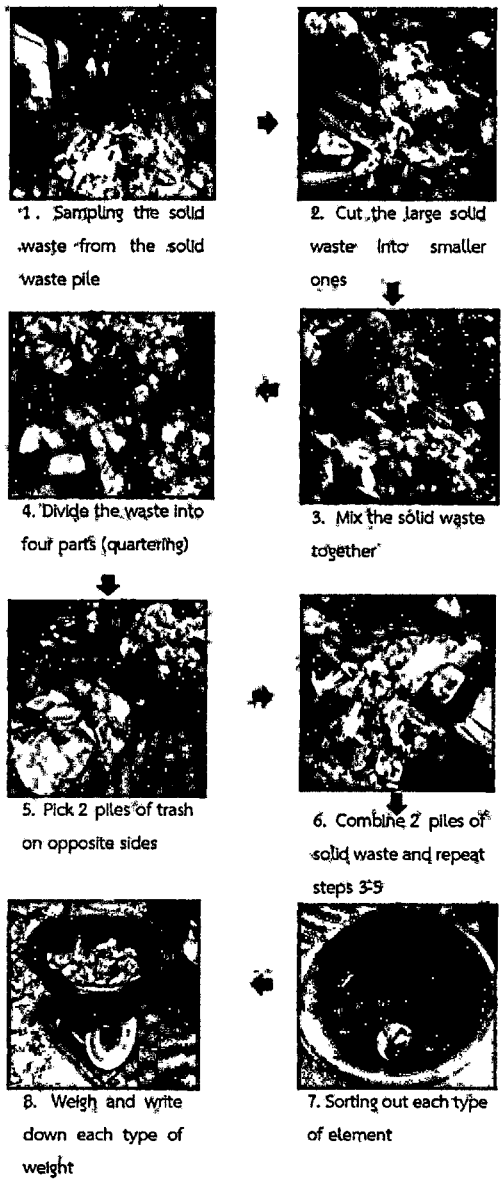


Figure 1 Solid waste sampling procedure

**3.4 ประสิทธิภาพของการผลิตไฮโดรเจนและมีเทนจากขยะเผาไหม้ไม่ได้** ตรวจสอบโดยใช้พารามิเตอร์ที่เป็นดัชนีชี้วัดแสดงดังตารางที่ 2

**Table 1** Experimental design for hydrogen and methane production by using two-stage anaerobic digestion system.

| Experiment | Hydrogen production | | Methane production | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | % Municipal waste | % Inoculum | % Hydrogenic effluent | % Inoculum | Working volume (250 mL) | |
| | | | | | Hydrogenic effluent (mL) | Inoculum (mL) |
| | 3 | 20 | 20 | 80 | 50 | 200 |
| | 5 | 20 | 20 | 80 | 50 | 200 |
| | 7 | 20 | 20 | 80 | 50 | 200 |
| | 9 | 20 | 20 | 80 | 50 | 200 |
| | 11 | 20 | 20 | 80 | 50 | 200 |
| Negative control | % Distilled water | % Inoculum | % Hydrogenic effluent | % Inoculum | Hydrogenic effluent (mL) | Inoculum (mL) |
| | 80 | 20 | 20 | 80 | 50 | 200 |
| Positive control | % Volatile solid | % Inoculum | % Hydrogenic effluent | % Inoculum | Working volume (250 mL) | |
| | | | | | Hydrogenic effluent (mL) | Hydrogenic effluent (mL) |
| | 2 | 100 | 20 | 80 | 50 | 200 |

**Table 2** Analytical methods

| Parameters | Methods | Reference |
|---|---|---|
| Total solid | Baked at 103-105 degrees Celsius | APHA 1998 [6] |
| Volatile solid | Baked at 550 degrees Celsius | |
| Alkalinity | Titration method | |
| Total volatile fatty acid | Titration method | |
| Carbohydrates | Anthrone test | |

## 4. ผลการศึกษา

**4.1 การคัดแยกองค์ประกอบทางกายภาพและเคมีภาพของมูลฝอย**

การศึกษาองค์ประกอบทางกายภาพของขยะมูลฝอยเทศบาลแบ่งเป็น 3 ส่วน คือ การศึกษาองค์ประกอบทางกายภาพของขยะเทศบาล การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของขยะที่เผาไหม้ได้ และการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของขยะที่เผาไหม้ไม่ได้ โดยการศึกษาองค์ประกอบทางกายภาพดังในตารางที่ 3

การวิเคราะห์องค์ประกอบของขยะจากเทศบาลพรหมโลก พบว่าองค์ประกอบทางกายภาพของขยะที่พบมากสุด คือ ผัก ผลไม้ เศษอาหาร รองลงมา คือ พลาสติก และกระดาษ ร้อยละโดยน้ำหนักเฉลี่ย 41.23, 25.27, 8.57 ตามลำดับ นอกจากนี้พบขยะประเภทอื่น ๆ เช่น เสื้อผ้า ไม้ ยาง แก้ว โลหะ หิน กระเบื้อง กระดูก โฟม ฯลฯ แบ่งเป็นขยะที่เผาไหม้ได้ ขยะที่เผาไหม้ไม่ได้ และขยะคัดทิ้ง มีค่าร้อยละโดยน้ำหนักเฉลี่ย 43.33, 48.33 และ 8.33 ตามลำดับ (ตารางที่ 4)

**Table 3** Compositions of municipal waste

| Compositions of municipal waste* | % by weight/day | | | | | | | Averages | S.D. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | | |
| Fruit and vegetable | 41.67 | 41.55 | 41.34 | 41.68 | 41.78 | 39.98 | 40.59 | 41.23 | 0.68 |
| Paper | 8.33 | 8.56 | 8.39 | 8.75 | 9.00 | 8.52 | 8.44 | 8.57 | 0.23 |
| Plastic | 25.83 | 24.98 | 24.32 | 24.51 | 25.30 | 26.11 | 25.87 | 25.27 | 0.70 |
| Clothing | 5.00 | 4.69 | 4.99 | 5.23 | 4.66 | 5.10 | 5.29 | 4.99 | 0.24 |
| Wood | 6.67 | 6.67 | 7.30 | 6.50 | 6.45 | 7.02 | 6.45 | 6.72 | 0.32 |
| Rubber | 0.83 | 0.85 | 0.65 | 0.95 | 0.87 | 0.93 | 0.83 | 0.84 | 0.10 |
| Leather | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Glass | 3.33 | 3.55 | 3.62 | 3.49 | 3.45 | 3.65 | 3.60 | 3.53 | 0.11 |
| Metal | 2.50 | 2.37 | 2.65 | 2.78 | 2.25 | 2.98 | 2.45 | 2.57 | 0.25 |
| Stone and bone tile | 2.50 | 2.60 | 2.50 | 2.45 | 2.12 | 2.31 | 2.65 | 2.45 | 0.18 |
| Foam | 3.33 | 3.56 | 3.54 | 3.30 | 3.98 | 3.28 | 3.77 | 3.54 | 0.26 |
| Total percentage | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 0.00 |

**Table 4** Characteristics of combustible waste and non-combustible waste

| Parameters | Concentration (%w/w) | |
|---|---|---|
| | Combustible waste | Non-combustible waste |
| Moisture | 36.94 | 77.79 |
| Total solid | 63.06 | 22.21 |
| Volatile solid | 19.02 | - |

การวิเคราะห์องค์ประกอบของขยะที่เผาไหม้ได้ประกอบด้วยกระดาษ พลาสติก เสื้อผ้า ไม้ ยาง หนัง และโฟมเป็นองค์ประกอบหลัก มีค่าความชื้น (moisture) ร้อยละ 36.94 โดยน้ำหนัก ของแข็งทั้งหมด (total solid, TS) ร้อยละ 63.06 โดยน้ำหนัก ของแข็งระเหยทั้งหมด (volatile solid, VS) ร้อยละ 19.02 โดยน้ำหนัก ขยะที่เผาไหม้ได้เหมาะสมต่อการนำไปหาค่าพลังงานความร้อนด้วยเครื่องบอมบ์แคลอรี่มิเตอร์ (Bomb calorimeter) เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของขยะที่เผาไหม้ไม่ได้ประกอบด้วยผัก ผลไม้เศษอาหาร และไม้เป็นองค์ประกอบหลัก โดยมีค่าความชื้นร้อยละ 77.79 โดยน้ำหนัก ค่าของแข็งทั้งหมดร้อยละ 22.21 โดยน้ำหนัก ขยะเผาไหม้ไม่ได้เหมาะสมต่อนำไปผลิตแก๊สมีเทนย่อยสลายแบบไร้อากาศสองขั้นตอน

**4.2 ศักยภาพการให้พลังงานความร้อนของขยะที่เผาไหม้ไม่ได้**

4.2.1 ศักยภาพการผลิตไฮโดรเจนจากขยะ

เผาไหม้ไม่ได้

การผลิตไฮโดรเจนจากขยะที่เผาไหม้ไม่ได้โดยการย่อยสลายแบบไร้อากาศ โดยใช้เชื้อผสมที่แยกจากน้ำเสียโรงงานปาล์มน้ำมันในกระบวนการผลิตไฮโดรเจน (ขั้นตอนที่ 1) เมื่อดำเนินการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ระยะเวลา 10 วัน พบว่าความเข้มข้นร้อยละ 11 ของขยะเทศบาลมีค่าไบโอแก๊สสะสมสูงสุด รองลงมาความเข้มข้นร้อยละ 9 ของขยะเทศบาล ความเข้มข้นร้อยละ 3 ของขยะเทศบาล มีค่าไบโอแก๊สสะสมน้อยที่สุด คือ 56.36, 50.69, 32.98 มิลลิลิตร ตามลำดับ นอกจากนี้อัตราการผลิตไฮโดรเจน พบว่าความเข้มข้นร้อยละ 3 ของขยะเทศบาลมีปริมาณการผลิตไฮโดรเจนสูงสุด รองลงมาความเข้มข้นร้อยละ 5 ของขยะเทศบาล และความเข้มข้นร้อยละ 11 ของขยะเทศบาลน้อยที่สุด คือ 15.60, 83.46, 53.88 มิลลิกรัมไฮโดรเจนต่อกรัมของแข็งระเหย ตามลำดับ (ตารางที่ 5)

นอกจากนี้ได้วิเคราะห์องค์ประกอบของตัวอย่างหลังจากการผลิตไฮโดรเจน วิเคราะห์ค่าพีเอชก่อน-หลัง ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหย แอลคาไลน์ คาร์โบไฮเดรต และกรดไขมันระเหย โดยการควบคุมค่าพีเอชในระบบการหมักไฮโดรเจนจากขยะที่เผาไหม้ไม่ได้ มีค่าพีเอชก่อนหมักเป็น 5.80-5.99 ความเข้มข้นร้อยละ 3 ของขยะเทศบาล มีค่าพีเอชสูงสุด 5.99 รองลงมาความเข้มข้นร้อยละ 5 ของขยะเทศบาล มีค่าพีเอช 5.98 และ

**Table 5** Hydrogen production potential of non-combustible waste

| % Municipal waste | Production | Time (day) | | | | | | | | | | pH fermentation $H_2$ process | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | Before | After |
| 3 | Bio-gas (mL) | 0.55 | 4.82 | 10.02 | 15.09 | 19.69 | 27.53 | 28.52 | 29.85 | 31.33 | 32.98 | 5.99 | 6.98 |
| | Hydrogen ($mgH_2/gVS$) | 1.93 | 16.88 | 35.13 | 52.88 | 69.00 | 96.50 | 99.94 | 104.61 | 109.82 | 115.59 | | |
| 5 | Bio-gas (mL) | 0.01 | 5.05 | 12.68 | 19.78 | 25.91 | 34.24 | 35.22 | 36.65 | 38.04 | 39.69 | 5.98 | 6.38 |
| | Hydrogen ($mgH_2/gVS$) | 0.02 | 10.61 | 26.66 | 41.58 | 54.49 | 72.01 | 74.07 | 76.87 | 80.00 | 83.46 | | |
| 7 | Bio-gas (mL) | 0.00 | 4.52 | 12.93 | 20.09 | 26.67 | 34.33 | 40.64 | 42.37 | 44.30 | 46.44 | 5.88 | 6.41 |
| | Hydrogen ($mgH_2/gVS$) | 0.00 | 6.78 | 19.42 | 30.17 | 39.90 | 51.56 | 61.04 | 63.67 | 66.55 | 69.76 | | |
| 9 | Bio-gas (mL) | 0.00 | 3.98 | 12.27 | 19.70 | 26.06 | 31.70 | 36.60 | 43.26 | 50.69 | 50.69 | 5.87 | 5.99 |
| | Hydrogen ($mgH_2/gVS$) | 0.00 | 4.58 | 14.33 | 23.02 | 30.44 | 37.03 | 42.76 | 50.53 | 59.22 | 59.22 | | |
| 11 | Bio-gas (mL) | 0.00 | 4.77 | 14.55 | 23.91 | 31.48 | 37.12 | 42.27 | 48.92 | 56.36 | 56.36 | 5.80 | 5.89 |
| | Hydrogen ($mgH_2/gVS$) | 0.00 | 4.55 | 13.90 | 22.85 | 30.09 | 35.48 | 40.40 | 46.76 | 53.87 | 53.87 | | |

| % Municipal waste | Total solid (g/kg) | Volatile solid (g/kg) | Alkaline ($mgCaCO_3^{2-}/L$) | Carbohydrate (g/L) | Volatile fatty acids (mg/L) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | Acetic | Propionic | Iso butyric | Butyric | Isovaleric | Valeric |
| 3 | 2.03 | 1.88 | 2013.00 | 851.26 | 496.69 | 83.07 | 18.52 | 660.91 | 43.08 | 19.01 |
| 5 | 4.04 | 3.57 | 3158.00 | 760.58 | 207.39 | 42.28 | 7.36 | 242.46 | 6.32 | 6.72 |
| 7 | 5.41 | 4.47 | 3485.00 | 753.00 | 174.36 | 36.74 | 6.57 | 208.12 | 6.39 | 4.95 |
| 9 | 5.92 | 4.91 | 4696.00 | 958.15 | 180.08 | 37.53 | 4.56 | 208.65 | 4.10 | 5.24 |
| 11 | 5.51 | 4.46 | 4598.00 | 736.69 | 211.61 | 45.40 | 7.08 | 243.77 | 5.61 | 6.12 |

ความเข้มข้นร้อยละ 11 ของขยะเทศบาล มีค่าพีเอชน้อยที่สุด 5.80 หลังจากสิ้นสุดกระบวนการผลิตไฮโดรเจน พบว่ามีค่าพีเอชเพิ่มขึ้นเป็น 5.89-6.98 ความเข้มข้นร้อยละ 3 ของขยะเทศบาล มีค่าพีเอชสูงสุด 6.98 รองลงมาความเข้มข้นร้อยละ 7 ของขยะเทศบาล มีค่าพีเอช 6.41 และความเข้มข้นร้อยละ 11 ของขยะเทศบาล มีค่าพีเอชน้อยที่สุด คือ 5.89 (ตารางที่ 5)

ค่าของแข็งทั้งหมด (total solid, TS) มีค่า 2.03-5.92 กรัมต่อกิโลกรัม ความเข้มข้นร้อยละ 9 ของขยะเทศบาล มีค่าของแข็งทั้งหมดสูงสุด 5.92 กรัมต่อกิโลกรัม รองลงมาความเข้มข้นร้อยละ 11 ของขยะเทศบาล มีค่า 5.51 กรัมต่อกิโลกรัม และความเข้มข้นร้อยละ 3 ของขยะเทศบาล มีค่าน้อยที่สุด 2.03 กรัมต่อกิโลกรัม ค่าของแข็งระเหย (volatile solid) มีค่า 1.88-4.91 กรัมต่อกิโลกรัม ความเข้มข้นร้อยละ 9 ของขยะเทศบาล มีค่ามากที่สุด 4.91 กรัมต่อกิโลกรัม รองลงมาความเข้มข้นร้อยละ 7 ของขยะเทศบาล มีค่า 4.47 กรัมต่อกิโลกรัม และความเข้มข้นร้อยละ 3 ของขยะเทศบาล มีค่าน้อยที่สุด คือ 1.88 กรัมต่อกิโลกรัม (ตารางที่ 5)

4.2.2 ศักยภาพการผลิตมีเทนจากน้ำทิ้งหลังการผลิตไฮโดรเจนโดยกลุ่มจุลินทรีย์แบบไร้อากาศ

การศึกษาการผลิตมีเทนด้วยกระบวนการย่อยสลายไร้อากาศสองขั้นตอน การผลิตมีเทนเป็นขั้นตอนที่ 2 โดยเอาสารตั้งต้นจากขั้นตอนการผลิตไฮโดรเจน (ขั้นตอนที่ 1) มาปรับค่าพีเอชด้วยโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) ให้ได้ 7.0-8.0 แล้วเติมเชื้อผสมสำหรับการผลิตมีเทนลงในชุดการทดลองร้อยละ 80:20 ศึกษาที่อุณหภูมิห้อง ระยะเวลา 45 วัน ตรวจวัดปริมาตรไบโอแก๊สโดยใช้หลักการแทนที่ด้วยน้ำ และตรวจวัดองค์ประกอบของแก๊สโดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี่เพื่อวัดปริมาณการเกิดมีเทน

การผลิตมีเทนด้วยกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศสองขั้นตอนโดยใช้สารตั้งต้นที่เป็นขยะเผาไหม้ไม่ได้ เริ่มมีปริมาณไบโอแก๊สเริ่มมีตั้งแต่วันแรกและเพิ่มสูงสุดในช่วงวันที่ 6 มีปริมาณไบโอแก๊ส 142 มิลลิลิตร ปริมาณไบโอแก๊สสะสมสูงสุด 1,640 มิลลิลิตร ที่ความเข้มข้นร้อยละ 11 ของขยะเทศบาล รองลงมาความเข้มข้นร้อยละ 9 ของขยะเทศบาล มีปริมาณไบโอแก๊สสะสม 1,370 มิลลิลิตร และความเข้มข้นร้อยละ 3 ของขยะเทศบาล มีปริมาณไบโอแก๊สสะสมน้อยที่สุด 799 มิลลิลิตร (ตารางที่ 6)

ผลผลิตมีเทนทั้งหมดอยู่ในช่วง 38.90-114.76 มิลลิลิตรมีเทนต่อกรัมของแข็งระเหย ระดับความเข้มข้นร้อยละ 3 ของขยะเทศบาล มีผลผลิตมีเทนสูงสุด 114.76 มิลลิลิตรมีเทนต่อกรัมของแข็งระเหย รองลงมาความเข้มข้นร้อยละ 5 ของขยะเทศบาล 97.53 มิลลิลิตรมีเทนต่อกรัมของแข็งระเหย และความเข้มข้นร้อยละ 11 ของขยะเทศบาล ให้ผลผลิตมีเทนน้อยที่สุด 38.90 มิลลิลิตรมีเทนต่อกรัมของแข็งระเหย (ตารางที่ 6)

การวิเคราะห์ค่าพีเอชของตัวอย่างหลังจากการผลิตมีเทนจากขยะที่เผาไหม้ไม่ได้ มีค่าพีเอชก่อนหมัก 5.89-6.69 ความเข้มข้นร้อยละ 3 ของขยะเทศบาล มีค่าพีเอชสูงสุด 6.69 รองลงมาความเข้มข้นร้อยละ 7 ของขยะเทศบาล มีค่าพีเอช 6.41 และระดับความเข้มข้นร้อยละ 11 ของขยะเทศบาล มีค่าพีเอชน้อยที่สุด คือ 5.89 หลังจากสิ้นสุดกระบวนการหมักมีเทน พบว่าค่าพีเอชเพิ่มขึ้นเป็น 7.43-7.76 ความร้อยละ 3 ของขยะเทศบาล มีพีเอชสูงสุด 7.76 รองลงมาความเข้มข้นร้อยละ 5 ของขยะเทศบาล มีพีเอช 7.60 และความเข้มข้นร้อยละ 11 ของขยะเทศบาล มีพีเอชน้อยที่สุด คือ 7.43 ค่าของแข็งทั้งหมด (total solid, TS) มีค่า 0.05-0.06 กรัมต่อกิโลกรัม ความเข้มข้นร้อยละ 5 ของขยะเทศบาล มีค่าสูงสุด คือ 0.06 กรัมต่อกิโลกรัมความเข้มข้นร้อยละ 3, 7, 9 และ 11 ของขยะเทศบาล มีค่าเท่ากัน คือ 0.05 กรัมต่อกิโลกรัม ค่าของแข็งระเหย (volatile solid) มีค่า

2.69-3.29 กรัมต่อกิโลกรัม ความเข้มข้นร้อยละ 5 ของขยะเทศบาล มีค่ามากที่สุด คือ 3.33 กรัมต่อกิโลกรัม รองลงมาความเข้มข้นร้อยละ 3 ของขยะเทศบาล มีค่า 3.29 กรัมต่อกิโลกรัม และความเข้มข้นร้อยละ 11 ของขยะเทศบาล มีค่าน้อยที่สุด คือ 2.69 กรัมต่อกิโลกรัม ค่าแอลคาไลน์ (alkaline) มีค่า 13,857-15,323 มิลลิกรัมคาร์บอเนตต่อลิตร ความเข้มข้นร้อยละ 11 ของขยะเทศบาล มีค่ามากที่สุด คือ 15,323 มิลลิกรัมคาร์บอเนตต่อลิตร รองลงมาความเข้มข้นร้อยละ 3 และ 5 ของขยะเทศบาล มีค่าเท่ากัน คือ 14,358 มิลลิกรัมคาร์บอเนตต่อลิตร และความเข้มข้นร้อยละ 7 ของขยะเทศบาล มีค่าน้อยที่สุด คือ 13,857 มิลลิกรัมคาร์บอเนตต่อลิตร (ตารางที่ 6) ค่าคาร์โบไฮเดรต (carbohydrate) มีค่า 1,421.09-1,706.00 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้นร้อยละ 11 ของขยะเทศบาล มีค่าสูงสุด คือ 1,706.00 กรัมต่อลิตร รองลงมาความเข้มข้นร้อยละ 3 ของขยะเทศบาล มีค่า 1,685.57 กรัมต่อลิตร และความเข้มข้นร้อยละ 7 ของขยะเทศบาล มีค่าน้อยที่สุด คือ 1,421.09 กรัมต่อลิตร การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการผลิตมีเทนด้วยระบบการย่อยสลายแบบไร้อากาศสองขั้นตอน พบว่าความเข้มข้นร้อยละ 3, 5, 7, 9 และ 11 ของขยะเทศบาล หลังจากการผลิตไฮโดรเจนและมีเทนแบบไร้อากาศสองขั้นตอน ระบบมีความสามารถในการกำจัดของแข็งทั้งหมดและคาร์โบไฮเดรตจากกระบวนการผลิตมีเทนด้วยการย่อยสลายแบบไร้อากาศสองขั้นตอน (two-stage anaerobic digestion) ความเข้มข้นร้อยละ 3 ของขยะเทศบาลมีค่าการผลิตมีเทนมากที่สุด คือ 114.76 ลูกบาศก์เมตรต่อตันของแข็งระเหยง่าย มีศักยภาพการให้พลังงานความร้อน 462.70 กิโลวัตต์ต่อตันของแข็งระเหย รองลงมาความเข้มข้นร้อยละ 5 ของขยะเทศบาลมีค่าการผลิตมีเทน 97.53 ลูกบาศก์เมตรต่อตันของแข็งระเหย มีศักยภาพการให้พลังงานความร้อน 393.20 กิโลวัตต์ต่อตันของแข็งระเหย และความเข้มข้นร้อยละ 11 ของขยะเทศบาลมีค่าการผลิตมีเทนมากที่สุด คือ 38.90 ลูกบาศก์เมตรต่อตันของแข็งระเหย มีศักยภาพการให้พลังงานความร้อน 156.80 กิโลวัตต์ต่อตันของแข็งระเหย (ตารางที่ 7)

**4.3 ศักยภาพการให้พลังงานความร้อนของขยะที่เผาไหม้ได้**

นำขยะที่เผาไหม้ได้ของเทศบาลพรหมโลกมาหาค่าพลังงานความร้อนด้วยเครื่องบอมบ์แคลอรี่มิเตอร์ รุ่นซี 2000 เบสิค (C2000 Basic) ด้วยหลักการไดเร็คท์ แคลอรี่มิเตอร์ (direct calorimetry) ระบบ

**Table 7** Methane and heating energy production of non-combustible waste by using two-state anaerobic digestion system.

| % Municipal waste | $CH_4$ ($m^3$/tonne-volatile solid) | Heating energy production (kWh per tonne of volatile solid) | Heating energy production (kWh per tonne of volatile solid : Efficiency 40 %) |
|---|---|---|---|
| 3 | 114.76 | 1,156.80 | 462.70 |
| 5 | 97.53 | 983.10 | 393.20 |
| 7 | 82.46 | 831.20 | 332.50 |
| 9 | 85.23 | 859.10 | 343.60 |
| 11 | 38.90 | 392.10 | 156.80 |

Table 6 Methane production potential of non-combustible waste

| % Municipal waste | Production | Time (day) | | | | | | | | | | pH fermentation CH4 process | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | Before | After |
| 3 | Bio-gas cumulative $CH_4$ (mL) | 3.58 | 52.09 | 95.25 | 127.65 | 156.25 | 183.73 | 209.26 | 240.64 | 268.04 | 294.82 | 6.69 | 7.76 |
| | Cumulative $CH_4$ yield (mL/gvs) | 1.39 | 20.28 | 37.07 | 49.69 | 60.82 | 71.52 | 81.45 | 93.67 | 104.33 | 114.76 | | |
| 5 | Bio-gas cumulative $CH_4$ (mL) | 5.28 | 101.83 | 183.55 | 226.25 | 259.30 | 291.03 | 321.10 | 358.40 | 389.63 | 417.61 | 6.38 | 7.6 |
| | Cumulative $CH_4$ yield (mL/gvs) | 1.23 | 23.78 | 42.87 | 52.84 | 60.56 | 67.97 | 74.99 | 83.70 | 91.00 | 97.53 | | |
| 7 | Bio-gas cumulative $CH_4$ (mL) | 5.99 | 119.89 | 220.37 | 271.76 | 311.33 | 348.44 | 382.79 | 425.34 | 462.51 | 494.30 | 6.41 | 7.49 |
| | Cumulative $CH_4$ yield (mL/gvs) | 1.00 | 20.00 | 36.76 | 45.33 | 51.94 | 58.13 | 63.86 | 70.95 | 77.16 | 82.46 | | |
| 9 | Bio-gas cumulative $CH_4$ (mL) | 7.05 | 172.26 | 349.00 | 418.32 | 462.34 | 502.36 | 539.25 | 584.95 | 623.45 | 656.86 | 5.99 | 7.45 |
| | Cumulative $CH_4$ yield (mL/gvs) | 0.91 | 22.35 | 45.28 | 54.28 | 59.99 | 65.18 | 69.97 | 75.90 | 80.89 | 85.23 | | |
| 11 | Bio-gas cumulative $CH_4$ (mL) | 7.06 | 178.79 | 447.77 | 545.06 | 599.87 | 646.49 | 686.11 | 733.03 | 776.31 | 813.96 | 5.89 | 7.43 |
| | Cumulative $CH_4$ yield (mL/gvs) | 0.34 | 8.55 | 21.40 | 26.05 | 28.67 | 30.90 | 32.79 | 35.04 | 37.10 | 38.90 | | |

| % Municipal waste | Total solid (g/kg) | Volatile solid (g/kg) | Alkaline (mgCaCo3/L) | Carbohydrate (g/L) | Total volatile fatty acids (mg/L) |
|---|---|---|---|---|---|
| 3 | 0.05 | 3.29 | 14,358.00 | 1,685.57 | 1,321.28 |
| 5 | 0.06 | 3.33 | 14,358.00 | 1,541.71 | 512.54 |
| 7 | 0.05 | 3.06 | 13,857.00 | 1,421.09 | 437.14 |
| 9 | 0.05 | 3.04 | 14,357.00 | 1,429.55 | 440.16 |
| 11 | 0.05 | 2.69 | 15,323.00 | 1,706.00 | 519.60 |

โหมดไอโซเปอร์ริโบลิคที่ 25 องศาเซลเซียส (isoperibolic at 25 degree Celsius) โดยนำเอาตัวอย่างมาอัดเม็ด น้ำหนักไม่เกิน 1 กรัม เผาเพื่อค่าพลังงานความร้อน พบว่าขยะเผาไหม้ได้สามารถให้พลังงาน 6.61 เมกะจูลต่อกิโลกรัม หรือ 1.84 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อกิโลกรัม

**4.4 ศักยภาพการให้พลังงานความร้อนของเทศบาลพรหมโลก**

ข้อมูลสำนักงานกำจัดขยะเทศบาลในจังหวัดนครศรีธรรมราช พบว่าเทศบาลพรหมโลกมีการนำขยะไปทิ้งสถานที่บ่อฝังกลบของเทศบาลนครศรีธรรมราช บริเวณหมู่ที่ 4 ตำบลนาเคียน อำเภอเมือง จังหวัดนครศรีธรรมราช ติดกับสวนสาธารณะสมเด็จพระศรีนครินทร์ 84 (ทุ่งท่าลาด) ในปี พ.ศ. 2555-2559 เทศบาลพรหมโลกนำขยะไปทิ้งทั้งหมด 5,727,132 กิโลกรัม แบ่งเป็นขยะเผาไหม้ได้ 2,707,360 กิโลกรัม สามารถผลิตเป็นพลังงานความร้อน 5,010,782 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี ขยะเผาไหม้ไม่ได้ 3,019,772 กิโลกรัม สามารถผลิตเป็นพลังงานความร้อน 768,507 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี (ตารางที่ 8)

**Table 8** Potential of heating energy production from non-combustible waste and combustible waste of Promlok Municipality

| Year | The amount of non-combustible waste (kg/year) | $CH_4$ ($m^3$ $CH_4$ /year) | Heating energy production (MJ/year) | Heating energy production (kWh/year) |
|---|---|---|---|---|
| 2555 | 603,615.12 | 15,239.59 | 548,625.30 | 153,615.08 |
| 2556 | 566,703.08 | 14,307.67 | 515,075.98 | 144,221.27 |
| 2557 | 613,240.04 | 15,482.59 | 557,373.38 | 156,064.55 |
| 2558 | 620,707.02 | 15,671.11 | 564,160.11 | 157,964.83 |
| 2559 | 615,506.72 | 15,539.82 | 559,433.57 | 156,641.40 |
| Total | 3,019,771.98 | 76,240.79 | 2,744,668.34 | 768,507.13 |

| Year | The amount of combustible waste (kg/year) | Heating energy production | |
|---|---|---|---|
| | | MJ/year | kWh/year |
| 2555 | 541,167.87 | 3,577,119.62 | 1,001,593.49 |
| 2556 | 508,074.58 | 3,358,372.97 | 940,344.43 |
| 2557 | 549,797.04 | 3,634,158.43 | 1,017,564.36 |
| 2558 | 556,491.52 | 3,678,408.95 | 1,029,954.51 |
| 2559 | 551,829.22 | 3,647,591.14 | 1,021,325.52 |
| Total | 2,707,360.23 | 17,895,651.12 | 5,010,782.31 |

* 1 Megajoules to Kilowatt-hours = 0.2778; * Energy content 36 MJ/$m^3$ $CH_4$ [16]

เมื่อเฉลี่ยปริมาณขยะรายวันมีปริมาณ 3,138.16 กิโลกรัมต่อวัน แบ่งเป็นขยะเผาไหม้ไม่ได้ 1,654.67 กิโลกรัมต่อวัน ขยะที่เผาไหม้ได้ 1,483.49 กิโลกรัมต่อวัน ขยะเผาไหม้ไม่ได้สามารถผลิตเป็นมีเทน 0.115 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย มีศักยภาพพลังงานความร้อน 418.63 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อวัน ขยะเผาไหม้ได้สามารถผลิตเป็นพลังงานความร้อน 2,729.62 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อวัน

## 5. สรุปและอภิปราย

### 5.1 การคัดแยกองค์ประกอบทางกายภาพและเคมีภาพของมูลฝอย

ศักยภาพการให้พลังงานความร้อนจากขยะเทศบาลพรหมโลก โดยศึกษาองค์ประกอบของขยะทางกายภาพ พบว่าส่วนใหญ่ขยะมูลฝอยประกอบด้วย ผัก ผลไม้ และเศษอาหารมากที่สุดร้อยละ 41.23 โดยน้ำหนักขยะ รองลงมา คือ พลาสติกร้อยละ 25.27 โดยน้ำหนักขยะ พื้นที่ส่วนใหญ่เป็นเกษตรกรรม ประชากรประกอบอาชีพการเกษตร ทำสวน เพาะปลูก ในย่านชุมชนใช้พื้นที่ประกอบธุรกิจการค้า เช่น ร้านอาหาร ตลาด ร้านขายวัสดุก่อสร้าง และที่อยู่อาศัย โดยมีปริมาณขยะเผาไหม้ได้ร้อยละ 43.33 โดยน้ำหนักขยะ มีปริมาณขยะขยะเผาไหม้ไม่ได้ร้อยละ 48.33 โดยน้ำหนักขยะ และขยะคัดทิ้งร้อยละ 8.33 โดยน้ำหนัก

ขยะ เมื่อวิเคราะห์องค์ ประกอบทางเคมีขยะที่เผาไหม้ได้ มีความชื้นร้อยละ 36.94 โดยน้ำหนัก มีปริมาณของแข็งทั้งหมดร้อยละ 63.06 โดยน้ำหนัก ปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมด ร้อยละ 19.02 โดยน้ำหนัก ส่วนองค์ประกอบของขยะที่เผาไหม้ไม่ได้ มีความชื้นร้อยละ 77.79 โดยน้ำหนัก มีปริมาณของแข็งทั้งหมดร้อยละ 22.21 โดยน้ำหนัก สอดคล้องกับงานวิจัยของ กรกมล และวิทยา [8] ที่ศึกษาปริมาณขยะเทศบาลนนทบุรี จังหวัดนนทบุรี พบว่ามีปริมาณเศษอาหารมากที่สุดร้อยละ 48.34 รองลงมาพบขยะพลาสติกร้อยละ 31.66 โดยน้ำหนักขยะ เช่นเดียวกับ ทิพย์สุภินทร์ [9] ที่ศึกษาสมบัติขยะมูลฝอยในประเทศไทย พบมีเศษอาหารมากที่สุด ร้อยละ 63.57 รองลงมา คือ พลาสติกร้อยละ 16.83 มีความชื้นร้อยละ 50-60 เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Mboowa [10] ที่ศึกษาการกำหนดศักยภาพเชิงคุณภาพและแก๊สมีเทนจากขยะมูลฝอยชุมชนใน แดนเบต ประเทศอินเดีย โดยหาค่าพลังงานจากหลุมฝังกลบ 3 แห่ง ในช่วงฤดูร้อน มีอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส และฤดูใบไม้ร่วงอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส พบปริมาณขยะอินทรีย์ในจุดที่ 1 ร้อยละ 92 รองลงมา คือ จุดที่ 2 พบขยะอินทรีย์ร้อยละ 69 และจุดที่ 3 พบขยะอินทรีย์ร้อยละ 64 เนื่องจากจุดที่ 1 มีสถานประกอบการเกี่ยวกับบริโภคอาหารและกิจกรรมทางสังคมที่สถานีรถไฟฟ้ามีร้านอาหารจำนวนมาก มีการทำเกษตรอินทรีย์ จุด 2 และ 3 ซึ่งอยู่ในพื้นที่ที่มีประชากรเบาบางและมีน้อยมากที่นำไปสู่ขยะอินทรีย์ โลหะ กระดาษ แก้ว สิ่งทอ เครื่องหนัง และอื่น ๆ มีเศษเล็กเศษน้อย พบความชื้นร้อยละ 25.49, 3.40 และ 2.96 ของขยะ

**5.2 ศักยภาพการให้พลังงานความร้อนของขยะที่เผาไหม้ไม่ได้**

การผลิตไฮโดรเจนที่ได้จากการหมักขยะร่วมกับกล้าเชื้อจุลินทรีย์จากน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบความเข้มข้นร้อยละ 3, 5, 7, 9 และ 11 ของขยะเทศบาล สามารถผลิตมีเทน 114.76, 97.53, 82.46, 85.23 และ 38.90 มิลลิกรัมมีเทนต่อกรัมของแข็งระเหย ความเข้มข้นร้อยละ 3 ของขยะเทศบาลผลิตมีเทนได้มากที่สุด สอดคล้องกับงานวิจัยของ พีระวัฒน์ และคณะ [11] ที่ศึกษาการผลิตไฮโดรเจนจะมีเทนจากน้ำทิ้งจากกระบวนการแปรรูปแป้งด้วยการย่อยสองขั้นตอนที่อุณหภูมิสูงที่ความเข้มข้นต่างกัน (5, 10 และ15 กรัมต่อลิตร) การผลิตไฮโดรเจนจากแป้งมันสำปะหลังที่ความเข้มข้น 5 กรัมต่อลิตร ให้ผลผลิตไฮโดรเจนมากที่สุด รองลงมา คือ แป้งมันสำปะหลังที่ความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร แป้งข้าวที่ความเข้มข้น 15 กรัมต่อลิตร เช่นเดียวกับงานวิจัยของ ปุริม และคณะ [12] ที่ศึกษาผลของค่าอัตราการป้อนสารอินทรีย์และชนิดสารยับยั้งที่มีต่อการผลิตแก๊สมีเทนจากเศษอาหารด้วยถังหมักแบบไร้อากาศชนิด 2 ขั้นตอน ด้วยอัตราการป้อนสารอินทรีย์ 3 ค่า คือ 2,500, 5,000 และ 10,000 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตรต่อวัน พบว่าอัตราการป้อนสารอินทรีย์ 5,000 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตรต่อวัน ระบบมีอัตราการเกิดแก๊สมีเทนสูงสุด 1.50 กรัมต่อวัน สูงกว่ากรณีอื่น ชี้ให้เห็นว่าอัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นไม่ได้ทำให้อัตราการเกิดแก๊สมีเทนเพิ่มขึ้นเสมอไป เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของสารยับยั้งกับอัตราการเกิดแก๊สมีเทน สันนิษฐานได้ว่าอัตราการเกิดแก๊สมีเทนที่ลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์นั้นอาจเป็นผลมาจากการเพิ่มปริมาณของซัลเฟตเป็นสารยับยั้งชนิดหนึ่งในระบบ โดยขัดแย้งกันงานวิจัยของ Shi และ Li [13] ที่ศึกษาศักยภาพการผลิตมีเทนจากการหมักแบบไร้อากาศของเสียจากกการทำสวนและเศษอาหารที่อัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อ 1, 2 และ 3 โดยมีการเติมเศษอาหารร้อยละ 0, 10 และ 20 บนพื้นฐานของของแข็งระเหยได้ พบว่าผลได้มีเทนและผลผลิตมีเทนเพิ่มขึ้นเมื่อเติม

เติมเศษอาหารร้อยละ 10 และ 20

งานวิจัยนี้ควบคุมอุณหภูมิห้องในการผลิตมีเทนแบบไร้อากาศสองขั้นตอนที่อุณหภูมิห้องมีค่า 25-38 องศาเซลเซียส สอดคล้องกับงานวิจัยของ อังคณา และคณะ [14] ที่ศึกษาผลของอุณหภูมิและการรับภาระสารอินทรีย์ต่อศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทนของน้ำทิ้งหลังการผลิตไฮโดรเจนภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูง (60 องศาเซลเซียส) และอุณหภูมิห้อง (28-33 องศาเซลเซียส) ในระบบแบบกะและแบบต่อเนื่อง พบว่าการผลิตมีเทนจากน้ำทิ้งหลังการผลิตไฮโดรเจนในระบบต่อเนื่องภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้องที่ระยะพักกักเก็บน้ำ 20, 15 และ 10 วันให้ผลผลิตมีเทน 30.3, 30.4 และ 24.9 ลิตรมีเทนต่อลิตรน้ำทิ้ง ตามลำดับ ขณะที่อุณหภูมิสูงให้ผลผลิตมีเทน 31.6, 30.3 และ 29.29 ลิตรมีเทนต่อลิตรน้ำทิ้ง ตามลำดับ ผลผลิตมีเทนไม่ต่างกัน

การควบคุมค่าพีเอชในการผลิตมีเทนแบบไร้อากาศสองขั้นตอน โดยขั้นตอนการผลิตไฮโดรเจนมีค่าพีเอชก่อนหมัก 5.80-5.99 เมื่อผ่านไป 10 วัน พีเอชหลังหมัก 5.89-6.69 และในขั้นตอนการผลิตมีเทน 7.43-7.76 ความเข้มข้นร้อยละ 3 ของขยะเทศบาล มีค่าพีเอชในการผลิตมีเทนสูงที่สุด คือ 7.76 ผลิตมีเทนได้มากที่สุด และประสิทธิภาพลดลงอย่างรวดเร็ว สอดคล้องกับงานวิจัยของ นฤมล [15] ที่ศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพจากกากตะกอนดีแคนเตอร์ของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบร่วมกับน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็ง โดยศึกษาค่าพีเอชเป็นปัจจัยสำคัญในการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน เนื่องจากจุลินทรีย์สร้างกรดและจุลินทรีย์สร้างมีเทนทำงานร่วมทำงานกันได้ดี ต้องรักษาค่าพีเอชให้ได้ 6.8-7.2 หากค่าพีเอชต่ำกว่า 6.6 หรือสูงกว่า 7.6 ประสิทธิภาพของระบบจะลดลงอย่างรวดเร็วเพราะสภาวะนี้จะเป็นอันตรายต่อจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน

มีผลผลิตมีเทนต่ำเนื่องจากปริมาณสารอินทรีย์สูงส่งผลต่อกระบวนการผลิตมีเทน เมื่อศึกษากรดไขมันระเหยง่ายจากน้ำทิ้งผลิตไฮโดรเจนสำหรับผลิตมีเทน พบกรดบิวทีริก กรดอะซิติก กรดโพไพโอนิก กรดไอโซบิวทีริก และกรดไอโซวาเลริก สอดคล้องกับงานวิจัยของ สมพงศ์ และชลธิชา [17] ที่ศึกษาการปรับปรุงกระบวนการผลิตแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สมีเทนจากน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยระบบการย่อยสลายแบบไร้อากาศสองขั้นตอน ภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูง พบว่าผลมีเทนต่ำเนื่องจากปริมาณสารอินทรีย์สูงส่งผลต่อการผลิตมีเทน กรดแลคติก กรดอะซิติก และกรดบิวทีริกเดี่ยว ๆ ส่งผลกระทบเชิงบวก ขณะที่กรดโพรพิโอนิคเดี่ยว ๆ ส่งผลกระทบเชิงลบต่อกระบวนการสร้างมีเทน (methanogenesis) ผสมกันระหว่างกรดแลคติก กรดอะซิติก และกรดอะซิติก หรือกรดบิวทีริก กรดแลคติก และกรดโพรพิโอนิก ส่งผลกระทบเชิงบวกต่อกระบวนการสร้างมีเทน อย่ามีนัยสำคัญ ($p < 0.01$) ส่วนการผสมกันระหว่างกรดแลคติกกับกรดบิวทีริก กรดอะซิติกกับกรดโพรพิโอนิก กรดบิวทีริกกับกรดโพรพิโอนิก ส่งผลเชิงลบต่อกระบวนการต่อกระบวนการผลิตมีเทนอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.01$) เช่นเดียวกับกับงานวิจัยของ กิติชัย [18] ที่ศึกษาทางเลือกในการกำจัดขยะอินทรีย์ด้วยเทคโนโลยีชีวภาพในประเทศไทย โดยศึกษาจุลินทรีย์ในการผลิตมีเทน ซึ่งกรดอะซิติกผลิตมีเทนกับคาร์บอนไดออกไซด์ได้

**5.3 ศักยภาพการให้พลังงานความร้อนของขยะที่เผาไหม้ได้**

การวิเคราะห์ขยะเผาไหม้ประกอบด้วย กระดาษ พลาสติก เสื้อผ้า ยาง หนัง และโฟมได้พลังงานความร้อนด้วยเครื่องบอมบ์แคลอรี่มิเตอร์มีความสัมพันธ์กับความชื้น มีค่าพลังงานความร้อนสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mboowa และคณะ [9] การกำหนดศักยภาพเชิงคุณภาพและแก๊สมีเทนจาก

ขยะมูลฝอยชุมชนในแดนเบต ประเทศอินเดีย โดยหาค่าพลังงานจากหลุมฝังกลบ 3 แห่ง เมื่อนำมาศึกษาพลังงานความร้อนด้วยเครื่องบอมบ์แคลอรี่มิเตอร์ พบว่าจุดที่ 3 มีค่าความร้อนมากที่สุด คือ 13.0 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม รองลงมา คือ จุดที่ 2 ที่ค่าความร้อน 12.2 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม และจุดที่ 1 มีค่าความร้อน 10.7 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความชื้น

ศักยภาพการให้พลังงานความร้อนพื้นที่เทศบาลพรหมโลกจากขยะที่เผาไหม้ไม่ได้ ให้ค่าพลังงานสูงสุดที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 ของขยะเทศบาล ให้ผลผลิตมีเทน 114.76 ลูกบาศก์เมตรตันต่อของแข็งระเหย คิดเป็นค่าพลังงานความร้อน 418.63 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อวัน และขยะเผาไหม้ได้ให้ค่าพลังงานความร้อน 2,729.62 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อวัน สอดคล้องกับ Li และคณะ [19] ชีวมวลในเขตเมืองและวิธีการประมาณทรัพยากรชีวมวลของเทศบาล ชีวมวลของเทศบาลสามารถจำแนกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ ขยะมูลฝอย ชุมชนขยะเทศบาล และชีวมวลไม้ในเมือง เมื่อศึกษาเกี่ยวกับการวิเคราะห์คุณค่าที่ใกล้เคียงที่สุดค่าความร้อนและค่าความร้อนแสดงให้เห็นว่าชีวมวลทั้ง 3 ประเภท มีสมบัติต่างกัน ค่าความร้อนของสารชีวมวล 3 ชนิด คือ 7.10-19.90 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม 8.73-19.10 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม และ 16.96-21.59 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

ข้อสมมุติฐานงานวิจัย ขยะเผาไหม้ได้สามารถให้ค่าพลังงานความร้อน เป็นไปตามสมมุติฐาน ขยะเผาไหม้ได้เทศบาลพรหมโลกสามารถให้ค่าพลังงานความร้อน 6.61 เมกะจูลต่อกิโลกรัม และขยะเผาไหม้ไม่ได้ผลิตมีเทนด้วยการย่อยสลายแบบไร้อากาศสองขั้นตอนได้ดีในความเข้มข้นร้อยละ 11 ของขยะเทศบาล ไม่เป็นไปตามสมมุติฐานงานวิจัยการผลิตมีเทนด้วยการย่อยสลายแบบไร้อากาศสองขั้นตอนนั้นผลิตมีเทนได้ดีที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 ของขยะเทศบาล สามารถผลิตพลังงานความร้อน 418.63 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อวัน

## 6. References


[1] Wongchantra, P., Wongchantra, K., Boottarat, S. and Sanprasit, A., 2016, The training manual of recycle waste management for undergraduate students, Environmental Education Programs, Mahasarakham University, Prae-wa Kalasin J. Kalasin Univ. 3(3): 98-112. (in Thai)

[2] Yingyuad, N., 2017, Development of knowledge and awareness in garbage management for students major of agricultural and environmental Education through participation between university, local school and community network, Veridian E-J. Silpakorn Univ. Human. Soc. Sci. Arts 10(1): 770-785. (in Thai)

[3] Kittivitayapong, R., 2019, Competency on integrated municipality solid waste management of people in Prachuap Khirikhan Province, VRU Res. Develop. J. Human. Soc. Sci. 14(1): 298-311. (in Thai)

[4] Pongsiri, T., Toopgrajank, S. and Rungsawanpho, D., 2018, Administration patterns model establishment for collecting and transferring of local municipal solid waste, Veridian E- J. Silpakorn Univ. Human. Soc. Sci. Arts 11(1): 1572-1587. (in Thai)

[5] Pollution Control Department, 2016,

Thailand State of Pollution Report 2016, Pollution Control Department, Bangkok, 540 p. (in Thai)

[6] APHA, 1998, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 20th Ed., American Public Health Association, American Water Works Association and Water Environmental Federation, Washington DC, 1220 p.

[7] Kiatsiriroat, T., Prasityousil, J., Prasityousil, J., Vorayos, N. and Nanthaphan, A., 2009, Feasibility Study of Waste Management for District Scale Electricity Generation, Faculty of Engineering, Chiangmai University, Chiangmai, 423 p. (in Thai)

[8] Saranrom, K. and Yongcharoen, W., 2015, A case study of a waste processing plant fuel establishment in Nonthaburi municipality, Nonthaburi province, J. Energy Res. 12(2): 36-46. (in Thai)

[9] Hinsui, T., 2013, Alternative: A Study on Municipal Solid Waste Disposal by Plasma Gasification Technology for Energy Recovery, Doctoral Dissertation, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 243 p. (in Thai)

[10] Drake, M., 2017, Qualitative determination of energy potential and methane veneration from municipal solid waste (MSW) in Dhanbad (India), Energy 123: 386-391.

[11] Khongkliang, P., Kogjan, P. and O-thong, S., 2015, Hydrogen and methane production from starch processing wastewater by thermophilic two- stage anaerobic digestion, Energy Proc. 79: 827-832.

[12] Bumrerpong, P., Penchai, P. and Ongwandee, M., 2014, Effect of organic loading rate on methane production and methane production inhibitors in food waste using a two- stage digester, J. Sci. Technol. Mahasarakham Univ. 33(1): 8-12.

[13] Brown, D., Shi, J. and Li, Y., 2012, Comparison of solid-state to liquid anaerobic digestion of lignocellulosic feedstocks for biogas production, Bioresour. Technol. 124: 379-86.

[14] Lahaman, A., Niyasom, C. and O-thong, S., 2012, Effect of temperature and organic loading on methane production from hydrogenic effluent of oil palm mill wastewater, Thaksin Univ. J. 15(3): 107-115.

[15] Sohgratok, N., 2013, Biogas production from decanter cake of palm oil mill with wastewater from frozen seafood industry, Master's Thesis, Prince of Songkla University, Songkla, 157 p. (in Thai)

[16] O-Thong, S., Boe, K. and Angelidaki, I., 2012, Thermophilic anaerobic co-digestion of oil palm empty fruit bunches with palm oil mill effluent for efficient biogas production, Appl. Energy 93: 648-654.

[17] O- thong, S. and Mamimin, C., 2014, Enhancement of Hydrogen and Methane Production from Palm Oil Mill Effluent by Two-stage Anaerobic Digestion, Faculty of Science, Thaksin University, Phatthalung,

60 p. (in Thai)

[18] Raktakanit, K., 2015, Organic waste management using anaerobic digestion technology in Thailand, National Defence College of Thailand J. 57(1): 68-81.

[19] Li, Y., Zhou, L.w. and Wang, R.Z., 2017, Urban biomass and methods of estimating municipal biomass resources, Renew. Sustain. Energy Rev. 80: 1017-1030.