

**การพัฒนาคุณภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียของโรงงานเอทานอลโดยการผสม
กากมันสำปะหลัง ผักตบชวา และน้ำเสียจากฟาร์มสุกร**

**Development of Biogas Production Using Mixed Resources Cassava, Water
Hyacinth and Water Mixed with Swine Waste Water**

ดำเนินทราย ทรัพย์ไพศาล* และวิสาชา ภูจินดา

สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะบริหารการพัฒนาสิ่งแวดล้อม

สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์ กรุงเทพมหานคร 10240

* Email: dumnernsai@hotmail.com

บทคัดย่อ

น้ำวินัสซึ่งเป็นน้ำเสียจากการผลิตเอทานอลมีแนวโน้มจะเพิ่มสูงขึ้น จากเป้าหมายการใช้เอทานอลที่สูงขึ้นตามแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก ปี 2558-2579 ดังนั้นงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ในการทำการทดลองหมักน้ำวินัสด้วยของผสม 3 ชนิด คือ กากมันสำปะหลัง ผักตบชวา และน้ำเสียจากฟาร์มสุกร เพื่อศึกษาความเหมาะสมของชนิดของของผสม และอัตราส่วนของการผสม โดยทำการหมักของผสมในอัตราส่วนที่ ร้อยละ 10, 30 และ 50 ตามลำดับ มีการควบคุมค่า pH เริ่มต้นก่อนการหมักให้อยู่ในช่วง 6.5 – 7.5 และทำการหมักที่อุณหภูมิห้อง หมักใช้เวลา 40 วัน จากนั้นจึงนำก๊าซที่เกิดขึ้นมาวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทน และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ จากการทดลองพบว่า การผสมกากมันสำปะหลังกับน้ำวินัสจะช่วยปรับปรุงคุณภาพของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นโดยส่งผลให้ได้ปริมาณก๊าซมีเทนที่สูงขึ้น และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ลดลง ส่วนการผสมผักตบชวากับน้ำวินัสนั้นจะให้ผลที่ดีต่อเมื่อผสมผักตบชวาไปที่ 50% ซึ่งที่อัตราส่วนนี้จะทำให้ได้ก๊าซมีเทนที่สูงขึ้น และปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ต่ำมากๆ ส่วนการผสมน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ 30% นั้นจะช่วยลดการเกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ แต่ต้องผสมที่ 50% จึงจะสามารถให้ความเข้มข้นของก๊าซมีเทนที่สูงขึ้น เพราะฉะนั้น การหมักแบบผสมของน้ำวินัสกับ กากมันสำปะหลัง ผักตบชวา และน้ำเสียจากฟาร์มสุกรสามารถที่จะเพิ่มก๊าซมีเทน และลดการเกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้

คำสำคัญ: น้ำวินัส ก๊าซชีวภาพ การหมักแบบไร้อากาศ การหมักแบบผสม

Abstract

Vinasses is the waste water from ethanol distillation process which has a tendency to increase every year from the higher demand of ethanol consumption according to Annual Energy Development Plan (AEDP) 2015 – 2036. Thus, this research studies the anaerobic digestion of Vinasses with 3 different substrates, cassava pulp, water hyacinth and pig manure. This aims to study the performance of each substrate and the proper mixing ratio by 10%, 30% and 50%, respectively. The initial pH was controlled in range 6.5 – 7.5 and the fermentation temperature was used at room temperature. The samples were last for 40 days before sampling the generated gas to analyze methane and hydrogen sulfide content. From the result, we found that cassava pulp improves biogas quality by increasing methane content and reduce the concentration of hydrogen sulfide. Mixing with water hyacinth will enhance the biogas quality at the ratio 50% which achieve very high methane content and less hydrogen sulfide concentration. Mixing with pig manure at 30% can reduce hydrogen sulfide generation but the ratio must be up to 50% in order to increase the methane content. In conclusion, co-digestion of Vinasses with cassava pulp, water hyacinth and pig manure can increase methane content and reduce hydrogen sulfide as well.

Keywords: Vinasses, Biogas, Anaerobic Digestion, Co-digestion

บทนำ

ความต้องการการใช้เอทานอลของประเทศไทยเพิ่มขึ้นทุกปี กระทรวงพลังงานได้ทำแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558 – 2579 โดยกำหนดเป้าหมายส่งเสริมการใช้เอทานอลในประเทศ จากวันละ 3 ล้านลิตรในปี 2557 เป็น 5.09 ล้านลิตรในปี 2562 และเพิ่มเป็น 11.3 ล้านลิตรในปี 2579 พร้อมทั้งยังมีแผนที่จะเพิ่มการผลิตไฟฟ้าจากก๊าซชีวภาพ จาก 300 เมกะวัตต์ ในปี 2557 เพิ่มเป็น 600 เมกะวัตต์ ในปี 2579 (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2558) ภาครัฐจะเริ่มนโยบายส่งเสริมต่างๆเพื่อเพิ่มการใช้ แก๊สโซฮอลล์ เช่น E20 และ E85 ซึ่งมีเอทานอลเป็นส่วนผสม นอกจากนั้นทางภาครัฐตั้งเป้าที่จะเพิ่มการใช้พลังงานจากการเกษตร เช่น ชานอ้อย และมันสำปะหลัง เพื่อที่จะได้ตอบรับกับความต้องการพลังงานในอนาคต

ในด้านการผลิตเอทานอล โดยกระบวนการหมัก และการกลั่น จะได้น้ำเสียที่ประกอบด้วยสารอินทรีย์เป็นจำนวนมากที่เรียกว่า “น้ำวินัส” Robles-Gonzalez et al. (2010) พบว่าการผลิตเอทานอล 1 ลิตร จะก่อให้เกิดน้ำวินัส 8 – 15 ลิตร โดยปกติแล้วน้ำวินัสมีค่า COD ประมาณ 150 – 200 กรัมต่อลิตร

(บริษัท ห้างปฏิบัติการกลาง (ประเทศไทย) จำกัด, 2558) ซึ่งถือเป็นความท้าทายของทางโรงงานที่จะจัดการกับของเสียเหล่านี้ก่อนที่จะปล่อยออกสู่ภายนอกโรงงาน โดยที่ไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และชุมชน ณ ปี 2558 โรงงานผลิตเอทานอลในประเทศไทย มีกำลังการผลิต 5.04 ล้านลิตร ต่อวัน อย่างไรก็ตามรายงานการผลิตเอทานอลของประเทศไทยในปี 2558 เป็นตัวเลข 3.6 ล้านลิตรต่อวัน (ส่วนเศรษฐกิจภาคสำนักงานภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ธนาคารแห่งประเทศไทย, 2558) ซึ่งผลิตน้ำวันีสประมาณ 26.1 – 40.6 ล้านลิตรต่อวัน ถึงแม้ว่าน้ำวันีสจะมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม แต่สิ่งที่ได้จากการบำบัดกับมีประโยชน์อย่างมาก การบำบัดน้ำวันีสด้วยการหมักแบบไร้อากาศผลิตก๊าซชีวภาพซึ่งเป็นผลพลอยได้ จากปริมาณสำรองของพลังงานจากฟอสซิลลดลง และมีการใช้อย่างสิ้นเปลือง ก๊าซชีวภาพถือเป็นทางเลือกของแหล่งพลังงานที่จะเพิ่มความมั่นคงด้านพลังงานได้ นอกจากนี้ น้ำเสียที่ออกจากกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ สามารถใช้เป็นสารปรับปรุงดินเพื่อการเกษตรอีกด้วย ด้วยคุณประโยชน์เหล่านี้ กระบวนการหมักแบบไร้อากาศจึงถูกศึกษากันอย่างกว้างขวาง

ตามทฤษฎีการเกิดก๊าซชีวภาพแล้ว มี 3 กระบวนการย่อยเกิดขึ้นในการผลิตก๊าซชีวภาพ ได้แก่ การย่อยสลายด้วยน้ำ การผลิตกรดอะซิโตน การผลิตมีเทน กระบวนการผลิตมีเทนเป็นขั้นตอนที่เกิดจากแบคทีเรียที่ไม่ต้องการอากาศโดยเปลี่ยนกรดอะซิโตนให้เป็นมีเทน อย่างไรก็ตามในกระบวนการจะเกิด ตัวยับยั้ง เช่น สารประกอบ ฟีนอลิคคอยขัดขวางการย่อย ซึ่งทำให้อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพช้าลง และลดอัตราการเกิดมีเทนด้วย นอกจากนี้ ก๊าซชีวภาพที่เกิดจากน้ำวันีสจะมีสารก่ดกร่อนที่เรียกว่า ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งมีผลกระทบต่อร่างกายของมนุษย์ในหลายด้าน เช่น ระคายเคือง เหนื่อยล้า และมีเมื่อง ไฮโดรเจนซัลไฟด์ยังสามารถทำลายเครื่องจักรจากการก่ดกร่อนได้อีกด้วย นักวิจัยหลายคนได้ศึกษาที่จะทำการปรับปรุงกระบวนการหมักของน้ำวันีส วิธีการแบบหนึ่งที่นำมาใช้คือการหมักแบบผสม การหมักแบบผสมคือการหมักของผสมสองสิ่ง หรือมากกว่าด้วยกัน Bozano, Nosiglia, and Vitali (2012) โดยปกติแล้วการหมักแบบผสมปรับปรุงผลลัพธ์ของก๊าซชีวภาพจากการหมักแบบไร้อากาศเนื่องจากจะมีการเสริมกันเ็นทางบวกสำหรับการหมัก และมีการส่งผ่านสารอาหารที่ขาดหายไปโดยการผสมร่วมกัน (Callaghan, Wase, Thayanithy, and Forster, 2002)

Yusuf and Ify (2011) ได้ปรับปรุงประสิทธิภาพการหมักมูลวัวด้วยการผสมกระดาดเหลือทิ้งกับผักตบชวา ผลจากการศึกษาพบว่าได้ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงขึ้น เมื่อเทียบกับการหมักด้วยมูลวัวเพียงอย่างเดียว (Panichnumsin, Nopharatana, Ahring and Chaiprasert, 2010.) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักแบบไร้อากาศจากมูลสุกร และเปลือกมันสำปะหลัง การศึกษากล่าวว่าเปลือกของมันสำปะหลังสามารถช่วยทำให้ผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้น 41% เมื่อเทียบกับการหมักด้วยมูลสุกรอย่างเดียว Alrawi, Ahmad, Ismail, and Kadir (2011) ใช้กระเพาะวัวเป็นการหมักผสมกับน้ำมันปาล์ม ซึ่งสามารถได้อัตราการกำจัด COD สูงถึง 96.84 %

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

แนวคิดของการผสมในงานวิจัยนี้เพื่อที่จะใช้ของเหลือทิ้งในการสนับสนุนแนวคิดของเหลือเป็นศูนย์ ดังนั้นผู้วิจัยได้ทำการศึกษาพื้นที่เป้าหมาย และพบว่า ของเหลือจากการเกษตร กากมันสำปะหลัง และน้ำเสียจากฟาร์มสุกร นั้นสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบได้ และมีศักยภาพเพียงพอที่จะนำไปใช้ในระดับอุตสาหกรรมอีกด้วย โดยกากมันสำปะหลังถูกนำไปใช้ในการเลี้ยงสัตว์เป็นหลักซึ่งถือว่าเป็นการเพิ่มทางเลือกในการจัดการกับกากมันสำปะหลัง นอกจากนั้น ผักตบชวาจะถูกใช้ในงานวิจัยนี้ เพราะว่า ผักตบชวาจัดเป็นพืชที่พบได้ในทุกที่ของประเทศไทย และเป็นพืชโตเร็วซึ่งมีผลกระทบต่อคุณภาพของน้ำ ถ้าการแพร่กระจายไม่สามารถควบคุมได้ ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อจะได้ทราบว่าวัตถุดิบใด ระหว่างกากมันสำปะหลัง ผักตบชวา และน้ำเสียจากฟาร์มสุกร ที่มีความเหมาะสมแก่การนำไปผสมกับน้ำวินัสเพื่อเพิ่มคุณภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ รวมถึงได้ทราบอัตราส่วนที่เหมาะสมของการผสมวัตถุดิบกับน้ำวินัส เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ และใช้เป็นองค์ความรู้ประกอบการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือใช้

วัสดุอุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย

1. วัตถุดิบ

1.1. น้ำวินัส

น้ำวินัสนำมาจากโรงงานผลิตเอทานอลจากชานอ้อย บริษัทเพโทรกรีน จำกัด โรงงานตั้งอยู่ที่ อำเภอ ด่านช้าง จังหวัดสุพรรณบุรี คุณสมบัติของน้ำวินัส คือ ค่า BOD 61,750 มิลลิกรัมต่อลิตร, COD 199,000 มิลลิกรัมต่อลิตร, pH 4, Suspended Solid (SS) 55,000 มิลลิกรัมต่อลิตร, Total Dissolved Solid (TDS) 126,050 มิลลิกรัมต่อลิตร

1.2. น้ำเสียจากมูลสุกร

ในขั้นตอนการเลี้ยงสุกร น้ำสะอาดจะถูกใช้ในการชำระมูลสุกรในฟาร์ม ของผสมน้ำกับมูลสุกรถูกเก็บมาเพื่อใช้ในการทดลอง ตัวอย่างที่เก็บมาถูกใช้ในการทดลองในวันเดียวกันกับที่เก็บมา

1.3. กากมันสำปะหลัง

กากมันสำปะหลังได้จากบริษัท ไทยควอลิตี้ สตาฟฟ์ ซึ่งโรงงานตั้งอยู่ที่ ตำบล หอนงประดู่ อำเภอ เลาขวัญ จังหวัดกาญจนบุรี กากมันสำปะหลังได้ถูกเก็บมาแล้วนำไปใช้ในการทดลองภายในวันเดียวกัน ตัวอย่างบางส่วนถูกแยกเก็บไว้ และแยกเก็บไว้ในตู้เย็นเป็นเวลา 1 วัน จากนั้นจึงส่งไปทดสอบที่ห้องปฏิบัติการกลาง สำนักงานใหญ่ เพื่อทดสอบหาปริมาณแอมโมเนียและความชื้น ผลการทดสอบพบว่ากากมัน

ลำปะหลังมีแบ่งในอัตราส่วนร้อยละ 15 และความชื้นร้อยละ 75 โดยลักษณะทางกายภาพของกากมันลำปะหลังจะมีลักษณะการจับตัวเป็นก้อน

1.4. ผักตบชวา

ผักตบชวาถูกเก็บมาจากบ่อน้ำที่เมืองพญา ผักตบชวาสดถูกนำไปตากแห้งโดยแดดเป็นเวลา 2 สัปดาห์ จากนั้นทำการตัดราก และ ทำการเก็บเฉพาะใบ และก้าน นำใบและก้านมาสับ โดยให้มีความยาวประมาณ 3 เซนติเมตร และเก็บในสภาวะแห้ง ก่อนนำมาใช้ ทำการปั่นด้วยเครื่องปั่น โดยทำการปั่นเป็นเวลา 1 นาที จนลักษณะทางกายภาพของผักตบชวามีลักษณะป่น

1.5. หัวเชื้อ

น้ำที่เหลือออกจากกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพของโรงไฟฟ้าก๊าซชีวภาพจากการหมักแบบไร้อากาศ ถูกนำมาใช้เพื่อเป็น หัวเชื้อ ซึ่งโรงไฟฟ้าตั้งอยู่ที่จังหวัดสุพรรณบุรี

2. อุปกรณ์

ในการทดลองนี้ ทางผู้วิจัยได้ใช้ขวดพลาสติกขนาด 1.5 ลิตรแทนถังหมัก ขวดพลาสติกจำนวน 30 ขวดถูกจัดเตรียมโดยการทำความสะอาดด้วยน้ำยาล้างจานก่อนที่จะทำการทดลอง แผ่นฟิล์มพีวีซีบางถูกใช้ในการปิดฝาขวด และให้มันใจว่าขวดถูกเก็บในสภาพไร้อากาศ ฝาขวดถูกเจาะรูที่ตรงกลางซึ่งจะถูกใช้ในการดึงตัวอย่างก๊าซไปทำการวิเคราะห์



รูปที่ 1 แสดงการปิดฝาขวดด้วยแผ่นพีวีซีบาง เพื่อเก็บขวดให้อยู่ในสภาพไร้อากาศ



รูปที่ 2 แสดงฝาขวดถูกเจาะรูที่ตรงกลางซึ่งจะถูกใช้ในการดึงตัวอย่างก๊าซไปทำการวิเคราะห์

3. การทดลอง

3.1. แนวคิด

การทดลองจะทำการหมักน้ำวินัสบริสุทธิ และน้ำวินัสผสม น้ำวินัสจะถูกผสมกับของผสม 3 อย่าง น้ำมูลสุกร กากมันสำปะหลัง ผักตบชวาแห้ง ที่อัตราส่วน 10%, 30% และ 50% และ ถูกควบคุมที่สภาวะเดียวกัน คือ ค่าความเป็นกรด-ด่างที่ 6.5 – 7.5 และ อุณหภูมิห้องที่ 30 – 35 องศาเซลเซียส ปริมาตรที่ใช้งานเท่ากับ 350 มิลลิลิตร ซึ่งจะประกอบอัตราส่วนการผสมระหว่างของผสมที่ใช้ในการหมัก กับหัวเชื้อ ที่ 1: 6 (50 ml: 300ml) จำนวนของหัวเชื้อจะมีค่าคงที่ที่ 300 มิลลิลิตร แต่ปริมาณสัดส่วนของของผสมจะเปลี่ยนแปลงไป การทดลองจะทำการหมักทิ้งไว้ 40 วัน โดยอ้างอิงการทดลอง (Abu-Dahrieh, Orozco, Groom, and Rooney, 2011) และหลังจากนั้น ก๊าซในขวดทดลองแต่ละขวดจะถูกเก็บ 2 วิธี โดยการดูดเข้าหลอดฉีดยาสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณมีเทน และการดูดก๊าซออกจากขวดผ่านปมดูดก๊าซเข้าถุงเก็บก๊าซสำหรับการวิเคราะห์ไฮโดรเจนซัลไฟด์ และนำไปวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ

3.2. การเตรียมการ

การเตรียมของผสมทำโดยใช้อัตราส่วนของน้ำหนักต่อน้ำหนัก เพราะว่าของผสมบางชนิดอยู่ในลักษณะเป็นของแข็งซึ่งยากต่อการหาปริมาตร

ขั้นแรก ผู้วิจัยได้ทำการตวงน้ำวินัส 50 มิลลิลิตร และนำไปชั่งน้ำหนัก ซึ่งได้น้ำหนักที่ 52.5 กรัม ซึ่งหมายความว่าน้ำหนักรวมทั้งหมดของของผสมกับน้ำวินัสจะต้องมีค่าเท่ากับ 52.5 กรัม

ขั้นที่สอง ผู้วิจัยได้ทำการคำนวณอัตราส่วนน้ำหนักระหว่างน้ำวินัส กับของผสมที่ 10%, 30% และ 50% ตามอัตราส่วนการผสมได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1

อัตราส่วนการผสม (ร้อยละ)	หัวเชื้อ (มิลลิลิตร)	ของผสม	
		น้ำวินัส (กรัม)	น้ำเสียมูลสุกร, กากมันสำปะหลัง ผักตบชวาแห้ง (กรัม)
0%	350	52.50	0.00
10%	350	47.25	5.25
30%	350	36.75	15.75
50%	350	26.25	26.25

3.3. ขั้นตอนการทดลอง

ขวดตัวอย่างทั้งหมดจะถูกติดฉลากที่บอกถึงส่วนประกอบ อัตราส่วนการผสม และ ค่าความเป็นกรด-ด่าง หลังจากทำการผสม เพื่อให้แน่ใจว่ามีการกำจัดอากาศออกไปทั้งหมด ผู้วิจัยได้ทำการบีบขวดจนของเหลวผสมถูกดันขึ้นมาถึงปากขวด จากนั้นทำการปิดผนึกด้วยแผ่นพีวีซีบาง และทำการปิดฝาขวดให้สนิท แผ่นพีวีซีบางติด 2 ชั้นเพื่อป้องกันการรั่ว ขวดถูกเรียงไว้ตามลำดับที่ระบุไว้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2

อัตราส่วนผสม	หมายเลขขวด	ค่า pH
น้ำวีนัส 100%	1, 11, 21	7.08, 7.07, 6.93
น้ำวีนัส : กากมันสำปะหลัง 90% : 10%	2, 12, 22	6.88, 6.94, 6.87
น้ำวีนัส : กากมันสำปะหลัง 70% : 30%	3, 13, 23	7.17, 7.05, 7.08
น้ำวีนัส : กากมันสำปะหลัง 50% : 50%	4, 14, 24	7.38, 7.32, 7.41
น้ำวีนัส : ผักตบชวา 90% : 10%	5, 15, 25	7.32, 7.17, 7.06
น้ำวีนัส : ผักตบชวา 70% : 30%	6, 16, 26	7.38, 7.23, 7.36
น้ำวีนัส : ผักตบชวา 50% : 50%	7, 17, 27	7.17, 6.91, 7.07
น้ำวีนัส : น้ำเสียจากฟาร์มสุกร 90% : 10%	8, 18, 28	7.02, 7.06, 7.04
น้ำวีนัส : น้ำเสียจากฟาร์มสุกร 70% : 30%	9, 19, 29	7.10, 7.08, 7.07
น้ำวีนัส : น้ำเสียจากฟาร์มสุกร 50% : 50%	10, 20, 30	7.19, 7.25, 7.20

4. วิธีการวิเคราะห์

ค่า COD วิเคราะห์จากขั้นตอนตามมาตรฐาน (Eaton, Clesceri, Rice, Greenberg and Franson, 2005) ความเข้มข้นของมีเทนทำการวิเคราะห์โดยเครื่องโครมาโตกราฟีแบบ เปลวไฟ ตรวจจับ ไอออนไนซ์ และใช้คอลัมน์แบบ RT-Alumina ใช้ก๊าซฮีเลียม เป็นตัวพา และใช้ก๊าซมีเทนมาตรฐานที่มีความเข้มข้น 100 ppm สำหรับการสอบเทียบ อุปกรณ์วัดเป็นเข็มฉีดยาขนาด 1 มิลลิลิตร

การวิเคราะห์หาปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ไม่สามารถทำได้โดยตรงต้องทำการเปลี่ยนไฮโดรเจนซัลไฟด์ให้อยู่ในรูปของซัลเฟตก่อน โดยเก็บตัวอย่างก๊าซจากขวดทดลองเข้าไปในถุงเก็บก๊าซขนาด 5 ลิตร จากนั้นปั๊มก๊าซที่อยู่ในถุงเก็บก๊าซผ่านสารดูดซับ ซึ่งสารดูดซับใช้ของบริษัท SKC ชนิด Anasorb CSC, Coconut Charcoal หมายเลขสินค้า 226-01 ในอัตรา 0.2 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 6 นาที

จากนั้นนำสารโคล มาวัดค่าซัลเฟตไอออนด้วยเครื่องไอออนโครมาโตกราฟี แล้วจึงคำนวณย้อนกลับ เพื่อหาปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ ดังสมการ

$$C = \frac{0.3548 (W_f + W_b - B_f - B_b)}{V} \text{ mg/m}^3 \text{ (NIOSH Manual of Analytical Methods}$$

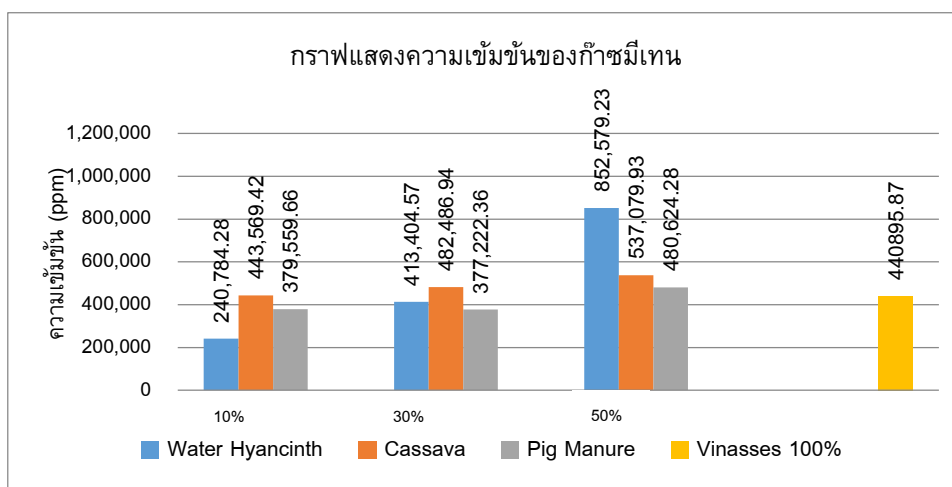
(NMAM), Fourth Edition)

โดยที่

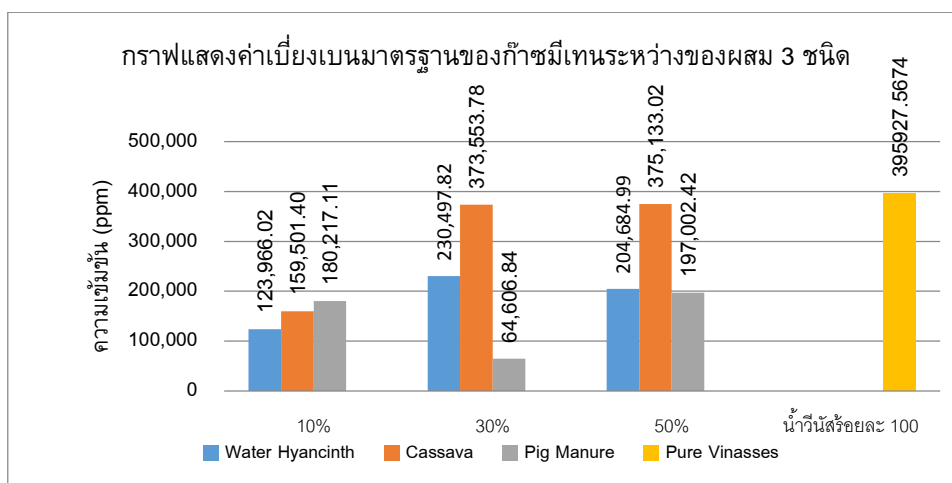
C	=	ความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ (mg/m ³)
W _f	=	ปริมาณของซัลเฟตไอออนส่วนหน้า (μg)
W _b	=	ปริมาณของซัลเฟตไอออนส่วนหลัง (μg)
B _f	=	ปริมาณของซัลเฟตไอออนในตัวอย่างส่วนหน้า (μg)
B _b	=	ปริมาณของซัลเฟตไอออนในตัวอย่างส่วนหลัง (μg)
V	=	ปริมาตรของอากาศตัวอย่าง (L)

ผลการวิจัย

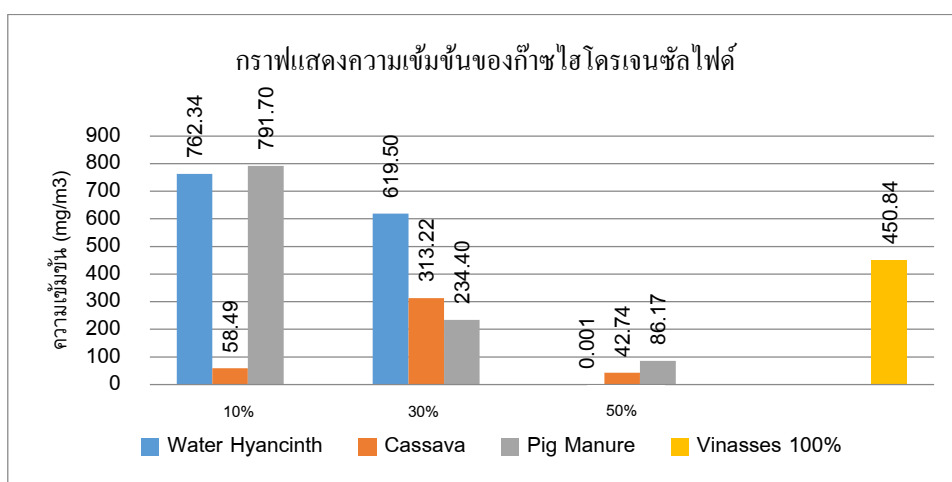
ผู้ทำวิจัยได้ทำการทดลองเพิ่มประสิทธิภาพของการเกิดก๊าซชีวภาพจากน้ำวินัสด้วยการผสมของผสม ทั้ง 3 ชนิด คือ กากมันสำปะหลัง ผักตบชวา และน้ำเสียจากฟาร์มสุกร ซึ่งการผสมของผสมเหล่านี้ทางผู้ทำวิจัยตั้งสมมติฐานไว้ว่าจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพได้ โดยหลังจากการทดลองหมัก แล้วทางผู้วิจัยได้นำตัวอย่างไปทดสอบหาปริมาณก๊าซมีเทน และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดขึ้น เพื่อชี้วัดถึงคุณภาพของก๊าซที่เกิดขึ้น ซึ่งได้ผลการทดลองดังกราฟที่ 1 - 4 ดังนี้



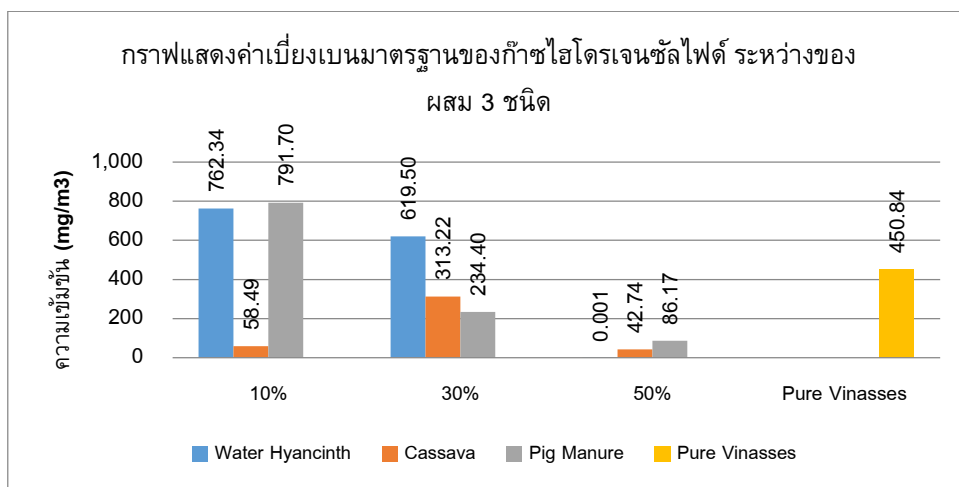
กราฟที่ 1 แสดงความเข้มข้นของก๊าซมีเทนระหว่างของผสมน้ำเสียจากฟาร์มสุกร ผสมกับน้ำวินัส ที่อัตราส่วนต่างๆกับน้ำวินัส 100%



กราฟที่ 2 แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานความเข้มข้นของก๊าซมีเทน ระหว่างของผสมน้ำเสียจากฟาร์มสุกร ผสมกับน้ำวินัสที่อัตราส่วนต่างๆกับน้ำวินัส 100%



กราฟที่ 3 แสดงความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ระหว่างของผสมน้ำเสียจากฟาร์มสุกร ผสมกับน้ำวินัสที่อัตราส่วนต่างๆกับน้ำวินัส 100%



กราฟที่ 4 แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ระหว่างของผสมน้ำเสียจากฟาร์มสุกร ผสมกับน้ำวินัสที่อัตราส่วนต่างๆกับน้ำวินัส 100%

1. การเปรียบเทียบปริมาณก๊าซมีเทนของของผสม กับน้ำวินัส 100%

จากกราฟที่ 1 จะเห็นว่า การผสมกากมันสำปะหลังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการเกิดก๊าซมีเทนได้ โดยความเข้มข้นของก๊าซมีเทนที่ได้จากน้ำวินัส 100% มีค่าเท่ากับ 440,895.87 ppm แต่ความเข้มข้นของของผสมน้ำวินัส กับกากมันสำปะหลังได้ความเข้มข้นของก๊าซมีเทน 443,569.12, 482,486.94 และ 537,079.93 ppm ที่ปริมาณของผสม 10%, 30% และ 50% ตามลำดับ การผสมผักตบชวา กับน้ำวินัสที่ให้ผลที่แตกต่างกับการผสมกากมันสำปะหลังคือ การผสมผักตบชวาที่ปริมาณน้อยๆ ไม่สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการหมักได้ขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณผักตบชวาเข้าไปที่ 50% สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการเกิดก๊าซมีเทนได้ โดยความเข้มข้นของก๊าซมีเทนของของผสมน้ำวินัส กับผักตบชวาได้ความเข้มข้นของก๊าซมีเทน 240,784.28, 413,404.57 และ 852,579.23 ppm ที่ปริมาณของผสม 10%, 30% และ 50% ตามลำดับ นอกจากนั้น การผสมน้ำเสียจากฟาร์มสุกรกับน้ำวินัสให้ผลที่เหมือนกับการผสมผักตบชวา คือ เมื่อการผสมได้อัตราส่วนที่มากเพียงพอจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการเกิดก๊าซมีเทนได้ โดยความเข้มข้นของก๊าซมีเทนของของผสมน้ำวินัส กับผักตบชวาได้ความเข้มข้นของก๊าซมีเทน 379,559.66, 377,222.36 และ 480,624.28 ppm ที่ปริมาณของผสม 10%, 30% และ 50% ตามลำดับ

โดยภาพรวมแล้วจะเห็นว่า การนำของผสมมาช่วยในการหมักจะสามารถทำให้ได้ก๊าซชีวภาพ หรือ ก๊าซมีเทนสูงขึ้น แต่จำเป็นต้องหาอัตราส่วนของการผสมให้เหมาะสมสำหรับของผสมแต่ละชนิด เนื่องจากการผสมของผสมลงไปทำให้อัตราส่วนของ คาร์บอนกับไนโตรเจน (C:N ratio) เปลี่ยนไป อัตราส่วนของ C:N ที่เหมาะสมจะทำให้การหมักเกิดประสิทธิภาพที่ดี (Panichnumsin, Noparatana, Ahring and Chaiprasert, 2010.)

2. การเปรียบเทียบปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ของของผสม กับน้ำวินัส 100%

ปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ เป็นอีกหนึ่งตัวแปรในการทดลอง เพื่อที่จะบอกถึงคุณภาพของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น

จากกราฟที่ 2 ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการหมักของของผสมน้ำวินัส กับกากมันสำปะหลังมีปริมาณน้อยกว่า การหมักด้วยน้ำวินัส 100% ซึ่งถือว่าการผสมกากมันสำปะหลังเข้าไปนั้นได้ช่วยปรับปรุงคุณภาพของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น โดยมีก๊าซที่เป็นอันตรายลดลง การผสมผักตบชวาลงไปกลับได้ผลตรงกันข้ามกับกากมันสำปะหลังคือ ได้ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์สูงกว่าการหมักด้วยน้ำวินัส 100% แต่เมื่อทำการผสมในปริมาณที่ 50% ค่าของ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ก็ลดลงอย่างมากจนแทบไม่เกิดขึ้นเลย ซึ่งเป็นการเน้นถึงความสำคัญของการหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของการผสม และการผสมน้ำเสียจากฟาร์มสุกรยังคงมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับการผสมด้วยผักตบชวา โดยที่เมื่อผสมอัตราส่วนของน้ำเสียจากฟาร์มสุกรลงไปให้อัตราส่วนที่มากเพียงพอจะทำให้การเกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ลดลง

โดยสรุป การผสมกากมันสำปะหลังกับน้ำวินัสจะช่วยปรับปรุงคุณภาพของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น โดยส่งผลให้ได้ปริมาณก๊าซมีเทนที่สูงขึ้น และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ลดลง ส่วนการผสมผักตบชวากับน้ำวินัสนั้นจะให้ผลที่ดีก็ต่อเมื่อผสมผักตบชวาไปที่ 50% ซึ่งที่อัตราส่วนนี้จะทำให้ได้ก๊าซมีเทนที่สูงขึ้น และปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ต่ำมาก ๆ ส่วนการผสมน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ 30% นั้นจะช่วยลดการเกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ แต่ต้องผสมที่ 50% จึงจะสามารถให้ความเข้มข้นของก๊าซมีเทนที่สูงขึ้น

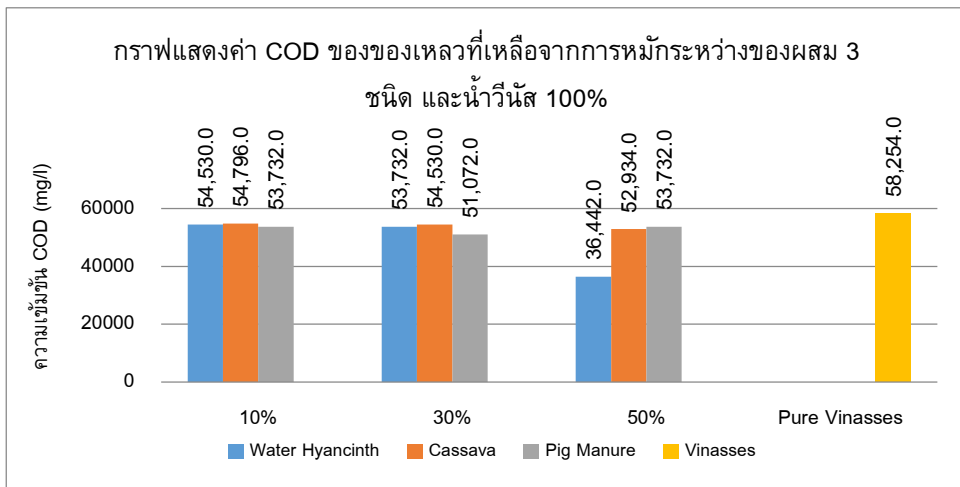
3. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของของผสม

จากผลการทดลองข้างต้นจะเห็นว่าการเพิ่มของผสมลงไปให้น้ำวินัสจะช่วยเพิ่มคุณภาพของก๊าซที่เกิดขึ้น ทางผู้วิจัยจึงทำการวิเคราะห์เพิ่มเติมว่า ของผสมชนิดไหนที่ให้ปริมาณมีเทนที่มากที่สุด และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่น้อยที่สุด ณ อัตราส่วนของการผสมที่เท่ากัน

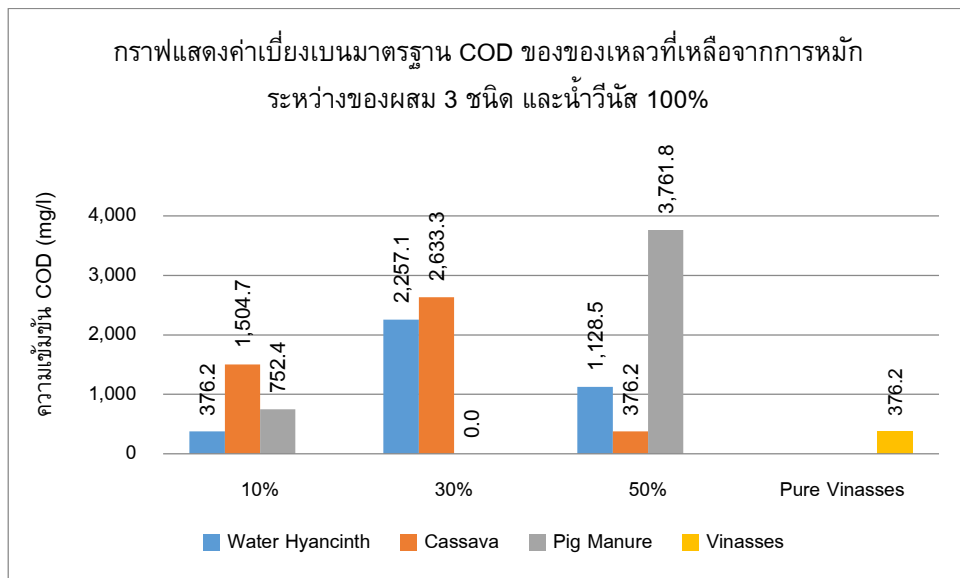
จากกราฟที่ 1 พบว่าที่อัตราของผสมต่อน้ำวินัสร้อยละ 50 ให้ปริมาณก๊าซมีเทนที่มากที่สุด โดยผักตบชวาจะให้ผลที่ดีที่สุดคือได้ก๊าซมีเทนที่ปริมาณมากที่สุดที่ 852,579 ppm ต่อจากผักตบชวาคือกากมันสำปะหลังซึ่งได้ก๊าซมีเทนที่ 537,079 ppm สุดท้ายคือน้ำเสียจากฟาร์มสุกรซึ่งได้ผลที่ 480,624 ppm กราฟที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบผลของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ของของผสม 3 ชนิด ผลการทดลองสอดคล้องกับผลจากก๊าซมีเทนคือ ที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 50 ของผสมทั้ง 3 ชนิดมีก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์น้อยที่สุด โดยของผสมผักตบชวาให้ผลที่ดีที่สุดคือ มีปริมาณของไฮโดรเจนซัลไฟด์น้อยกว่า 0.01 ppm ซึ่งอาจจะเกิดจากการที่ผักตบชวามีความสามารถในการดูดซับสารพิษ (Giraldo & Garzón, 2002) ต่อมาคือกากมันสำปะหลัง และน้ำเสียจากฟาร์มสุกรในปริมาณของไฮโดรเจนซัลไฟด์ 42.73 และ 86.17 mg/m³ ตามลำดับ

4. ค่า COD ของน้ำหลังจากการหมัก

ภายหลังจากขั้นตอนกระบวนการหมักแล้ว น้ำเสียที่เหลือจากกระบวนการจำเป็นต้องถูกนำออกจากระบบ ซึ่งทางผู้ทำการทดลองได้ตรวจสอบคุณภาพของน้ำเสียหลังจากการหมัก เพื่อทดสอบความสกปรกของน้ำที่เหลือจากการหมักด้วย ซึ่งแสดงในกราฟที่ 5 และ 6



กราฟที่ 5 แสดงค่า COD ของของเหลวที่เหลือจากการหมักระหว่างของผสม 3 ชนิด และน้ำวินัส 100%



กราฟที่ 6 แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน COD ของของเหลวที่เหลือจากการหมักระหว่างของผสม 3 ชนิด และน้ำวินัส 100%

จากการกราฟจะเห็นว่าเมื่อทำการเพิ่มของผสมลงไปให้น้ำวินัส จะทำให้ค่า COD ที่ออกมามีแนวโน้มลดลง ซึ่งการลดลงของ COD อาจจะมาได้จาก 2 ปัจจัย คือ

1. การที่ของผสมเข้าไปเจือจางความเข้มข้นของน้ำวินัส ทำให้ค่า COD ในระบบลดลง (อ้างอิงจากผลการทดลอง)
2. การเติมของผสมทำให้ประสิทธิภาพในการหมักดีขึ้น ทำให้ค่า COD ลดลงไป (Ozturk, 2012)

อภิปรายผลการวิจัย

การทดลองได้ทำการหมักของผสม กากมันสำปะหลัง ผักตบชวา และน้ำเสียจากฟาร์มสุกร กับน้ำวินัสที่อัตราส่วนร้อยละ 10 30 และ 50 ตามลำดับซึ่งจากการทดสอบพบว่า การผสมกากมันสำปะหลังกับน้ำวินัสในอัตราส่วนที่ ร้อยละ 10, 30 และ 50 ส่งผลให้ได้ปริมาณก๊าซมีเทนที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับผลจากการหมักด้วยน้ำวินัสเพียงอย่างเดียวที่ ร้อยละ 0.6, 9.0 และ 20.0 ตามลำดับ และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ลดลงร้อยละ 87, 30 และ 90 ตามลำดับ ซึ่งจะได้ปริมาณก๊าซมีเทนสูงสุดที่ 852,579 ppm และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่น้อยกว่า 0.01 ppm ส่วนการผสมผักตบชวากับน้ำวินัสต้องผสมในอัตราส่วนร้อยละ 50 ถึงจะทำให้ได้ก๊าซมีเทนที่สูงขึ้นถึงร้อยละ 90 และปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ต่ำลงร้อยละ 99 ส่วนการผสมน้ำเสียจากฟาร์มสุกรต้องผสมที่ร้อยละ 50 จึงจะสามารถให้ความเข้มข้นของก๊าซมีเทนที่สูงขึ้น และปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ต่ำลง โดยเพิ่มขึ้นร้อยละ 9 และลดลงร้อยละ 80 ตามลำดับ เพราะฉะนั้นการหมักแบบผสมของน้ำวินัสกับ กากมันสำปะหลัง ผักตบชวา และน้ำเสียจากฟาร์มสุกรสามารถที่จะเพิ่มก๊าซมีเทน และลดการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้

สาเหตุที่การหมักแบบผสมสามารถช่วยในการเพิ่มคุณภาพของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นได้มาจากการผสมจะทำให้ช่วยปรับสมดุลของสารอาหารในของหมัก (Callaghan, Wase, Thayanithy & Forster, 2002) จากการศึกษาคุณสมบัติของวัตถุดิบพบว่าสารอาหารสำคัญหลักๆในกระบวนการเกิดก๊าซมีเทน คือ โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และไขมันของของผสมทั้ง 3 ชนิดนั้นมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน (Møller, Sommer and Ahring, 2004) คำนวณทางทฤษฎี อัตราการเกิดก๊าซมีเทนจำแนกตามสารอาหารพบว่า ไขมันจะมีอัตราการเกิดก๊าซมีเทนสูงที่สุด ตามมาด้วยโปรตีน และคาร์โบไฮเดรต ตามค่า 1,014, 496 และ 415 l CH₄ kg⁻¹ VS ตามลำดับ อีกปัจจัยในการเกิดก๊าซมีเทนก็คือเปอร์เซ็นต์ C:N จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าค่า C:N ของน้ำวินัส น้ำเสียจากฟาร์มสุกร ผักตบชวา และกากมันสำปะหลังมีค่าเท่ากับ 10, 14, 29 และ 210 ตามลำดับ (Panichnumsin, Noparatana, Ahring and Chaiprasert, 2010.), C:N ของผักตบชวาอ้างอิงจาก (Alani and Moo-Young, 1986) โดยทั่วไปแล้วค่า C:N ที่เหมาะสมสำหรับการหมักแบบไร้อากาศอยู่ในช่วง 20 – 30 (Kayhanian and Hardy, 1994; Li, Park, & Zhu, 2011; Puyuelo, Ponsá, Gea, & Sánchez, 2011; Wang, Yang, Feng, Ren, & Han, 2012) ซึ่งจะเห็นว่าผักตบชวามีค่า C:N ที่อยู่ในช่วงที่เหมาะสมที่สุดตามทฤษฎี

ผลจากการหมักแบบผสมสามารถลดปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ซึ่งมีปัจจัยมาจากการลดลงของปริมาณซัลเฟอร์ในของผสม (Bothi, 2007) ได้ศึกษาลักษณะของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในฟาร์มปศุสัตว์ 5 แห่งรอบๆนิวยอร์ก พบว่าปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ขึ้นอยู่กับปริมาณซัลเฟอร์ในสารตั้งต้น ฟาร์มที่ใช้ปุ๋ยที่มีซัลเฟอร์ผสมจะเกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์สูงกว่าฟาร์มอื่น ส่วนฟาร์มที่มีการใช้อาหารเหลือทิ้งมาผสมในการหมักทำให้ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ลดลงกว่าฟาร์มอื่นๆ จากผลการศึกษาสรุปได้ว่าถ้าสารที่ใช้ในการหมักมีปริมาณซัลเฟอร์น้อย จะทำให้ก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นมีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์น้อยด้วย นอกจากนี้จากการทดลองพบว่าปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ของของผสมผักตบชวามีค่าลดลงมาก โดยมีค่าน้อยกว่า 0.01 mg/L เนื่องจากความสามารถของผักตบชวาสามารถดูดซับสารพิษได้อีกด้วย (Giraldo & Garzón, 2002)

ผลทดสอบค่า COD หลังจากการหมักแสดงว่าการหมักแบบผสมสามารถลดปริมาณ COD ที่เกิดขึ้นลงเมื่อเปรียบเทียบกับหมักด้วยน้ำวินัสเพียงอย่างเดียว ซึ่งจากการคำนวณ % COD removal ของน้ำวินัสเพียงอย่างเดียว กับของผสมทั้ง 3 ชนิดมีค่าไม่ต่างกันตั้งนั้นอาจกล่าวได้ว่าการที่ค่า COD ลดลงเนื่องจากค่า COD ของของผสมมีค่าน้อยกว่าค่าของน้ำ อย่างไรก็ตามผักตบชวาดกแห้ง ที่ 50% ค่า COD ในน้ำลดลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งมาจากการที่น้ำวินัสถูกผักตบชวาดูดซับน้ำไว้ (ผดุงวิทย์ หงษ์สามารถ และคณะ, 2556) ดังนั้นค่า COD จากการทดลองน้ำวินัสผสมผักตบชวาดกแห้งจึงมีค่าที่ต่ำ

ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากผลของงานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่า การหมักแบบผสมสามารถที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของการหมักน้ำวินัสได้ ดังนั้นการศึกษารวมด้วยวัสดุเหลือใช้อื่นๆ เช่น หัวมัน ชานอ้อย หรือมูลสัตว์ชนิดอื่นเป็นสิ่งที่ควรที่จะศึกษาเพิ่มเติม นอกจากนั้นควรมีการศึกษาเพื่อที่จะสามารถนำไปใช้ในขนาดที่เป็นอุตสาหกรรมได้ ทางด้านเศรษฐศาสตร์ก็จำเป็นต้องศึกษาเพิ่มเติม เนื่องจากปัจจุบันผักตบชวา กับน้ำเสียจากฟาร์มสุกรยังไม่มีตลาดซื้อขายอย่างชัดเจน แต่หากมันสำปะหลังนั้นมีการซื้อขายกันโดยทั่วไปเมื่อขยายปริมาณการใช้ในระดับอุตสาหกรรม ราคาต้นทุนที่เพิ่มขึ้นเป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องศึกษา ถึงแม้ว่าการผสมกากแป้งมันสำปะหลังมากขึ้นจะส่งผลดีต่อการหมักที่ดีขึ้น แต่อาจจะไม่ส่งผลที่คุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ซึ่งเป็นสิ่งที่จำเป็นต้องศึกษา นอกจากราคาของวัตถุดิบที่นำมาทำการหมักแบบผสมแล้วราคาขนส่งก็ถือเป็นสิ่งที่จำเป็นต้องนำมาพิจารณาเพิ่มเติม โดยจำเป็นต้องหาราคาขนส่งวัตถุดิบที่เหมาะสม การตั้งโรงไฟฟ้าให้อยู่ระหว่าง แหล่งวัตถุดิบจะเป็นการดีที่สุด

เอกสารอ้างอิง

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2558). แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558 – 2579. กรุงเทพฯ: กระทรวงพลังงาน.
- บริษัท ห้องปฏิบัติการกลาง (ประเทศไทย) จำกัด. (2558). รายงานผลการทดลอง. กรุงเทพฯ: บริษัท ห้องปฏิบัติการกลาง (ประเทศไทย) จำกัด.
- ผดุงวิทย์ หงษ์สามารถ, นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์, สุจินดา กรรณสูตร, คณิดา ตังคณานุรักษ์ และวิทยา ปันสุวรรณ. (2556). การทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ด้วยผงดูดซับจากชีวมวลสำหรับเครื่องผลิตไบโอดีเซล KUB-200. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- ส่วนเศรษฐกิจภาคสำนักงานภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ธนาคารแห่งประเทศไทย. (2558). รายงานสถานการณ์ราคาเอทานอลของไทย ปี 2558. กรุงเทพฯ: ธนาคารแห่งประเทศไทย.
- Abu-Dahrieh, J., Orozco, A., Groom, E., & Rooney, D. (2011). Batch and continuous biogas production from grass silage liquor. *Bioresource Technology*, 102(23), 10922–10928. doi:10.1016/j.biortech.2011.09.072
- Alani, D. I., & Moo-Young, M. (1986). Perspectives in biotechnology and applied microbiology. Retrieved from <http://link.springer.com/book/10.1007%2F978-94-009-4321-6>
- Bothi, K. L. (2007). Characterization of biogas from anaerobically digested dairy waste for energy use. Retrieved from https://ecommons.cornell.edu/bitstream/handle/1813/5329/Bothi_BEETesis.pdf;sequence=1
- Bozano, P., Nosiglia, V., & Vitali, G. (2012). Co-digestion of biowaste and commercial waste with agricultural residues – experiences from Castelleone (Italy). Retrieved from http://www.bioteconsistemi.it/media/cms/PBozanoPaperVenice2012_rev1.pdf
- Callaghan, F. J., Wase, D. A. J., Thayanithy, K., & Forster, C. F. (2002). Continuous co-digestion of cattle slurry with fruit and vegetable wastes and chicken manure. *Biomass and Bioenergy*, 22(1), 71–77. doi:10.1016/S0961-9534(01)00057-5
- Eaton, A. D., Clesceri, L. S., Rice, E. W., Greenberg, A. E., & Franson, M. A. H. (2005). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, by Eaton, 21st Centennial Edition. Retrieved from http://www.mwa.co.th/download/file_upload/SMWW_1000-3000.pdf
- Giraldo, E., & Garzón, A. (2002). The potential for water hyacinth to improve the quality of Bogota river water in the Muña reservoir: Comparison with the performance of waste stabilization ponds. *Water Science and Technology : A Journal of the International Association on Water Pollution Research.*, 45(1), 103–110. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11833723>

- Kayhanian, M., & Hardy, S. (1994). The impact of four design parameters on the performance of a high-solids anaerobic digestion of municipal solid waste for fuel gas production. *Environmental Technology*, 15(6), 557–567. doi:10.1080/09593339409385461
- Li, Y., Park, S. Y., & Zhu, J. (2011). Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 821–826. doi:10.1016/j.rser.2010.07.042
- Møller, H. B., Sommer, S. G., & Ahring, B. K. (2004). Methane productivity of manure, straw and solid fractions of manure. *Biomass and Bioenergy*, 26(5), 485–495. doi:10.1016/j.biombioe.2003.08.008
- Ozturk, B. (2012). Evaluation of Biogas production yields of different waste materials. *Earth Science Research*, 2(1), 165. doi:10.5539/esr.v2n1p165
- Panichnumsin, P., Nopharatana, A., Ahring, B., & Chaiprasert, P. (2010). Production of methane by co-digestion of cassava pulp with various concentrations of pig manure. *Biomass and Bioenergy*, 34(8), 1117–1124. doi:10.1016/j.biombioe.2010.02.018
- Puyuelo, B., Ponsá, S., Gea, T., & Sánchez, A. (2011). Determining C/N ratios for typical organic wastes using biodegradable fractions. *Chemosphere*, 85(4), 653–659. doi:10.1016/j.chemosphere.2011.07.014
- Robles-Gonzalez, V., Lopez-Lopez, E., Martinez-Jeronimo, F., Ortega-Clemente, A., Ruiz-Ordaz, N., Galindez-Mayer, J., Rinderknecht-Seijas, N. and Poggi-Varaldo, H.M. (2010). Combined treatment of mezcal vinasses by ozonation and aerobic biological post-treatment. *Proceedings of 14th International Biotechnology Symposium*. Rimini, Italy.
- Wang, X., Yang, G., Feng, Y., Ren, G., & Han, X. (2012). Optimizing feeding composition and carbon–nitrogen ratios for improved methane yield during anaerobic co-digestion of dairy, chicken manure and wheat straw. *Bioresource Technology*, 120, 78–83. doi:10.1016/j.biortech.2012.06.058
- Yusuf, M. O. L., & Ify, N. L. (2011). The effect of waste paper on the kinetics of biogas yield from the co-digestion of cow dung and water hyacinth. *Biomass and Bioenergy*, 35(3), 1345–1351. doi:10.1016/j.biombioe.2010.12.033