



ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนและจลนพลศาสตร์ของการหมักร่วมระหว่าง เศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร

ณัฐพล เสวตบุตร ดาวรุ่ง สังข์ทอง* นภวรรณ รัตสุข และ อุมารัจน์ สันติสุขเกษม

ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยศิลปากร

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: sungthong_d@su.ac.th

วันที่รับบทความ: 10 พฤษภาคม 2566; วันที่ทบทวนบทความ: 26 มิถุนายน 2566; วันที่ตอบรับบทความ: 4 กรกฎาคม 2566

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 1 พฤศจิกายน 2566

บทคัดย่อ: การย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศโดยการหมักร่วมได้รับการพิสูจน์แล้วว่าเป็นอีกเทคโนโลยีหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มปริมาณการผลิตก๊าซมีเทนให้สูงขึ้นได้ การศึกษานี้จึงทำการตรวจสอบถึงศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนโดยการหมักร่วมระหว่างเศษอาหาร (Food Waste, FW) และผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร (Cellulose-based Food Packaging Product, CFPP) ที่อุณหภูมิระดับปานกลาง (35 ± 2 องศาเซลเซียส) ในรูปแบบกะ (Batch Experiment) เป็นระยะเวลา 45 วัน โดยอัตราส่วนระหว่างวัสดุตั้งต้นทั้ง 2 ชนิดที่ทำการศึกษามี 3 อัตราส่วน (FW/CFPP 100:0, 40:60 และ 0:100 (โดยน้ำหนักของแข็งระเหยง่าย)) และมีการใช้อัตราส่วนระหว่างวัสดุตั้งต้นและหัวเชื้อจุลินทรีย์เท่ากับ 0.5 รวมทั้งมีการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) เพื่อให้กระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศอยู่ในสภาวะสมดุล นอกจากนี้ได้มีการนำโมเดลทางคณิตศาสตร์ จำนวน 4 โมเดล (Modified Gompertz Model, First-order Model, Monod Model และ Cone Model) มาใช้ในการประเมินความเหมาะสมของการทำนายผลผลิตก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจากวัสดุตั้งต้นอัตราส่วนต่าง ๆ ด้วย ผลการศึกษา พบว่า อัตราส่วน FW/CFPP 100:0 ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมสูงที่สุด รองลงมาคือ 40:60 และ 0:100 โดยมีค่าผลผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ 459.15, 381.79 และ 355.60 มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย ตามลำดับ และจากโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่ทำการศึกษาทั้งหมด พบว่า Modified Gompertz Model เป็นโมเดลที่มีความแม่นยำและเหมาะสมมากที่สุดในการใช้ทำนายผลผลิตก๊าซมีเทนของอัตราส่วน FW/CFPP 100:0 และ 0:100 แต่สำหรับอัตราส่วน FW/CFPP 40:60 พบว่า First-order Model เป็นโมเดลที่มีความแม่นยำและเหมาะสมมากกว่า Modified Gompertz Model นอกจากนี้ พารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ ได้แสดงให้เห็นว่า การหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร (FW/CFPP 40:60) มีการผลิตก๊าซมีเทนในอัตราที่เร็วกว่าการหมักโดยใช้เศษอาหารหรือผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารเพียงอย่างเดียว

คำสำคัญ: ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน; เศษอาหาร; ผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร; การหมักร่วม; จลนพลศาสตร์

Biochemical Methane Potential and Kinetics on Anaerobic Co-digestion of Food Waste and Cellulose-based Food Packaging Product

Nattapon Sawettabut, Daoroong Sungthong^{*}, Nopawan Ratasuk and Umarat Santisukkasaem

Department of Environmental Science, Faculty of Science, Silpakorn University

^{*} Corresponding author, E-mail: sungthong_d@su.ac.th

Received: 10 May 2023; Revised: 26 June 2023; Accepted: 4 July 2023

Online Published: 1 November 2023

Abstract: Anaerobic co-digestion is proven to be a promising technology for enhancing the production of methane. In this study, the biochemical methane potential (BMP) from anaerobic co-digestion of food waste (FW) and cellulose-based food packaging product (CFPP) was carried out under mesophilic ($35 \pm 2^\circ\text{C}$) condition in a batch mode for 45 days. Three mixing ratios of these two substrates (FW/CFPP 100:0, 40:60, and 0:100 based on volatile solids (VS)) were studied with a substrate-to-inoculum ratio of 0.5. Sodium bicarbonate (NaHCO_3) was also added to establish a stable anaerobic digestion process. In addition, four mathematical models (Modified Gompertz model, First-order model, Monod model, and Cone model) were employed to evaluate their suitability for predicting the methane production of the examined substrates. Based on the obtained results, it is found that the maximum cumulative methane yield was observed in FW/CFPP 100:0, followed by 40:60 and 0:100 with the values of 459.15, 381.79, and 355.60 NmL/gVS , respectively. Among all the studied kinetic models, it can be seen that the Modified Gompertz model was the most accurate and appropriate in predicting the methane production of FW/CFPP 100:0 and 0:100. However, in the case of FW/CFPP 40:60, the First-order model was found to be a better fit than the Modified Gompertz model. Besides, their kinetic parameters reveal that the co-digestion of FW/CFPP 40:60 had a faster methane production rate than the mono-digestion of FW or CFPP.

Keywords: Biochemical methane potential; Food waste; Cellulose-based food packaging product; Co-digestion; Kinetics



1. บทนำ

ปัจจุบันกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศ (Anaerobic Digestion) ได้รับการพัฒนาขึ้นมากจนสามารถแข่งขันกับกระบวนการย่อยสลายแบบใช้อากาศได้เป็นอย่างดี โดยได้รับความนิยมในการนำไปใช้บำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมและขยะอินทรีย์ที่มีภาระบรรทุกสารอินทรีย์สูง ทั้งนี้การย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศเป็นกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพที่อาศัยกลุ่มจุลินทรีย์ที่มีความจำเพาะ ทำหน้าที่ย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพโดยไม่ใช้ออกซิเจน เกิดผลพลอยได้เป็นก๊าซชีวภาพที่มีองค์ประกอบหลักเป็นก๊าซมีเทน ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ส่งผลให้กระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศเพื่อการบำบัดของเสียได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก แต่อย่างไรก็ตาม การย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศโดยใช้วัสดุตั้งต้นเพียงชนิดเดียว มักมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (Carbon to Nitrogen Ratio, C/N ratio) ที่ไม่สมดุลต่อการทำงานของระบบส่งผลให้ระบบมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพลดลง และอาจทำให้ระบบการย่อยสลายล้มเหลว

จากรายงานการวิจัยเมื่อไม่นานมานี้ของ Yang, et al. [1] พบว่า การศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศโดยการหมักร่วม (Anaerobic Co-digestion) มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นทุกปี ทั้งนี้การย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศโดยการหมักร่วมเป็นกระบวนการย่อยสลายของวัสดุตั้งต้นตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป ซึ่งมีลักษณะส่งเสริมซึ่งกันและกันและเป็นประโยชน์ต่อกระบวนการย่อยสลาย นอกจากนี้ยังทำให้ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบลดลงและทำให้กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพมีประสิทธิภาพสูงขึ้นได้อย่างมีนัยสำคัญ [2]

ด้วยเหตุและผลดังที่กล่าวมาข้างต้น คณะผู้วิจัยจึงให้ความสนใจในการศึกษาถึงการใช้องค์ประกอบเศษอาหารซึ่งจัดเป็นองค์ประกอบหลักของขยะมูลฝอยชุมชน โดยนำมาหมักร่วมกับผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารที่ผลิตจากเยื่อชานอ้อยผสมกับเยื่อไผ่ ซึ่งในปัจจุบันจัดเป็นขยะมูลฝอยอีกประเภทหนึ่งซึ่งมีแนวโน้มจะมีปริมาณมากขึ้นในอนาคต เนื่องจากได้รับการณรงค์ให้นำมาใช้แทนบรรจุภัณฑ์พลาสติกประเภทต่าง ๆ ทั้งนี้ผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารเป็นวัสดุชีวโกลินเซลลูโลส มีอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจนสูง จัดเป็นวัสดุที่มีศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทน แต่อย่างไรก็ตาม หากนำมาใช้เป็นวัสดุตั้งต้นเพียงชนิดเดียวในการผลิตก๊าซมีเทน ก็จะส่งผลให้มีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนในระดับต่ำ ดังนั้น การหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารจึงเป็นทางเลือกที่ดีทั้งในด้านการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนเพื่อผลิตพลังงานทดแทนและการแก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อมโดยการลดปริมาณขยะมูลฝอยที่นำไปกำจัดในหลุมฝังกลบ การวิจัยนี้จึงได้ดำเนินการศึกษาถึงศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน (Biochemical Methane Potential, BMP) โดยการหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร และศึกษาพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของการผลิตก๊าซมีเทนที่เกิดจากการหมักร่วมของวัสดุตั้งต้นทั้ง 2 ชนิดดังกล่าว ซึ่งผลที่ได้จากการศึกษานี้สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนการเพิ่มประสิทธิภาพและการควบคุมการดำเนินงานที่เหมาะสมของกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศโดยการหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและ



ผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารในระบบที่มีขนาดใหญ่ต่อไปได้

2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

2.1 การเตรียมวัสดุตั้งต้น

2.1.1 เศษอาหาร

เศษอาหารที่ใช้ในการศึกษาเป็นเศษอาหารที่สังเคราะห์ขึ้น (Synthetic food waste, FW) โดยเตรียมให้มีองค์ประกอบต่าง ๆ เช่นเดียวกับที่ปรากฏในการศึกษาของ Abbas, et al. [3], Radu, et al. [4], Wang, et al. [5] และ Ariunbaatar, et al. [6] ทั้งนี้มีรายละเอียดของสูตรอาหารและสัดส่วนการเตรียมดังตารางที่ S1 (Supplementary) สำหรับการเตรียมเศษอาหารสังเคราะห์นั้น ดำเนินการโดยนำวัสดุชนิดต่าง ๆ ตามสัดส่วนที่ระบุไว้มาบดให้ละเอียดด้วยเครื่องบดอาหาร แล้วบรรจุลงในถุงพลาสติก และนำไปเก็บรักษาในตู้แช่แข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่า -20 องศาเซลเซียส และนำออกมาวางทิ้งไว้ข้ามคืนที่อุณหภูมิห้องเพื่อให้น้ำแข็งละลายก่อนเริ่มใช้งาน สำหรับลักษณะทางกายภาพและทางเคมีที่สำคัญของเศษอาหารสังเคราะห์ มีรายละเอียดแสดงดังตารางที่ S2 (Supplementary)

2.1.2 ผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร

ผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร (Cellulose-based Food Packaging Product, CFPP) ที่นำมาใช้ในการศึกษาวิจัยเป็นภาชนะรองรับอาหารที่ผลิตจากเยื่อชานอ้อยผสมเยื่อไผ่ไม่เคลือบพลาสติก มีชื่อเรียกทางการค้าว่า เกรซ ซิมเปิล (Grac simple) ผ่านการเตรียมโดยนำมาตัดให้มีขนาดประมาณ 5 x 5 มิลลิเมตร และนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 ± 2 องศาเซลเซียส เพื่อกำจัดความชื้น และเก็บรักษาไว้ในถุงพลาสติก

ณ อุณหภูมิห้อง ก่อนใช้งาน ทั้งนี้ผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารมีลักษณะทางกายภาพและทางเคมีที่สำคัญแสดงดังตารางที่ S2 (Supplementary)

2.2 หัวเชื้อจุลินทรีย์

หัวเชื้อจุลินทรีย์ (Inoculum) ที่ใช้ในการศึกษาเป็นตะกอนจุลินทรีย์ที่เก็บมาจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบชั้นตะกอนจุลินทรีย์ไร้อากาศแบบไหลขึ้น (Up-flow Anaerobic Sludge Blanket, UASB) ของบริษัท เสริมสุข จำกัด (มหาชน) โรงงานปทุมธานี ตะกอนจุลินทรีย์มีลักษณะเป็นเม็ด (Granule) สีดำ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.5 – 2 มิลลิเมตร ก่อนนำมาใช้เป็นหัวเชื้อจุลินทรีย์ ได้มีการล้างตะกอนด้วยสารละลายอาหารสำหรับหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ปราศจากออกซิเจนและนำไปบ่มเบื้องต้นในถังปฏิกรณ์แบบไม่ใช้ออกซิเจนที่อุณหภูมิ 35 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 7 วัน เพื่อลดปริมาณสารอินทรีย์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่อาจตกค้างอยู่ในตะกอนจุลินทรีย์ [7] สำหรับหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่เตรียมได้ มีลักษณะทางกายภาพและทางเคมีที่สำคัญแสดงดังตารางที่ S2 (Supplementary)

2.3 การศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนโดยการหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร

ในการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนโดยการหมักร่วมระหว่างวัสดุตั้งต้นทั้ง 2 ชนิดดังกล่าวได้ดำเนินการตามวิธีที่ระบุไว้ใน Angelidaki, et al. [7] และ Hansen, et al. [8] มีการทดลองเป็นแบบกะ (Batch Experiment) และมีการดัดแปลงวิธีดำเนินการทดลองบางส่วน เพื่อให้มีความเหมาะสมกับการศึกษานี้

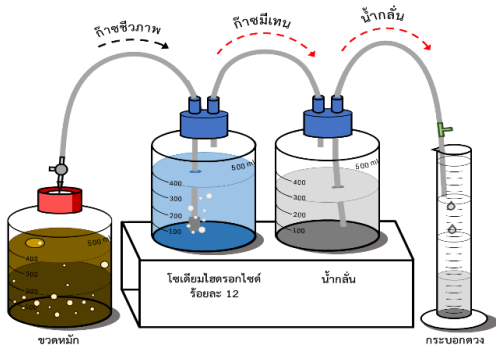


อัตราส่วนระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร (FW/CFPP) ที่ทำการศึกษามี 3 อัตราส่วน ได้แก่ 100:0, 40:60 และ 0:100 (โดยน้ำหนักของแข็งระเหยง่าย) การทดลองดำเนินการในขวดแก้วขนาด 500 มิลลิลิตร โดยในแต่ละอัตราส่วน (ชุดทดลอง) เมื่อเริ่มต้นการหมักได้ใส่วัสดุตั้งต้นที่มีความเข้มข้นของของแข็งระเหยง่ายเท่ากับ 5 กรัม ลงในขวดหมัก จากนั้นเติมหัวเชื้อจุลินทรีย์โดยกำหนดให้มีอัตราส่วนระหว่างหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นเท่ากับ 2 (10 กรัมของแข็งระเหยง่าย) และเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต จำนวน 2.69 กรัม เพื่อให้ของผสมภายในขวดหมักมีปริมาณความเป็นด่าง (Alkalinity) เริ่มต้นประมาณ 4,000 มิลลิกรัมแคลเซียมคาร์บอเนตต่อลิตร [9] ต่อมาเติมน้ำกลั่นปราศจากออกซิเจนลงในขวดหมักจนของผสมภายในขวดหมักมีปริมาตร 400 มิลลิลิตร ปิดปากขวดหมักด้วยจุกยางและรัดให้แน่นด้วยฝาพลาสติกชนิดเกลียวมีรู ทางเข็มฉีดยาซึ่งต่ออยู่กับวาล์วสามทางผ่านจุกยางที่ปิดขวดหมัก เพื่อใช้เป็นอุปกรณ์ระบายก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในขวดหมักไปยังอุปกรณ์วัดปริมาณก๊าซมีเทน หลังจากนั้นนำขวดหมักไปวางไว้ในตู้บ่มที่ควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ที่ 35 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 45 วัน และตลอดระยะเวลาของการหมัก มีการเขย่าขวดหมักเป็นครั้งคราว สัปดาห์แรกของการหมัก ทำการตรวจวัดปริมาณก๊าซมีเทนทุกวัน หลังจากนั้นตรวจวัดเป็นครั้งคราว และเมื่อเริ่มต้นและสิ้นสุดกระบวนการย่อยสลายมีการตรวจวัดพารามิเตอร์สำคัญที่ละลายอยู่ในส่วนที่เป็นของเหลวเพื่อนำมาใช้ประเมินความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบ ได้แก่ พีเอช กรดไขมันระเหยง่าย ความเป็นด่าง

และแอมโมเนียในโตรเจนทั้งหมด นอกจากนี้ได้ทำขวดหมักที่ไม่ใส่วัสดุตั้งต้น แต่ใส่หัวเชื้อจุลินทรีย์เพียงอย่างเดียว (ชุดควบคุม) และดำเนินการตามขั้นตอนต่าง ๆ ในสภาวะเดียวกันกับที่กล่าวมาข้างต้นด้วย ทั้งนี้ในทุกชุดทดสอบ (ชุดทดลองและชุดควบคุม) มีการดำเนินการ 3 ซ้ำ

สำหรับการวัดปริมาณก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในขวดหมักใช้วิธีการผ่านก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นไปยังสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 12 เพื่อดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ทำให้คงเหลือไว้เพียงก๊าซมีเทนซึ่งสามารถทราบปริมาณได้โดยการแทนที่น้ำ (รูปที่ 1) ทั้งนี้ปริมาณก๊าซมีเทนที่วัดได้จากขวดหมักของชุดทดลองเป็นผลรวมของก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายของวัสดุตั้งต้นและการย่อยสลายตัวเองของหัวเชื้อจุลินทรีย์ ส่วนปริมาณก๊าซมีเทนที่วัดได้จากขวดหมักชุดควบคุมเป็นปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายตัวเองของหัวเชื้อจุลินทรีย์เพียงอย่างเดียว

ทั้งนี้ ข้อมูลปริมาณก๊าซมีเทนที่ได้จากการติดตามระบบการย่อยสลายของทุกชุดทดสอบ (ผลต่างระหว่างปริมาณก๊าซมีเทนของชุดทดลองและชุดควบคุม) ได้นำมาคำนวณเป็นปริมาณก๊าซมีเทนที่สภาวะมาตรฐาน (Standard Temperature and Pressure, STP) นั่นคือที่ อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บรรยากาศ จากนั้นได้นำข้อมูลปริมาณก๊าซมีเทนที่สภาวะมาตรฐานมาคำนวณเป็นผลผลิตก๊าซมีเทน (Methane Yield, Y) ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นถึงศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นตลอดระยะเวลา 45 วันได้



รูปที่ 1 การวัดปริมาณก๊าซมีเทนจากก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในขวดหมัก

2.4 วิธีวิเคราะห์

การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีบางประการของวัสดุตั้งต้นและหัวเชื้อจุลินทรีย์ (ตารางที่ 1) ใช้วิธีตามที่จะระบุอยู่ในวิธีการมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์น้ำและน้ำเสียของ APHA, et al. [10] และตามวิธีที่จะระบุอยู่ใน USEPA [11] หรือที่อื่น เช่น Nelson and Sommers [12], Fagbenro and Oyeleye [13], ASTM International [14] เป็นต้น ส่วนการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ละลายอยู่ในส่วนที่เป็นของเหลวเมื่อเริ่มต้นและสิ้นสุดกระบวนการย่อยสลาย ใช้วิธีตามที่จะระบุอยู่ในวิธีการมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์น้ำและน้ำเสียของ APHA, et al. [10]

2.5 จลนพลศาสตร์ของการหมักร่วม

โมเดลทางคณิตศาสตร์ที่นำมาศึกษา จำนวน 4 โมเดล ซึ่งได้แก่ Modified Gompertz Model, First-order Model, Monod Model และ Cone Model [15] มีรูปแบบของสมการเชิงคณิตศาสตร์แสดงดังสมการที่ (1) – (4) ตามลำดับ

สำหรับการประมาณค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ในสมการตัวแบบของโมเดลต่าง ๆ ใช้

รูปแบบการวิเคราะห์ถดถอยที่ไม่ใช่เชิงเส้น (Nonlinear Regression) ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Method of Least Squares) และประเมินความแม่นยำในการทำนายผลผลิตก๊าซมีเทนของแต่ละโมเดลโดยพิจารณาสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination, R^2) ร้อยละความแตกต่างระหว่างผลผลิตก๊าซมีเทนจากการทำนายและผลผลิตก๊าซมีเทนจากการทดลอง (%Error) และรากที่สองของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (Root Mean Square Error, RMSE)

$$Y_t = Y_0 \cdot \exp \left\{ -\exp \left[\frac{\mu_m}{Y_0} \cdot \exp(\lambda \cdot t) + 1 \right] \right\} \quad (1)$$

$$Y_t = Y_0 \cdot [1 - \exp(-k \cdot t)] \quad (2)$$

$$Y_t = Y_0 \cdot \left[\frac{(k \cdot t)}{1 + (k \cdot t)} \right] \quad (3)$$

$$Y_t = \frac{Y_0}{1 + (k \cdot t)^{-n}} \quad (4)$$

เมื่อ Y_t คือ ผลผลิตก๊าซมีเทนจากการทำนาย (มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย) ตลอดระยะเวลาการหมัก t

Y_0 คือ ผลผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดจากการทำนาย (มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย)

μ_m คือ อัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด (มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย-วัน)

λ คือ ระยะเวลาปรับตัว (วัน)

t คือ ระยะเวลาการในการหมัก (วัน)

k คือ ค่าคงที่ของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (สำหรับ First-order Model) หรือ ค่าคงที่ของอัตรา

(สำหรับ Monod Model และ Cone Model ต่อวัน)

n คือ แฟกเตอร์รูปร่าง (Shape Factor)



3. ผลการทดลองและการอภิปรายผล

3.1 ลักษณะของวัสดุตั้งต้นและหัวเชื้อจุลินทรีย์

เศษอาหาร มี TS ร้อยละ 16.37 ส่วนผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร มี TS ร้อยละ 98.47 และใน TS มี VS เป็นองค์ประกอบสูงถึงร้อยละ 96.35 และ 99.51 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่า VS ซึ่งมีค่าค่อนข้างสูง รวมทั้งค่า OC ซึ่งมีปริมาณมากกว่าร้อยละ 50 แสดงให้เห็นว่า เศษอาหาร และผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารอุดมไปด้วยสารอินทรีย์ แสดงว่ามีศักยภาพในการนำไปใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศเพื่อผลิตก๊าซมีเทนได้ แม้ว่าเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารจะมีปริมาณ OC ที่ไม่แตกต่างกันมากนัก แต่เศษอาหารมี TKN ในปริมาณที่สูงกว่ามาก ส่งผลให้เศษอาหารมีอัตราส่วน C/N เท่ากับ 12 ซึ่งต่ำกว่าค่าที่เหมาะสม (20 – 30) สำหรับกระบวนการย่อยสลาย [16] จึงมีความเป็นไปได้ว่า หากนำไปใช้ในกระบวนการหมักภายใต้สภาวะไร้อากาศเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ อาจทำให้ระบบขาดประสิทธิภาพอันเนื่องมาจากการขาดแคลนคาร์บอน ส่วนผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร แม้ว่าอุดมไปด้วยสารอินทรีย์ และประกอบด้วยส่วนที่ย่อยสลายได้ง่ายถึงร้อยละ 80 (เซลลูโลส) แต่ก็มีส่วนที่ย่อยสลายได้ยากถึงร้อยละ 20 (เฮมิเซลลูโลสและลิกนิน) นอกจากนี้ยังมี TKN ต่ำมาก จึงส่งผลให้มีค่าอัตราส่วน C/N สูงถึง 460 แสดงให้เห็นว่า ผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารเป็นสารอินทรีย์ที่เกิดการย่อยสลายได้ค่อนข้างยากและเกิดการย่อยสลายได้ช้ามากเนื่องจากการขาดแคลนไนโตรเจนซึ่งเป็นสารอาหารสำหรับการเจริญเติบโต

ของจุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ

หัวเชื้อจุลินทรีย์มีค่า pH เท่ากับ 6.94 ซึ่งมีค่าที่ค่อนข้างเป็นกลาง มีความเหมาะสมกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ นอกจากนี้ยังมี VS สูงถึงร้อยละ 91.22 แสดงให้เห็นว่า หัวเชื้อจุลินทรีย์มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นมวลชีวภาพของจุลินทรีย์

3.2 ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน

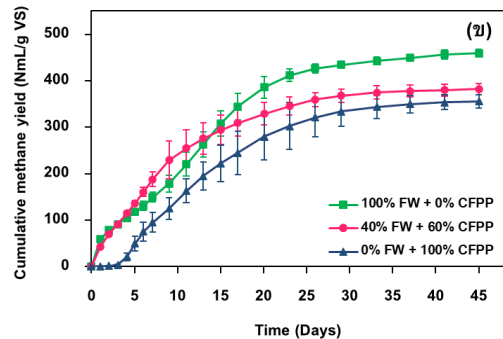
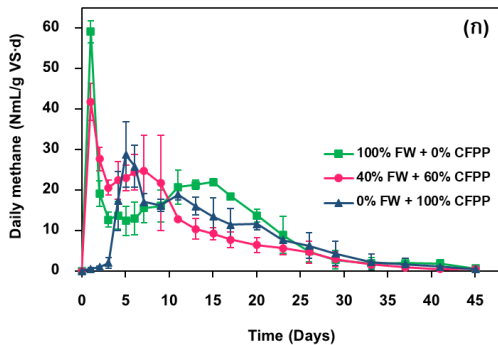
3.2.1 ก๊าซมีเทนรายวันและผลผลิตก๊าซมีเทน

เมื่อพิจารณาปริมาณก๊าซมีเทนรายวัน (Daily Methane) จากรูปที่ 2 (ก) จะเห็นว่า FW/CFPP 100:0 และ 40:60 มีก๊าซมีเทนเกิดขึ้นตั้งแต่วันแรกของการหมัก และเกิดขึ้นเป็นปริมาณสูงสุด ส่วน FW/CFPP 0:100 เริ่มสังเกตเห็นก๊าซมีเทนเกิดขึ้นในวันที่ 3 และมีปริมาณสูงสุดในวันที่ 5 แสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่า เศษอาหารเป็นสารอินทรีย์ที่มีความสามารถในการย่อยสลายสูงจึงเกิดการย่อยสลายกลายเป็นก๊าซมีเทนได้อย่างรวดเร็ว ส่วนผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารมีความสามารถในการย่อยสลายต่ำ ระบบต้องอาศัยการปรับตัวเป็นระยะเวลาหนึ่ง จึงสามารถสร้างก๊าซมีเทนได้

เมื่อพิจารณาลักษณะการเติบโตของเส้นกราฟผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมของทั้ง 3 อัตราส่วน (รูปที่ 2 (ข)) ได้แก่ FW/CFPP 100:0, 40:60 และ 0:100 ซึ่งมีอัตราส่วน C/N เท่ากับ 12, 25 และ 460 ตามลำดับ จะเห็นว่า การย่อยสลายของทั้ง 3 อัตราส่วน มีลักษณะที่เป็นปกติ สอดคล้องกับลักษณะทางเคมีกายภาพของตัววัสดุตั้งต้น กล่าวคือ FW/CFPP 100:0 และ 40:60 เป็นวัสดุตั้งต้นที่ย่อยสลายได้ง่าย จึงสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้ทันที ส่วน FW/CFPP 0:100 เป็นวัสดุตั้งต้นที่



บทความวิจัย



รูปที่ 2 (ก) ปริมาณก๊าซมีเทนรายวัน และ (ข) ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสม ของกระบวนการย่อยสลายระหว่างเศษอาหาร และผลิตภัณฑ์เชื้อชีวภาพบรรจุอาหารที่สภาวะมาตรฐาน

ย่อยสลายได้ยากกว่า จึงต้องการระยะเวลาในการปรับตัวก่อนการผลิตก๊าซมีเทน นอกจากนี้ก็ไม่พบว่าการยับยั้งการผลิตก๊าซมีเทนที่รุนแรงเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการย่อยสลายของทั้ง 3 อัตราส่วน โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับ FW/CFPP 100:0 ที่มีอัตราส่วน C/N ต่ำกว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการย่อยสลาย ซึ่งเป็นสาเหตุที่จะทำให้เกิดการสะสมของ VFAs และแอมโมเนียในปริมาณมากจนส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบหรือเกิดการยับยั้งการผลิตก๊าซมีเทนได้ ทั้งนี้การไม่เกิดการยับยั้ง จากผลกระทบดังกล่าวมาในระบบการย่อยสลายของ FW/CFPP 100:0 ก็เป็นเพราะการมีอยู่ของโซเดียมไบคาร์บอเนตที่ช่วยรักษาความเป็นด่างของระบบให้คงอยู่ในระดับที่เหมาะสม (1,000 – 5,000 มิลลิกรัมแคลเซียมคาร์บอเนตต่อลิตร) ตลอดระยะเวลาการย่อยสลาย [9] จึงสามารถป้องกันความล้มเหลวในการผลิตก๊าซมีเทนไม่ให้เกิดขึ้นได้

เมื่อพิจารณาผลผลิตก๊าซมีเทนสะสม ตลอดระยะเวลาการย่อยสลาย 45 วัน พบว่า FW/CFPP 100:0, 40:60 และ 0:100 ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมเท่ากับ 459.15 ± 8.57 , 381.79 ± 11.48 และ $355.60 \pm$

14.03 มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่ายตามลำดับ และในแต่ละอัตราส่วนมีผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมถึงระดับร้อยละ 80 ภายในระยะเวลา 20, 17 และ 20 วัน ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนของ FW/CFPP 40:60 กับ FW/CFPP 0:100 จะเห็นว่า FW/CFPP 40:60 มีอัตราเร็วในการผลิตก๊าซมีเทนสูงกว่าตลอดระยะเวลาของการย่อยสลายทั้ง 45 วัน ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสูงมากกว่า คิดเป็นร้อยละ 7.4 และมีผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมถึงระดับร้อยละ 80 เร็วกว่าเป็นระยะเวลา 3 วัน นอกจากนี้ระบบไม่ต้องการระยะเวลาปรับตัวสำหรับการย่อยสลาย ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เชื้อชีวภาพบรรจุอาหาร อัตราส่วน 40:60 ซึ่งมีอัตราส่วน C/N เท่ากับ 25 ส่งผลดีต่อการผลิตก๊าซมีเทนทั้งในด้านอัตราเร็วและปริมาณการผลิตที่สูงกว่า การหมักโดยใช้ผลิตภัณฑ์เชื้อชีวภาพบรรจุอาหารเพียงอย่างเดียวซึ่งมีอัตราส่วน C/N สูงถึง 460

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนของ FW/CFPP 100:0 กับ FW/CFPP 40:60 โดย



มองข้ามผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมของ FW/CFPP 100:0 ที่สูงมากกว่า FW/CFPP 40:60 ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 20 ก็ จะเห็นว่า FW/CFPP 40:60 ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสม ถึงระดับร้อยละ 80 เร็วกว่า เป็นระยะเวลา 3 วัน นอกจากนี้ จะเห็นได้ว่า ในช่วงวันที่ 1 – 13 อัตราส่วน FW/CFPP 40:60 มีเส้นกราฟที่ชันมากกว่า แสดงให้ เห็นว่า FW/CFPP 40:60 มีอัตราเร็วในการผลิตก๊าซ มีเทนที่สูงมากกว่า ซึ่งบ่งชี้ได้ว่า การหมักร่วมระหว่าง เศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร มีลักษณะส่งเสริมซึ่งกันและกันในทางบวกต่อ กระบวนการย่อยสลาย และทำให้ระบบมีเสถียรภาพ ที่ดีกว่า

3.2.2 การตรวจติดตามพารามิเตอร์ควบคุม กระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศ

ตารางที่ 1 แสดงการเปลี่ยนแปลงของ pH, VFAs, Alk และ TAN ที่ละลายอยู่ในส่วนที่เป็นของเหลวในขวด หมักเมื่อเริ่มต้น (Initial Stage) และสิ้นสุด (Final Stage) กระบวนการย่อยสลายของทุกอัตราส่วน

ค่า pH เริ่มต้นของทุกอัตราส่วน มีค่าตั้งแต่ 6.99 – 8.07 ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงหรืออยู่ในช่วง pH ที่ เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กลุ่มอาร์ เดียที่ทำหน้าที่สร้างมีเทน (7.0 – 8.5) และเมื่อสิ้นสุด กระบวนการย่อยสลาย พบว่า ทุกอัตราส่วนมีค่า pH ลดลงจากเมื่อเริ่มต้น แต่ยังคงอยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับ ระบบการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศ

เนื่องจากมีการเติม Alk ในรูปของไบคาร์บอเนต ลงในขวดหมัก จึงเป็นสาเหตุทำให้เมื่อเริ่มต้นและสิ้นสุด กระบวนการย่อยสลาย ในทุกอัตราส่วนมี Alk เป็น ปริมาณมากกว่า 3,000 มิลลิกรัมแคลเซียมคาร์บอเนต ต่อลิตร ทำให้มีความเป็นด่างที่เพียงพอสำหรับสะเทิน

กรดไขมันระเหยง่ายชนิดต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่าง กระบวนการย่อยสลาย ส่งผลให้ระบบมีความสามารถในการ ต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดต่าง

เมื่อพิจารณาค่า VFAs เมื่อเริ่มต้นกระบวนการ ย่อยสลาย พบว่า FW/CFPP 100:0 มีปริมาณ VFAs ที่ พร้อมจะถูกย่อยสลายกลายเป็นก๊าซมีเทนสูงที่สุด (~1,300 มิลลิกรัมกรดอะซิติกต่อลิตร) รองลงมาคือ FW/CFPP 40:60 (~530 มิลลิกรัมกรดอะซิติกต่อลิตร) และ FW/CFPP 0:100 (~110 มิลลิกรัมกรดอะซิติกต่อ ลิตร) ซึ่งสอดคล้องกับการย่อยสลายของวัสดุตั้งต้นซึ่ง เป็นเศษอาหารซึ่งอุดมด้วยคาร์โบไฮเดรต ไขมัน และ โปรตีน ที่มีความสามารถในการย่อยสลายสูง และมี สัดส่วนสูงที่สุดใน FW/CFPP 100:0 และรองลงมาใน FW/CFPP 40:60 และ 0:100 ตามลำดับ และมีความสัมพันธ์กับปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นใน วันที่ 1 (รูปที่ 2) ที่พบว่า FW/CFPP 100:0 มีปริมาณ ก๊าซมีเทนเกิดขึ้นสูงที่สุด (~330 มิลลิตร) รองลงมาคือ FW/CFPP 40:60 (~223 มิลลิตร) และ FW/CFPP 0:100 (~3 มิลลิตร) ตามลำดับ และเมื่อสิ้นสุด กระบวนการย่อยสลาย พบว่า FW/CFPP 100:0 และ 40:60 มี VFAs น้อยกว่าเมื่อเริ่มต้น เติ ระบบค่อนข้างมาก แสดงให้เห็นว่า การย่อยสลายมีอัตราที่ ลดลงอย่างมาก โดย FW/CFPP 40:60 ซึ่งมีสัดส่วนของ เศษอาหารน้อยกว่า FW/CFPP 100:0 มีอัตราการลดลง ของ VFAs คิดเป็นร้อยละ 89 ซึ่งสูงกว่า FW/CFPP 100:0 ที่มีอัตราการลดลงของ VFAs คิดเป็นร้อยละ 66 ส่วน FW/CFPP 0:100 มี VFAs มากกว่าเมื่อเริ่มต้น เติระบบ คิดเป็นร้อยละ 69 แสดงให้เห็นว่า ผลิตภัณฑ์ เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร มีความสามารถในการ ย่อยสลายต่ำ ใช้ระยะเวลาในการไฮโดรไลซิสที่ยาวนาน



ตารางที่ 1 การเปลี่ยนแปลงของ pH, VFAs, Alk, VFAs/Alk และ TAN ที่ละลายอยู่ในส่วนที่เป็นของเหลวในขวดหมักเมื่อเริ่มต้น (Initial Stage) และสิ้นสุด (Final Stage) กระบวนการย่อยสลาย

Parameters		FW/CFPP Ratios		
		100:0	40:60	0:100
pH	Initial	6.99	7.71	8.07
	Final	7.51	7.36	7.16
VFAs (mg CH ₃ COOH/L)	Initial	1,273.04 ± 41.23	528.59 ± 13.25	106.89 ± 0.00
	Final	437.13 ± 14.43	60.62 ± 8.60	180.94 ± 18.76
Alk (mg CaCO ₃ /L)	Initial	4,227.60 ± 6.59	4,325.49 ± 13.18	4,465.32 ± 13.18
	Final	7,893.87 ± 119.90	5,184.36 ± 10.49	5,133.84 ± 0.00
TAN (mg N/L)	Initial	97.88 ± 5.54	90.05 ± 0.00	82.22 ± 0.00
	Final	1,066.24 ± 11.19	414.30 ± 13.22	219.58 ± 5.60

ก่อนเข้าสู่กระบวนการสร้างกรดและการสร้างมีเทน ส่งผลให้มี VFAs ในระบบสูงกว่าเมื่อเริ่มต้น และมีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนช้ากว่า FW/CFPP 100:0 และ 40:60 อย่างเห็นได้ชัด (รูปที่ 2) ทั้งนี้ปริมาณ VFAs เมื่อเริ่มต้นและสิ้นสุดกระบวนการย่อยสลายของทุกอัตราส่วนมีค่าน้อยกว่า 1,500 มิลลิกรัมกรดอะซิติกต่อลิตร ซึ่งเป็นค่าที่ไม่ส่งผลยับยั้งการเจริญเติบโตของอาร์เคียที่ทำหน้าที่ในการสร้างมีเทน

โดยทั่วไป การย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศมักมี TAN เกิดขึ้นเป็นปกติ ซึ่งเป็นผลมาจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่อุดมไปด้วยโปรตีนสำหรับ TAN ที่เกิดขึ้นในระบบนอกจากจะถูกใช้เป็นแหล่งอาหารของจุลินทรีย์กลุ่มอาร์เคียที่ทำหน้าที่สร้างมีเทนแล้วยังช่วยต้านทานการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดต่างของระบบอีกด้วย แต่หากในระบบมีความเข้มข้นของ TAN อยู่ในระดับสูง ก็จะทำให้เกิดความเป็นพิษกับอาร์เคียที่ทำหน้าที่ในการสร้างมีเทนได้ ทั้งนี้ปริมาณ TAN ภายในระบบควรมีค่าไม่เกิน 1,500 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร [9] และเมื่อพิจารณา

ปริมาณ TAN ในช่วงเริ่มต้นและสิ้นสุดการเดินระบบของทุกอัตราส่วน ดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่า มีค่าตั้งแต่ 82.22 – 1,066.24 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ซึ่งเป็นระดับที่ไม่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการย่อยสลาย

3.3 จลนพลศาสตร์ของการผลิตก๊าซมีเทน

ความสัมพันธ์ระหว่างผลผลิตก๊าซมีเทนที่ได้จากการทดลอง (Experimental) ของอัตราส่วน FW/CFPP 100:0, 40:60 และ 0:100 กับผลผลิตก๊าซมีเทนที่ได้จากการทำนาย (Predicted) โดยใช้ Modified Gompertz Model, First-order Model, Monod Model และ Cone Model แสดงดังรูปที่ S1 – S4 (Supplementary) ส่วนพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของตัวแบบทางคณิตศาสตร์โมเดลต่าง ๆ ตลอดจนสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R²) ร้อยละความแตกต่างระหว่างผลผลิตก๊าซมีเทนจากการทำนายและผลผลิตก๊าซมีเทนจากการทดลอง (%Error) และรากที่สองของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (RMSE) มีรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 2



อัตราส่วน FW/CFPP 100:0 เมื่อพิจารณารูปที่ S1 (ก) รูปที่ S2 (Supplementary) และตารางที่ 2 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า Modified Gompertz Model ทำนายผลผลิตก๊าซมีเทนได้อย่างแม่นยำมากกว่า First-order Model, Monod Model และ Cone Model โดยมีค่า R^2 สูงที่สุด (0.9947) และมีค่า RMSE ต่ำที่สุด (10.70) ส่วน First-order Model, Monod Model และ Cone Model แม้จะมีค่า R^2 ที่เข้าใกล้ 1 (0.9743 – 0.9814) แต่ไม่สามารถทำนายผลผลิตก๊าซมีเทนได้อย่างแม่นยำ เพราะเมื่อสิ้นสุดกระบวนการหมักเส้นการทำนายยังคงแสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของผลผลิตก๊าซมีเทน แสดงให้เห็นว่า โมเดลเหล่านี้ไม่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้ในการทำนายผลผลิตก๊าซมีเทนของ FW/CFPP 100:0

อัตราส่วน FW/CFPP 40:60 เมื่อพิจารณารูปที่ S1 (ข) รูปที่ S3 (Supplementary) และตารางที่ 2 จะเห็นว่า Modified Gompertz Model, First-order Model, Monod Model และ Cone Model ให้ค่า R^2 ที่สูงมากกว่า 0.99 แต่เมื่อพิจารณา %Error ของทั้ง 4 โมเดล จะเห็นว่า First-order Model เป็นโมเดลที่แม่นยำและเหมาะสมมากที่สุดสำหรับนำมาใช้ในการทำนายผลผลิตก๊าซมีเทนของ FW/CFPP 40:60 รองลงมาคือ Modified Gompertz Model ส่วน Monod Model และ Cone Model มี %Error สูงกว่าร้อยละ 10 แสดงว่า แม้ทั้ง 2 โมเดลมีความแม่นยำในการทำนายสูง แต่ก็มีความผิดพลาดสูงเช่นกัน ดังนั้น Monod Model และ Cone Model จึงเป็นโมเดลที่ไม่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้ในการทำนายผลผลิตก๊าซมีเทนของ FW/CFPP 40:60

อัตราส่วน FW/CFPP 0:100 เมื่อพิจารณารูปที่ S1 (ค) รูปที่ S4 (Supplementary) และตารางที่ 2 จะเห็นว่า Modified Gompertz Model เป็น โมเดลที่มีความ

เหมาะสมมากที่สุดในการทำนายผลผลิตก๊าซมีเทน โดย Modified Gompertz Model ให้ค่า λ ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายถึงระยะเวลาปรับตัวของระบบเท่ากับ 3.00 วัน ซึ่งค่าดังกล่าวสอดคล้องกับผลการทดลองที่แสดงให้เห็นว่า ระยะ 1 – 3 วันแรกของกระบวนการย่อยสลาย ยังไม่มีก๊าซมีเทนเกิดขึ้นหรือเกิดขึ้นน้อยมากในระบบ สำหรับ First-order Model และ Monod Model แม้จะมีค่า R^2 ที่เข้าใกล้ 1 (0.9580 – 0.9638) แต่มีค่า RMSE ค่อนข้างสูง (25.11 – 27.06 มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย) ดังนั้น Cone Model, First-order Model และ Monod Model จึงไม่ใช่โมเดลที่เหมาะสมสำหรับการทำนายผลผลิตก๊าซมีเทนของ FW/CFPP 0:100

สำหรับการศึกษาเกี่ยวกับจลนพลศาสตร์ของการผลิตก๊าซมีเทนในวัสดุตั้งต้นชนิดต่าง ๆ นั้น ได้มีการตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารวิชาการเป็นจำนวนมาก [15] ทั้งนี้พบว่า Modified Gompertz Model เป็นโมเดลที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลายมากที่สุด เนื่องจากมีความเหมาะสมในการนำไปใช้อธิบายถึงความสามารถในการย่อยสลายของวัสดุตั้งต้นโดยพิจารณาจากค่า λ และ μ_m [15] ซึ่งสอดคล้องกับการเป็นโมเดลที่เหมาะสมในการนำมาใช้อธิบายการย่อยสลายของอัตราส่วน FW/CFPP 100:0 (เศษอาหารเพียงอย่างเดียว) และ FW/CFPP 0:100 (ผลิตภัณฑ์เชื้อชีวภาพบรรจุอาหารเพียงอย่างเดียว) ที่มีค่า $\lambda = 0.00$ และ 3.00 วัน ตามลำดับ พารามิเตอร์ดังกล่าว แสดงให้เห็นว่า การย่อยสลายของเศษอาหารสามารถเกิดขึ้นได้ทันที ระบบไม่ต้องการการปรับตัว ($\lambda = 0.00$ วัน) ส่วน μ_m ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่บ่งชี้ถึงอัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดในเศษอาหาร และผลิตภัณฑ์เชื้อชีวภาพบรรจุอาหารและมีค่าเท่ากับ



ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ที่ได้จากการประมาณค่าโดยใช้โมเดลที่ศึกษา

FW/CFPP Ratios	Models	Y_0		μ_m (NmL gVS ⁻¹ day ⁻¹)	λ (days)	k (day ⁻¹)	n	R ²	%Error	RMSE (NmL/g VS)
		Experimental (NmL/gVS)	Predicted (NmL/gVS)							
100:0	Modified Gompertz	459.15	467.73	21.45	0.00	-	-	0.9947	1.87	10.70
	First-order		521.10	-	-	0.06	-	0.9814	13.49	20.08
	Monod		743.31	-	-	0.04	-	0.9743	61.89	23.57
	Cone		586.80	-	-	0.07	1.32	0.9792	27.80	21.20
40:60	Modified Gompertz	381.79	369.79	24.91	0.00	-	-	0.9903	-3.14	11.15
	First-order		392.02	-	-	0.09	-	0.9983	2.68	4.66
	Monod		505.72	-	-	0.09	-	0.9911	32.46	10.73
	Cone		437.40	-	-	0.12	1.29	0.9966	14.56	6.61
0:100	Modified Gompertz	355.60	352.52	19.51	3.00	-	-	0.9955	-0.87	8.81
	First-order		462.19	-	-	0.04	-	0.9638	29.98	25.11
	Monod		732.20	-	-	0.03	-	0.9580	105.91	27.06
	Cone		383.98	-	-	0.08	2.15	0.9980	7.98	5.88

100:0 คือ เศษอาหารเพียงอย่างเดียว

40:60 คือ เศษอาหารร้อยละ 40 และผลิตภัณฑ์เชื้อชีวภาพบรรจุอาหารร้อยละ 60

0:100 คือ ผลิตภัณฑ์เชื้อชีวภาพบรรจุอาหารเพียงอย่างเดียว

21.45 และ 19.51 มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย-วัน ตามลำดับ นั่นก็แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการย่อยสลายของวัสดุตั้งต้นทั้ง 2 ชนิดได้อย่างชัดเจนมากขึ้น นั่นคือแสดงว่า เศษอาหารเกิดการย่อยสลายได้อย่างรวดเร็วกว่าผลิตภัณฑ์เชื้อชีวภาพบรรจุอาหารจากค่า μ_m ที่สูงกว่านั่นเอง นอกจากนี้เมื่อพิจารณาการย่อยสลายของอัตราส่วน FW/CFPP 40:60 (การหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เชื้อชีวภาพบรรจุอาหาร)

โดยใช้ Modified Gompertz Model จะเห็นว่า การหมักร่วมของวัสดุตั้งต้นทั้ง 2 ชนิดดังกล่าว แสดงให้เห็นว่า ระบบไม่ต้องการการปรับตัว ($\lambda = 0$) เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีหมักโดยใช้ผลิตภัณฑ์เชื้อชีวภาพบรรจุอาหารเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้ ยังมีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด ($\mu_m = 24.91$) ที่สูงมากกว่าการย่อยสลายโดยใช้เศษอาหารหรือผลิตภัณฑ์เชื้อชีวภาพบรรจุอาหารเพียงอย่างเดียว คิดเป็น 1.16 และ 1.28 เท่า ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการหมักร่วม



ระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เนื้อชีวภาพบรรจุอาหารเกิดการย่อยสลายได้อย่างรวดเร็วกว่าและระบบการย่อยสลายมีเสถียรภาพที่ดีกว่าการหมักโดยใช้เศษอาหารหรือผลิตภัณฑ์เนื้อชีวภาพบรรจุอาหารเพียงอย่างเดียว สอดคล้องกับการศึกษาอื่นจำนวนมากที่แสดงให้เห็นถึงผลในเชิงบวกของการหมักร่วม

สำหรับ First-order Model ก็เป็นอีกหนึ่งโมเดลที่มีการนำไปใช้ในการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการผลิตก๊าซมีเทนอย่างแพร่หลาย และบางการศึกษาก็พบว่าสามารถทำนายผลผลิตก๊าซมีเทนได้อย่างเหมาะสมมากกว่าการใช้ Modified Gompertz Model [17] ซึ่งสอดคล้องกับการทำนายผลผลิตก๊าซมีเทนได้อย่างแม่นยำของอัตราส่วน FW/CFPP 40:60 ของการศึกษานี้ ทั้งนี้ First-order Model เป็นโมเดลที่ใช้อธิบายรูปแบบการย่อยสลายในระบบที่ไม่มีการยับยั้งเกิดขึ้น และมีขั้นตอนการไฮโดรไลซิสเป็นขั้นตอนที่มากำหนดอัตราเร็วของการสร้างมีเทน ซึ่งอธิบายโดยพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ k หรือเรียกว่า ค่าคงที่อัตราการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis Rate Constant) และเมื่อเปรียบเทียบค่า k ของ First-order Model ในทุกอัตราส่วน FW/CFPP จะเห็นว่า FW/CFPP 40:60 (การหมักร่วม) มีค่า k สูงมากกว่า FW/CFPP 100:0 และ 0:100 คิดเป็น 1.50 และ 2.25 เท่า ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า FW/CFPP 40:60 (การหมักร่วม) มีอัตราการเกิดก๊าซมีเทนที่เร็วกว่า FW/CFPP 100:0 และ 0:100 (การหมักที่ใช้วัสดุตั้งต้นเพียงชนิดเดียว) สอดคล้องกับการอธิบายโดยใช้พารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ที่ได้จาก Modified Gompertz Model

4. สรุปผลการศึกษา

ในการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนภายใต้การควบคุมการย่อยสลายให้อยู่ในสภาวะที่สมดุลโดยการเติมโซเดียมคาร์บอเนตเพื่อรักษาสภาพต่างให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมตลอดระยะเวลา 45 วัน พบว่าการหมักโดยใช้วัสดุตั้งต้นเพียงชนิดเดียว ได้แก่ เศษอาหาร (FW/CFPP 100:0) และผลิตภัณฑ์เนื้อชีวภาพบรรจุอาหาร (FW/CFPP 0:100) ซึ่งมีอัตราส่วน C/N เท่ากับ 12 และ 460 ตามลำดับ รวมทั้งการหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เนื้อชีวภาพบรรจุอาหาร (FW/CFPP 40:60) ซึ่งมีอัตราส่วน C/N เท่ากับ 25 สามารถผลิตก๊าซมีเทนได้โดยไม่พบว่ามีกรยับยั้งที่รุนแรงเกิดขึ้น และพบว่า FW/CFPP 100:0 ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมสูงที่สุดคือ 459.15 มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย รองลงมาคือ FW/CFPP 40:60 (381.79 มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย) และ FW/CFPP 0:100 (355.60 มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย) ตามลำดับ

ในการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการผลิตก๊าซมีเทนโดยใช้โมเดลทางคณิตศาสตร์รูปแบบต่าง ๆ พบว่า Modified Gompertz Model เป็นโมเดลที่มีความแม่นยำและเหมาะสมสำหรับทำนายผลผลิตก๊าซมีเทนของอัตราส่วน FW/CFPP 100:0 และ 0:100 มากที่สุด โดยทำนายผลผลิตก๊าซมีเทนได้เท่ากับ 467.73 และ 352.52 มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย ตามลำดับ แต่สำหรับอัตราส่วน FW/CFPP 40:60 พบว่า First-order Model เป็นโมเดลที่มีความ



แม่นยำและเหมาะสมมากที่สุด รองลงมาคือ Modified Gompertz Model โดยทำนายผลผลิตก๊าซมีเทนได้เท่ากับ 392.02 และ 369.79 มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย ตามลำดับ

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณหน่วยงานในสังกัดมหาวิทยาลัยศิลปากร ได้แก่ ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ และบัณฑิตวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนทุนการวิจัยบางส่วน รวมถึงขอขอบคุณ บริษัท บรรจุก๊าซเพื่อสิ่งแวดล้อม จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร และบริษัท เสริมสุข จำกัด (มหาชน) โรงงานปทุมธานี ที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างตะกอนจุลินทรีย์

6. ข้อมูลเพิ่มเติม (Supplementary)

ข้อมูลเพิ่มเติม (Supplementary) ดาวน์โหลดได้ที่ <http://ojs.kmutnb.ac.th/index.php/jointech/article/download/6890/4831>

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Q. Yang, B. Wu, F. Yao, L. He, F. Chen, Y. Ma, X. Shu, K. Hou, D. Wang, and X. Li, Biogas production from anaerobic co-digestion of waste activated sludge: co-substrates and influencing parameters, *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 2019, 18(4), 771-793.
- [2] K. Hagos, J. Zong, D. Li, C. Liu, and X. Lu, Anaerobic co-digestion process for biogas production: Progress, challenges and perspectives, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 76, 1485-1496.
- [3] R. Abbas, A. Agha, and S. Rahman, Enhancement anaerobic digestion and methane production from kitchen waste by thermal and thermo-chemical pretreatments in batch leach bed reactor with down flow, *Research in Agricultural Engineering*, 2018, 64, 128-135.
- [4] T. Radu, R. Blanchard, V. Smedley, A. Wheatley, P. Abdul Salam, and C. Visvanathan, Community scale, decentralised anaerobic digestion for energy and resource recovery, 2016 International Conference on Cogeneration, Small Power Plants and District Energy, *Proceeding*, 2016.
- [5] J. Wang, M. Gao, Q. Wang, W. Zhang, and Y. Shirai, Pilot-scale Open Fermentation of Food Waste to Produce Lactic Acid without Inoculum Addition, *RSC Advances*, 2016, 6, 104354-104358.
- [6] J. Ariunbaatar, A. Panico, L. Frunzo, G. Esposito, P. N. L. Lens, and F. Pirozzi, Enhanced anaerobic digestion of food waste by thermal and ozonation pretreatment methods, *Journal of Environmental Management*, 2014, 146, 142-149.



- [7] I. Angelidaki, M. Alves, D. Bolzonella, L. Borzacconi, J. L. Campos, A. J. Guwy, S. Kalyuzhnyi, P. Jenicek, and J. B. van Lier, Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays, *Water Science and Technology*, 2009, 59(5), 927-34.
- [8] T. L. Hansen, J. E. Schmidt, I. Angelidaki, E. Marca, J. Jansen, H. Mosbaek, and T. H. Christensen, Method for determination of methane potentials of solid organic waste, *Waste Management*, 2004, 24(4), 393-400.
- [9] P. L. McCarty, *Anaerobic Waste Treatment Fundamentals*, Public Work, 1964, 95, 91-126.
- [10] APHA, AWW, and WEF, *Standard methods for the examination of water and wastewater*. American Public Health Association, Washington, D.C., 2017.
- [11] USEPA, *METHOD 1684: Total, Fixed, and Volatile Solids in Water, Solids, and Biosolids*. United States Environment Protection Agency, D.C., USA, 2001.
- [12] D.W. Nelson and L.E. Sommers, *Total carbon, organic carbon, and organic matter: Methods of soil analysis part 3: Chemical Methods (SSSA Book Series 5)*, Soil Science Society of America, American Society of Agronomy, WI, USA, 1996.
- [13] J. Fagbenro and B. Oyeleye, Relationships between four methods of organic carbon determination in leaves of nitrogen-fixing trees and lignite-based organic fertilizers, *Communications in Soil Science & Plant Analysis*, 1999, 30, 2345-2362.
- [14] ASTM E778-87(2004), *Standard Test Methods for Nitrogen in the Analysis Sample of Refuse-Derived Fuel*, ASTM International, PA, USA, 2006.
- [15] R. Bedoić, A. Špehar, J. Puljko, L. Čuček, B. Čosić, T. Pukšec, and N. Duić, Opportunities and challenges: Experimental and kinetic analysis of anaerobic co-digestion of food waste and rendering industry streams for biogas production, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 130, 109951.
- [16] Y. Li, S. Y. Park, and J. Zhu, Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(1), 821-826.
- [17] M. O. L. Yusuf and N. L. Ify, The effect of waste paper on the kinetics of biogas yield from the co-digestion of cow dung and water hyacinth, *Biomass and Bioenergy*, 2011, 35(3), 1345-1351.