

การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยปฏิกรณ์ แบบไฮบริดแชนแนลแบบย่อส่วน

Development Simulation of Biogas Production in a Scaled-down Hybrid-Channel Digester

ธรรมรัช บุญกำเนิด¹ ชัยรัตน์ ศิริพัธนะ² พรวิมล เวชสิทธิ์³ ชันวานี จิใจ⁴ และนิรติชัย รักมาก^{1,2*}

Tammathat Boonkamnerd¹ Chairat Siripatana² Pornwimon Wadchasi³ Sunwanee Jijai⁴ and Nirattisai Rakmak^{1,2*}

¹สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ อำเภอท่าศาลา จังหวัดนครศรีธรรมราช 80160

²ศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านปาล์มน้ำมันและชีวมวล มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ อำเภอท่าศาลา จังหวัดนครศรีธรรมราช 80160

³บริษัท เวสต์แอนด์ เอ็นเนอร์ยี่แมเนจเม้นท์ อำเภอศรีรัฐนิคม จังหวัดสุราษฎร์ธานี 84180

⁴คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา อำเภอเมือง จังหวัดยะลา 95000

¹School of Engineering and Technology, Walailak University, Tha Sala District, Nakhon Si Thammarat Province, 80160

²Biomass and Oil Palm Center of Excellent, Walailak University, Nakhon Si Thammarat, 80160, Thailand, 80160

³Waste and Energy Management Company Limited, Khiri Rat Nikhom District, Surat Thani Province, 84180

⁴Faculty of Science Technology and Agriculture, Yala Rajabhat University, Yala, Thailand, 95000

*Corresponding author, e-mail: nirattisai.ra@wu.ac.th

(Received: Oct 28, 2022; Revised: Mar 30, 2023; Accepted: Apr 7, 2023)

บทคัดย่อ

การควบคุมและติดตามสมรรถนะของระบบผลิตก๊าซชีวภาพสามารถดำเนินการได้โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ งานวิจัยนี้ได้ขยายขอบเขตของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อตรวจสอบและควบคุมขั้นสูงสำหรับกระบวนการไม่ใช้ออกซิเจน (Extended advanced monitoring and control system for anaerobic processes: Extended AMOCO model) Extended AMOCO ให้ครอบคลุมความซับซ้อนของวัตถุดิบในการหมักร่วมระหว่างน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม กากตะกอนปาล์ม และน้ำทิ้งจากระบบการผลิตก๊าซชีวภาพในปฏิกรณ์แบบไฮบริดแชนแนลย่อส่วนโดยการควบคุมอย่างง่ายให้ระดับของค่า COD ของน้ำทิ้งจากระบบการผลิตก๊าซชีวภาพขาออก (Anaerobic digested effluent, ADE) มีค่าไม่เกินกว่าระดับที่กำหนด (10,000 mg/l) โดยใช้วิธีการปรับเปลี่ยนระยะเวลาที่เก็บน้ำเสียในถังปฏิกรณ์ (HRT: Hydraulic retention time) หรืออัตราการหมุนวนกลับของน้ำทิ้งจากระบบการผลิตก๊าซชีวภาพ ผลการทดลองพบว่าระบบสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 0.23-0.60 ml Biogas/mg COD และแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถอธิบายผลการผลิตก๊าซชีวภาพได้ โดยการควบคุม HRT ส่งผลต่อการการผลิตก๊าซชีวภาพมากกว่าการเพิ่มอัตราการวนกลับของ ADE แต่การเพิ่มอัตราการวนกลับของ ADE จะช่วยรักษาให้ระบบดำเนินการผลิตต่อไปได้ในช่วงที่มีอัตราการผลิตต่ำ

คำสำคัญ : แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การหมักร่วมแบบไร้อากาศ ไฮบริดแชนแนล น้ำเสียโรงงานน้ำมันปาล์ม ก๊าซชีวภาพ

Abstract

Controlling and monitoring the performance of the biogas production system can be done through a mathematical model. This research extends the scope of the extended advanced monitoring and control system for anaerobic processes (Extended AMOCO model) for a more complex feedstock of co-digestion of palm oil mill effluent, returned biogas plant effluent (ADE), and palm oil decanter cake in a hybrid channel reactor. The control objective was to keep the exit COD under 10,000 mg/l adjusting the hydraulic retention time (HRT) or recirculation rate of anaerobic digested effluent (ADE). The experimental results showed the system could produce biogas at 0.23-0.60 ml Biogas/mg COD. The developed model could explain biogas production. Controlling HRT was more effective on biogas production than the recirculation rate of ADE adjusting, nevertheless, increasing the recirculation rate of ADE keeps the system running during low production.

Keywords: Mathematical model, Anaerobic co-digestion, Hybrid-channel, Palm oil mill effluent, Biogas

บทนำ

ในปัจจุบันประเทศไทยมีการขยายตัวทางเศรษฐกิจ และอุตสาหกรรมอย่างต่อเนื่องโดยเฉพาะอุตสาหกรรม การแปรรูปผลิตผลทางการเกษตรเนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม จึงทำให้เกิดโรงงานแปรรูปผลิตผลทาง การเกษตรเกิดขึ้นเป็นจำนวนมากโดยเฉพาะในภาคใต้ของประเทศไทย การย่อยในสภาพไร้อากาศ (Anaerobic digestion, AD) เป็นการทำงานของจุลินทรีย์ที่เจริญในสภาวะไร้อากาศที่มีอยู่ในธรรมชาติเพื่อการผลิตก๊าซชีวภาพ (Mata-Alvarez *et al.*, 2014) ในบริบทของภาคใต้ที่มีอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มเป็นอุตสาหกรรมหลัก ซึ่งจะทำให้เกิดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม (Palm oil mill effluent: POME) เป็นจำนวนมาก น้ำเสียเหล่านี้มีปริมาณสารอินทรีย์สูง (60-100 gCOD/l) (Sangsri *et al.*, 2021) ที่สามารถนำมาใช้เป็นแหล่งวัตถุดิบหลัก (Feedstock) หรือซับสเตรท (Substrate) ในการผลิตก๊าซชีวภาพได้ นอกจากนี้ แล้วยังมีแหล่งวัตถุดิบอื่นๆ ที่มีศักยภาพในการนำมาผลิตก๊าซชีวภาพในระดับชุมชนและอุตสาหกรรมได้อีกมากมาย เช่น ของเสียจากฟาร์มปศุสัตว์ กลิเซอร์อลดิบ (Crude glycerol) และของเสียอินทรีย์จากชุมชน แต่ปัญหาหลักในปัจจุบันเกี่ยวกับการ พัฒนากระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริบทภาคใต้คือระบบมีความอ่อนไหวสูงมากต่อการเปลี่ยนแปลง ของสิ่งแวดล้อมในการผลิตดังนั้นจึงได้มีการนำแบบจำลองจลนพลศาสตร์มาใช้เพื่ออธิบายกระบวนการบำบัดทางชีวภาพทั้งแบบ ใช้ออกซิเจนและไม่ใช้ออกซิเจน โดยความเข้าใจเกี่ยวกับจลนพลศาสตร์มีความจำเป็นสำหรับการออกแบบและการทำงานของ ระบบบำบัดน้ำเสีย อีกทั้งยังสามารถใช้ในการคาดคะเนความเสถียรภาพและคุณภาพน้ำเสียของระบบได้ การขยายขอบเขตของ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อตรวจสอบและควบคุมขั้นสูงสำหรับกระบวนการไม่ใช้ออกซิเจน (Extended advanced monitoring and control system for anaerobic processes: Extended AMOCO model) เป็นแบบจำลองที่ไม่ซับซ้อน มากเกินไป และสามารถอธิบายผลของปัจจัยต่าง ๆ ในการผลิตก๊าซชีวภาพได้ดี โดยพิจารณาความซับซ้อนของวัตถุดิบหรือสาร ตั้งต้นมีองค์ประกอบที่มีความซับซ้อนรวมกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ถูกย่อยสลายให้แตกตัวจนมีขนาดเล็กลง ก่อนที่จะถูก จุลินทรีย์กลุ่มไฮโดรไลซิซย่อยให้เล็กลงจนกลายเป็นสารประกอบเชิงเดี่ยว เมื่อจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องในการย่อยหมักอายุขัย ชีวมวลของเซลล์จะสลายตัวโดยการแตกตัวให้เล็กลงด้วยการไฮโดรไลซิซและส่งผลให้กลายเป็นสารอาหารหรือซับสเตรทที่ ย่อยสลายได้ง่าย และสารเหลือ นอกจากนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Extended AMOCO ยังพิจารณามวลชีวภาพและ การสะสมขององค์ประกอบเฉื่อยเนื่องจากการตกตะกอนบางส่วน หรือจากกลไกอื่น ๆ เพื่อให้สอดคล้องกับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่วัดได้ในการประเมินค่าศักยภาพการเกิดก๊าซมีเทนทางชีวภาพ (Biochemical methane potential: BMP)

อย่างไรก็ตาม แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Extended AMOCO ที่พัฒนาในบทความนี้ ยังไม่ได้เพิ่มการทำนาย การเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันระเหยได้ (volatile fatty acid, VFA) ความเป็นด่าง (Alkalinity: Alk) แอมโมเนีย (NH₃) และ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H₂S) เพราะยังไม่มีข้อมูลเพียงพอในการสอบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แต่เป็นแนวคิดที่จะนำไป ต่อยอดในอนาคต POME นั้นถือว่าเป็นวัตถุดิบที่ดีที่สุดอย่างหนึ่งในการผลิตก๊าซชีวภาพ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อระบบดำเนินการ ผลิตได้ระยะหนึ่งความเสถียรภาพของระบบมักจะค่อย ๆ ต่ำลง ล้มเหลวได้ง่าย ให้ผลผลิตต่ำเมื่อเทียบกับศักยภาพในการ ผลิตก๊าซชีวภาพที่ควรจะได้รับโดยทางทฤษฎีและการหาค่าศักยภาพทางชีวเคมีในการผลิตมีเทนในห้องปฏิบัติการ (Seekao *et al.*, 2021) จึงมีแนวคิดการนำชีวมวลหรือน้ำเสียอื่นมาหมักร่วม (Anaerobic co-digestion หรือ ACD) เพื่อเพิ่ม ประสิทธิภาพ เสถียรภาพการผลิต และเพื่อความยืดหยุ่นในการจัดการกับของเสียอินทรีย์ แต่การนำ ACD มาใช้ในการผลิต ก๊าซชีวภาพจะทำให้ระบบมีความซับซ้อนมากขึ้นทั้งในเชิงกลไกการทำงานของจุลินทรีย์ ลำดับและองค์ประกอบต่าง ๆ ที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างการย่อยสลาย มีงานวิจัยจำนวนมากที่ให้ความกระจ่างเกี่ยวกับปัจจัยและกลไกต่าง ๆ ที่มีผลต่อ ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ รวมทั้งมีงานวิจัยส่วนหนึ่งได้มีการพัฒนาแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ที่มีความซับซ้อนที่ สามารถนำมาใช้ในการอธิบายปัจจัยและกลไกต่าง ๆ ในเชิงปริมาณได้ทั้งในแนวกว้างและแนวลึก ซึ่งเป็นรากฐานในการ ออกแบบระบบการผลิตก๊าซชีวภาพ ใช้เพื่อติดตามประเมินผลการทำงานของระบบ ใช้เพื่อควบคุมการผลิตและการหาผลเลิศ ในการผลิตก๊าซชีวภาพ (Lok *et al.*, 2020; Rakmak *et al.*, 2022) แต่การนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาปรับใช้ในบริบท ของประเทศไทยนั้นยังมีน้อยมาก ถึงแม้ว่าปัจจุบันในบางโรงงานได้มีการปรับระบบผลิตก๊าซชีวภาพให้เป็นระบบสมาร์ต โดย การติดตั้งเซนเซอร์จำนวนมาก รวมไปถึงระบบซอฟต์แวร์ที่สามารถจัดการกับข้อมูลปริมาณมากแล้วก็ตาม แต่โครงสร้าง พื้นฐานเหล่านี้ก็ยังไม่ได้นำมาใช้กันอย่างเต็มที่ในเชิงของการควบคุมแบบผลเลิศของการผลิตก๊าซชีวภาพ ดังนั้นแบบจำลอง ทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับบริบทของประเทศไทย จะต้องสามารถใช้ได้ครอบคลุมสภาวะในการหมักไร้อากาศทั้งแบบ กะ กึ่งกะ และแบบต่อเนื่อง แต่ไม่ควรมีความซับซ้อนมากเกินไปจนทำให้การประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทาง คณิตศาสตร์ทำได้ยากซึ่งจะทำให้ค่าที่ได้มีความไม่แน่นอนสูง ในขณะเดียวกันก็ต้องเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มี

โครงสร้างละเอียดเพียงพอที่สามารถโยงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณต่าง ๆ ทั้งที่วัดได้ ที่ต้องการให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำนายปัจจัยที่ผันแปรและปัจจัยที่ใช้ในการควบคุมกระบวนการผลิต

จากการทบทวนบทความของนักวิจัยในแถบอาเซียนส่วนใหญ่ ไม่ว่าจะเป็นการศึกษากาซชีวภาพชนิดเดียว หรือแบบการหมักร่วมมักจะมีการศึกษาที่คล้ายคลึงกันดังงานวิจัยก่อนหน้านี้ (Seekao *et al.*, 2021) นั่นคือเมื่อได้ขอบเขตปัจจัยที่ต้องการศึกษาแล้ว นักวิจัยก็จะทดสอบผลของปัจจัยต่าง ๆ ต่อผลการผลิตกาซชีวภาพโดยวิธีการหา BMP แล้วนำสภาวะในการผลิตกาซชีวภาพที่ดีที่สุดจากการทดสอบ BMP มาทดสอบต่อในระบบที่ใกล้เคียงกับอุตสาหกรรมซึ่งมักจะเป็นการผลิตแบบต่อเนื่อง เช่น ทดลองหมักในปฏิกรณ์แบบที่มีการผสมอย่างสมบูรณ์ เป็นต้น Rakmak *et al.* (2019) และ Seekao *et al.* (2021) ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โมโนดหลายซับสเตรท (Multi-Substrate Monod model) สำหรับใช้อธิบายผลการทดลองที่ได้จากการทดสอบ BMP ของการหมักร่วมระหว่าง POME กับมูลไก่ และกลีเซอรินที่ได้จากการผลิตไบโอดีเซลซึ่งพบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถใช้ได้ครอบคลุมทั้งการหมักแบบกะ (BMP assay) และแบบต่อเนื่อง โดยที่พารามิเตอร์ที่ต้องสอบเทียบใหม่มีแค่เพียงค่าอัตราการเจริญจำเพาะสูงสุด (μ_m) และค่าคงที่ผลได้เท่านั้น (Y_{ps}) ทั้งนี้ก็เพราะว่าการหมักในแบบต่อเนื่องนั้นมีการผสมที่ดีกว่าทำให้จุลินทรีย์สามารถเข้าถึงอาหารได้เร็วขึ้น อย่างไรก็ตามแบบจำลองที่นักวิจัยพัฒนาขึ้นนี้ยังไม่สามารถใช้ในการทำนายการเปลี่ยนแปลงของ VFA Alk NH_3 และ H_2S ในปฏิกรณ์ได้ จึงมีข้อจำกัดในการใช้งานโดยสามารถให้ใช้ได้เฉพาะในกรณีที่ไม่มีปัญหาดังกล่าวเท่านั้น ถ้าจะให้สามารถนำไปใช้งานได้อย่างกว้างขวางมากขึ้นก็จะต้องเพิ่มสมการที่จะใช้ในการทำนายการเปลี่ยนแปลงของ VFA Alk NH_3 และ H_2S เข้าไปในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วย

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับอธิบายผลการทดลองแบบกะและแบบต่อเนื่องของการกาซชีวภาพในปฏิกรณ์แบบไฮบริดแซนแนล พร้อมทั้งสาธิตให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า Extended AMOCO model มีศักยภาพที่นำไปใช้ในการวางยุทธศาสตร์ในการควบคุมโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และมีศักยภาพที่จะนำไปใช้ได้จริงในระดับอุตสาหกรรม

วิธีดำเนินการวิจัย

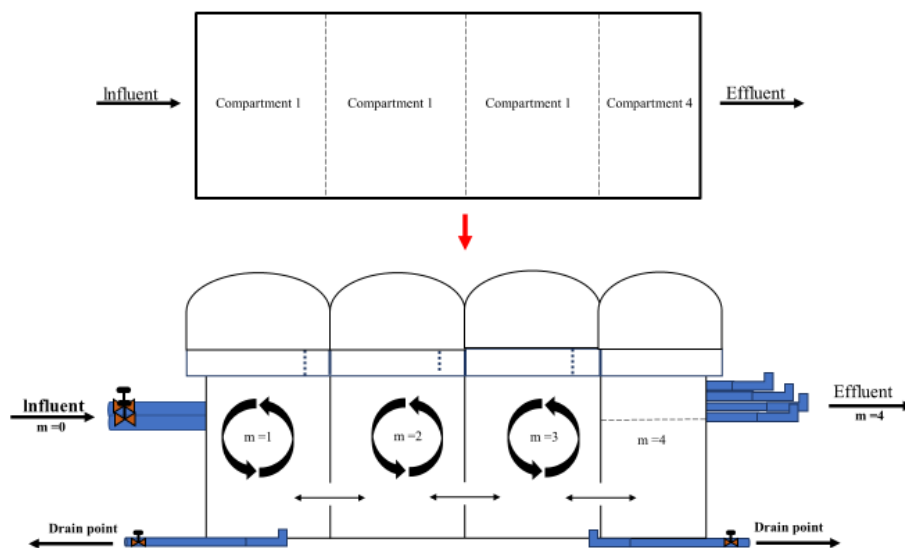
1. ศึกษาองค์ประกอบของวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการศึกษาการผลิตกาซชีวภาพในปฏิกรณ์แบบไฮบริดแซนแนลย่อยส่วน

วัตถุดิบหลักที่ใช้ในการศึกษาการผลิตกาซชีวภาพในปฏิกรณ์แบบไฮบริดแซนแนลย่อยส่วนประกอบด้วยน้ำทิ้งจากระบบการผลิตกาซชีวภาพ (anaerobic digested effluent, ADE) กากตะกอนปาล์ม (Decanter cake) และ POME ที่ได้จากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม บริษัทพระแสง กรีนพาวเวอร์ จำกัด จังหวัดสุราษฎร์ธานี วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตกาซชีวภาพจะถูกนำมาเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 0-4 °C เพื่อลดการการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและทางชีวเคมีให้น้อยที่สุด ก่อนทำการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ด้วยวิธี Electrometric method (pH meter รุ่น Hanna HI2002) Chemical oxygen demand (COD) ด้วยวิธี Close Reflux Titrimetric ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total solids; TS) ด้วยวิธีทำให้แห้งที่ 103-105 °C ปริมาณของแข็งระเหย (Volatile solid; VS) ด้วยวิธีทำให้แห้งที่ 550 °C ค่าความเป็นด่าง (Alkalinity; Alk) ด้วยวิธี ไททริเมตริก (Titrimetric method) และปริมาณกรดไขมันระเหยได้ (Volatile fatty acids; VFA) ด้วยวิธี Titrimetric method (Freese *et al.*, 2003) เชื้อตั้งต้นสำหรับผลิตกาซชีวภาพในการทดลองนำมาจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม บริษัท พระแสง กรีนพาวเวอร์ จำกัด ซึ่งเป็นเชื้อที่อยู่ในระบบการผลิตกาซชีวภาพแบบไฮบริดแซนแนลในระดับอุตสาหกรรม เชื้อตั้งต้นที่ได้จะถูกเก็บรักษาไว้ในห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิ 40 °C เป็นเวลา 3 วัน เพื่อให้เชื้อตั้งต้นได้มีการปรับสภาพให้สภาวะที่เหมาะสม และวิเคราะห์ค่า pH COD TS VS Alk และ VFA ก่อนนำไปใช้ทดลอง

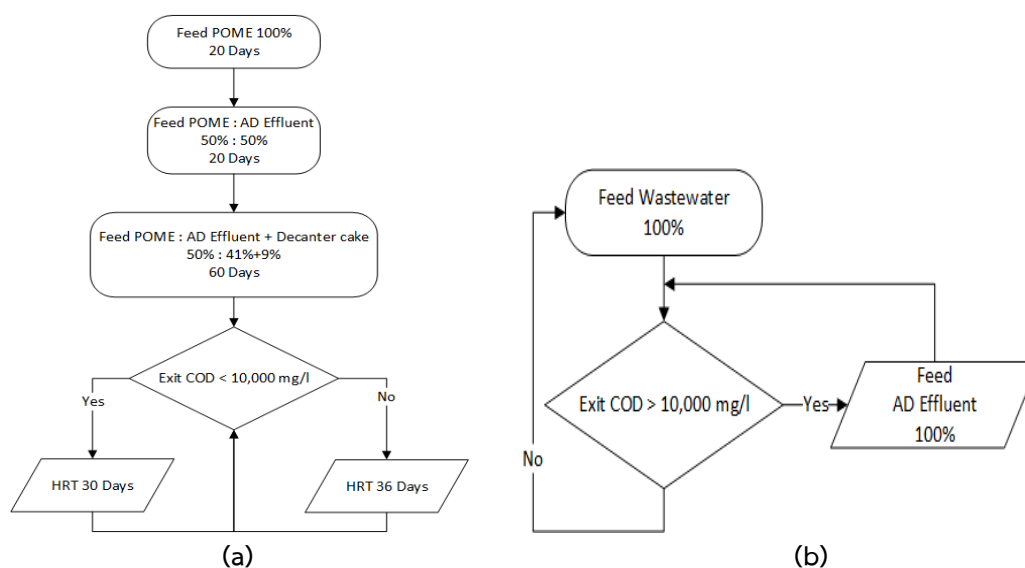
2. ปฏิกรณ์แบบไฮบริดแซนแนล และแผนการทดลองดำเนินการผลิตกาซชีวภาพด้วยปฏิกรณ์แบบไฮบริดแซนแนล

ปฏิกรณ์แบบไฮบริดแซนแนลย่อยส่วนสร้างขึ้นจากสแตนเลสมีปริมาตรรวม 0.5 m³ ปริมาตรใช้งานจริง 0.48 m³ เป็นปฏิกรณ์แบบไร้อากาศที่ภายในแบ่งออกเป็น 4 บ่อย่อยที่เชื่อมต่อกันแบบอนุกรม ปริมาตรของบ่อเท่ากันทุกบ่อยกเว้นบ่อสุดท้ายที่มีขนาดครึ่งหนึ่งของบ่ออื่น ๆ น้ำเสียสามารถไหลเชื่อมกันได้ โดยใน 3 บ่อแรกมีการกวนผสมโดยใช้ปั๊มที่สามารถหมุนเวียนน้ำเสียได้ 20 V/min และบ่อสุดท้ายไม่มีกลไกในการกวนแต่จะให้น้ำเสียไหลขึ้นจนล้นและไหลออกทางออกด้านบน โดยอะแกร์มปฏิกรณ์แบบไฮบริดแซนแนลย่อยส่วนขนาด 0.5 m³ แสดงดังภาพที่ 1 ดำเนินการทดลองต่อเนื่องเป็นเวลา 100 วัน

ทำการวัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่ออกจากทุกบ่อและนำค่าที่ได้มารวมกัน (มีการวัดค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ อย่างต่อเนื่อง ได้แก่ COD VS pH Alk และ VFA แต่ไม่ได้นำมาลงในบทความนี้) COD ของน้ำเสียที่ป้อนเข้าระบบมีค่าอยู่ระหว่าง 55,000-75,000 mg/L ก๊าซชีวภาพที่ได้จากการผลิตมีความเข้มข้นของ CH_4 $58 \pm 4\%$ การดำเนินการผลิตก๊าซชีวภาพโดยใช้ปฏิกรณ์แบบไฮบริด แชนนัลย่อยส่วนนั้นแบ่งออกเป็น 3 ช่วงที่ต่อเนื่องกัน รวมเวลาในการดำเนินการผลิต 100 วัน โดยที่ใช้ HRT เท่ากัน 30 วัน ตลอดช่วงการทดลอง โดยช่วงที่ 1 ใช้เวลา 20 วัน เป็นการป้อน POME ที่มี COD เฉลี่ย 79,000 mg/L ช่วงที่ 2 ใช้เวลา 20 วัน เป็นการป้อน POME ร้อยละ 50 ของปริมาณการป้อนน้ำเสีย และ ADE ร้อยละ 50 ของปริมาณการป้อนน้ำเสีย ซึ่งเป็นปริมาณการป้อนน้ำเสียที่เมื่อรวมกันเป็นร้อยละ 100 จะมีค่า COD เฉลี่ย 55,000 mg/L และช่วงที่ 3 ใช้เวลา 60 วัน เป็นการป้อน POME ร้อยละ 50 ของปริมาณการป้อนน้ำเสีย ADE ร้อยละ 41 ของปริมาณการป้อนน้ำเสีย และกากตะกอน ปาล์ม ร้อยละ 9 ของปริมาณการป้อนน้ำเสีย ซึ่งเป็นปริมาณการป้อนน้ำเสียเมื่อรวมกันเป็นร้อยละ 100 จะมีค่า COD เฉลี่ย 86,000 mg/L นอกจากนี้ยังได้ติดตั้งระบบควบคุมกึ่งอัตโนมัติเพื่อควบคุมให้ค่า COD ที่ทางออกมีค่าต่ำกว่า 10,000 mg/L โดยการปรับ HRT เพิ่มขึ้นจาก 30 วันเป็น 36 วัน และการป้อน ADE เพื่อเจือจางแทนการป้อน POME เป็นวัตถุดิบหลักอกริซึม ในการควบคุมให้ค่า COD ที่ทางออกมีค่าต่ำกว่า 10,000 mg/L แสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 1 ไดอะแกรมปฏิกรณ์แบบไฮบริดแชนนัลย่อยส่วนขนาด 0.5 m³



ภาพที่ 2 แสดงอัลกอริทึมในการควบคุมให้ค่า COD ที่ทางออกมีค่าต่ำกว่า 10,000 mg/L โดยการ (a) ปรับ HRT (b) ป้อนน้ำทิ้งจาก ระบบการผลิตก๊าซชีวภาพแทนน้ำเสียที่เป็นวัตถุดิบ

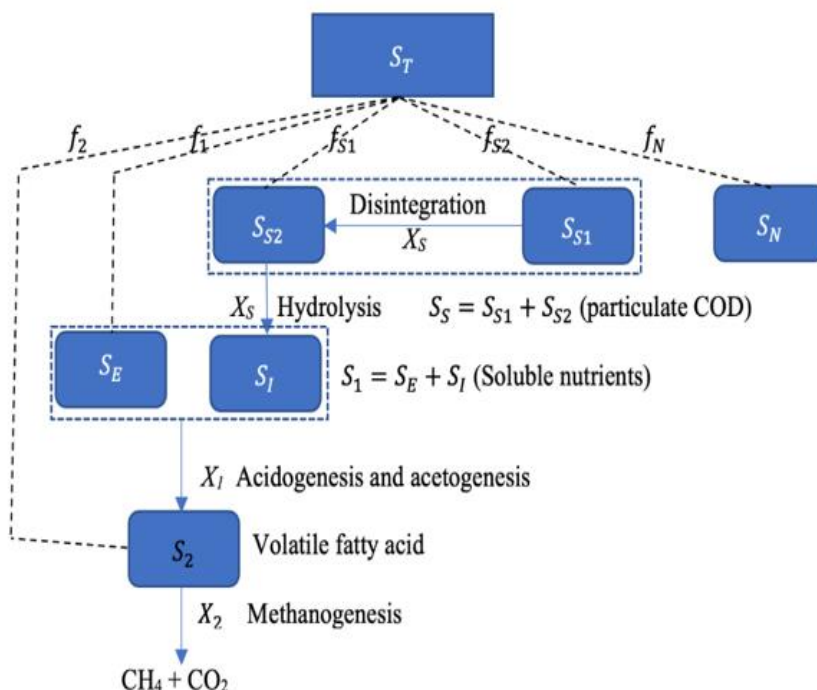
3. พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Extended AMOCO สำหรับการหมักแบบกะและแบบต่อเนื่อง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Extended AMOCO ได้รับการพัฒนาโดย Bernard *et al.* (2001) และพัฒนาต่อโดยนักวิจัยอีกหลายท่าน (Corbellini *et al.*, 2019; Della Bona *et al.*, 2015; Ficara *et al.*, 2012; Hassam *et al.*, 2015) เนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Extended AMOCO รูปแบบเดิมนั้นไม่สามารถทำนายค่าความเข้มข้นที่สภาวะคงตัวที่เกี่ยวข้องกับชนิดของคาร์บอนอนินทรีย์และความเป็นต่างของน้ำหมักในระบบได้ ดังนั้นจึงได้ทำการพัฒนา Extended AMOCO ที่ดีกว่าขึ้นโดยคำนึงถึงพลวัตความเข้มข้นของไนโตรเจนอนินทรีย์ นอกจากนี้ Extended AMOCO แบบดั้งเดิมนั้นพิจารณาให้มีแบคทีเรียที่เกี่ยวข้องในการหมักเพียงสองกลุ่มเท่านั้นจึงไม่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้กับการหมักร่วมที่วัตถุดิบที่มีความซับซ้อนที่ต้องพิจารณาการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มที่ย่อยสลายเชิงซ้อนด้วย ดังนั้นในบทความวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ขยายต่อยอด Extended AMOCO เพื่อพัฒนาเพิ่มประสิทธิภาพให้ดีกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Extended AMOCO ในปัจจุบัน โดยพิจารณาความซับซ้อนดังต่อไปนี้

1) วัตถุดิบหรือสารตั้งต้นมีองค์ประกอบที่มีความซับซ้อนที่รวมกันเป็นอนุภาค ถูกย่อยสลายให้แตกตัวจนมีขนาดเล็กลง ก่อนที่จะถูกจุลินทรีย์กลุ่มไฮโดรไลซิส ย่อยให้เล็กลงจนกลายเป็นสารประกอบเชิงเดี่ยว เช่น น้ำตาลเชิงเดี่ยว กรดไขมันอิสระ และกรดอะมิโน

2) ชีวมวลของเซลล์จะสลายตัวโดยการแตกตัวให้เล็กลงด้วยการไฮโดรไลซิสและส่งผลให้กลายเป็นซับสเตรตที่ย่อยสลายได้ง่าย และสารเหนียว

3) มวลชีวภาพและการสะสมขององค์ประกอบเหนียวเนื่องจากการตกตะกอนบางส่วน หรือจากกลไกอื่น ๆ เพื่อให้สอดคล้องกับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่วัดได้ในการประเมินค่า BMP อย่างไรก็ตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Extended AMOCO ที่พัฒนาในบทความนี้ ยังไม่ได้เพิ่มการทำนายการเปลี่ยนแปลงของ VFA Alk NH₃ และ H₂S เพราะยังไม่มีข้อมูลเพียงพอในการสอบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แต่เป็นแนวคิดที่จะนำไปต่อยอดในอนาคต



ภาพที่ 3 แสดงการจำแนกกลุ่มองค์ประกอบของสารอาหารหรือที่การเปลี่ยนแปลงของซับสเตรตที่ใช้สมการเชิงอนุพันธ์สำหรับระบบที่ใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพแบบต่อเนื่อง ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Extended AMOCO

ภาพที่ 3 สรุปการจำแนกกลุ่มองค์ประกอบของสารอาหารหรือที่ซับสเตรตที่อยู่ในวัตถุดิบและลำดับการเปลี่ยนแปลงของซับสเตรตที่ใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Extended AMOCO ของการผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งเมื่อนำความสัมพันธ์ดังกล่าวมาเขียนเป็นสมการเชิงอนุพันธ์สำหรับระบบที่ใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพแบบต่อเนื่องจะได้ระบบสมการต่อไปนี้

$$S_T = S_1 + S_2 + S_S + S_N \quad (1)$$

$$\frac{dX_I}{dt} = \frac{1}{V_L} (q_{in}X_{I,in} - q_{out}X_I) + (1 - f_S)(k_{d1}X_1 + k_{d2}X_2) - \alpha_I X_I \quad (2)$$

$$\frac{dS_N}{dt} = \frac{q_{in}}{V_L} (S_{N,in} - \alpha_N S_N) \quad (3)$$

$$\frac{dX_S}{dt} = \frac{q_{in}}{V_L} (X_{S,in} - \alpha_S X_S) + \mu_{mS} \frac{S_S}{K_{SS} + S_S} X_S + f_S (k_{d1}X_1 + k_{d2}X_{2,m}) \quad (4)$$

$$\frac{dS_1}{dt} = \frac{q_{in}}{V_L} (S_{1,in} - S_1) - \frac{\mu_{1,m}}{Y_{X1S1} S_1 + K_{S1}} \frac{S_1}{S_1 + K_{S1}} X_1 + f_{1S} \frac{1 - Y_{XSSS}}{Y_{XSSS}} \mu_{mS} \frac{S_S}{K_{SS} + S_S} X_S \quad (5)$$

$$\frac{dS_2}{dt} = \frac{q_{in}}{V_L} (S_{2,in} - S_2) + \mu_{1,m} \frac{1 - Y_{X1S1}}{Y_{X1S1} + K_{S1}} \frac{S_1}{S_1 + K_{S1}} + \frac{\mu_{2,m}}{Y_{X2S2} S_2 + K_{S2} + S_2^2 / K_{I2}} \frac{S_S}{S_2 + K_{S2} + S_2^2 / K_{I2}} \quad (6)$$

$$\frac{dX_1}{dt} = -\frac{q_{in}}{V_L} \alpha_1 X_1 + \left(\mu_{1,m} \frac{S_1}{S_1 + K_{S1}} - k_{d1} \right) X_1 \quad (7)$$

$$\frac{dX_2}{dt} = -\frac{q_{in}}{V_L} \alpha_2 X_2 + \left(\mu_{2,m} \frac{S_S}{S_2 + K_{S2} + S_2^2 / K_{I2}} \right) X_2 \quad (8)$$

$$\gamma CH_2 = \mu_{2,m} Y_{PS} \frac{S_S}{S_2 + K_{S2} + S_2^2 / K_{I2}} X_2 \quad (9)$$

โดยที่

S_T (mg/l) คือ COD ทั้งหมดที่ประกอบด้วย COD ที่ละลายน้ำได้ (ส่วนที่ย่อยง่าย) (S_1) กรดไขมันระเหยง่าย (เทียบเท่ากับความสัมพันธ์รวมของอะซิเตท) (S_2) COD ที่ย่อยสลายได้ช้า (โปรตีน คาร์โบไฮเดรตเชิงซ้อน ไชมัน) (S_{S1}) COD ที่ย่อยสลายได้ช้ามาก (อนุภาคขนาดใหญ่) (S_{S1}) และ COD ที่ไม่ย่อยสลายในสภาวะที่ไม่ใช้ออกซิเจน (S_N)

f_S คือ สัดส่วนของส่วนที่ย่อยสลายได้ของชีวมวลที่ตายแล้ว

V_L คือ ปริมาตรของไหลที่เคลื่อนที่ของบ่อหมัก

q_{in} และ q_{out} คือ อัตราการไหลของน้ำขาเข้าและขาออกจากระบบตามลำดับ

$1 - f_S$ คือ ส่วนที่เหลือจากการไฮโดรไลซิสของเซลล์ ซึ่งประมาณค่าให้เป็นองค์ประกอบเฉื่อยอินทรีย์ (X_I)

$\alpha_I X_I$ คือ อัตราการแยกสารเฉื่อยอินทรีย์ออกจากเฟสของเหลว (บวกกับสารอินทรีย์บางชนิดที่ย่อยสลายไม่ได้) (mg COD/l)

α_I คือ อัตราการตกตะกอนจำเพาะของอนุภาคเฉื่อยในบ่อหมัก (d^{-1})

α_N เป็นสัดส่วนระหว่างอัตราการการไหลออกและเข้าของ COD ที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ $\alpha_N = 0$ บ่งบอกถึงการคงตัวอย่างสมบูรณ์ของ X_N ในบ่อหมัก (เงื่อนไขของ fixed-bed หรือฟลูอิดไธด์เบด AD) ในขณะที่ $\alpha_N = 1$ หมายถึงพฤติกรรมของการผสมอย่างสมบูรณ์ (Completely stirred tank reactor หรือ CSTR) และในที่นี้เราสมมติว่าในระหว่างการทำงานของ AD สารตั้งต้นที่ไม่ย่อยสลาย S_N จะไม่เกิดขึ้นในระหว่างการย่อยหรือไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของ α_N ภายในเครื่องปฏิกรณ์ มันมาจากกระแสขาเข้าเท่านั้น และมันจะยังคงอยู่ในเฟสของเหลวโดยไม่มีการแยกเฟสที่ถาวร

α_S คือ สัดส่วนอัตราการไหลเข้าของ X_S (mg COD/l)

K_{SS} คือ ค่าคงที่ครึ่งอิ่มตัวสำหรับ S_S (mg/l)

μ_{mS} คือ Monod parameters ของจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ช้า (X_S) (mg COD/l)

k_{d1} และ k_{d2} คือ อัตราการตายจำเพาะของจุลินทรีย์ผลิตกรด และเมทาโนเจนตามลำดับ (mg/l)

$\mu_{1,m}$ คือ อัตราการเติบโตเฉพาะสูงสุดของ Acidogens (d^{-1})

Y_{x2s2} คือ ค่าสัมประสิทธิ์ผลผลิตของ Acidogens ใน S_1

K_{S1} คือ ค่าคงที่ครึ่งอิ่มตัวสำหรับ S_1 (mg/l)

Y_{xsss} เป็นค่าสัมประสิทธิ์ผลผลิตของจุลินทรีย์ที่ย่อย S_S

$\mu_{2,m}$ คือ อัตราการเติบโตเฉพาะสูงสุดของเมทาโนเจน (d^{-1})

Y_{x2s2} คือ ค่าสัมประสิทธิ์ผลผลิตของเมทาโนเจนจากการย่อย S_2

K_{S2} และ K_{I2} คือ ค่าคงที่ครึ่งอิ่มตัว และพารามิเตอร์การยับยั้งสำหรับ S_2 ตามลำดับ (mg/l)

α_1 และ α_2 คือ สัดส่วนอัตราการไหลเข้าของ X_1 และ X_2 (mg COD/l) ตามลำดับ

Y_{PS} คือ ผลได้มีเทน (Methane yield coefficient) (ml CH_4 /mg COD)

4. การประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Extended AMOCO การสอบเทียบเพื่อประมาณค่าพารามิเตอร์ และการนำแบบจำลองมาใช้ในการทำนายผลของการควบคุมกระบวนการย่อยสลายในปฏิกรณ์แบบไฮบริดแซนแนล

โดยการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Extended AMOCO กับแต่ละบ่อย่อยของปฏิกรณ์แบบไฮบริดแซนแนลแล้วนำแบบจำลองของแต่ละบ่อย่อยมาต่อกันอย่างอนุกรม แล้วเขียนโปรแกรมด้วยภาษาไพธอน (ใช้โมดูล Scipy และ Matplotlib) เพื่อสอบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้ผลการวัด COD ที่ออกจากระบบ และปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม ตลอดช่วงที่ 1 และ 2 แล้วประมาณค่าพารามิเตอร์โดยใช้เทคนิค Non-linear optimization (Lmfit) การวิเคราะห์ความแปรปรวน และทดสอบความมีนัยสำคัญโดยใช้การแจกแจงแบบที (Student's t-distribution) ตามวิธีการของ Seekao *et al.* (2021) ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Extended AMOCO พร้อมทั้งพารามิเตอร์ที่ได้จากการสอบเทียบ มาอธิบายผลการทดลองในการผลิตก๊าซชีวภาพของปฏิกรณ์แบบไฮบริดแซนแนล และนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และพารามิเตอร์ที่ได้มาใช้ในการจำลองสถานการณ์ในการควบคุมให้น้ำเสียที่ออกจากระบบให้มี COD ไม่เกิน 10,000 mg/l โดยใช้อัตราการป้อนน้ำเสียในการปรับภาระอินทรีย์ (Organic loading) ของระบบหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า การปรับระยะเวลาเก็บกักน้ำเสียในถังปฏิกรณ์ (HRT) ซึ่งในกรณีศึกษาโดยใช้ปกติใช้ HRT 30 วัน ดังนั้นถ้าต้องการที่จะลดค่า COD ขาออกจากระบบก็ต้องทำการเพิ่มค่า HRT นั่นคือ ใช้ HRT เป็นตัวแปรใช้ควบคุม (Manipulated variable) ดังแสดงในไดอะแกรมในภาพที่ 2(a) อีกทางเลือกหนึ่งในควบคุมให้ค่า COD อยู่ในระดับต่ำตามเป้าหมายในการควบคุมคือการปรับอัตราการป้อนกลับ ADE ที่ออกจากระบบการผลิตก๊าซชีวภาพแทนการปรับอัตราการป้อนน้ำเสียเข้าระบบดังแสดงในไดอะแกรมในภาพที่ 2(b)

ผลการวิจัย

1. ผลการศึกษาคู่ประกอบของวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพในปฏิกรณ์แบบไฮบริดแซนแนลย่อยส่วน

ผลการศึกษาคู่ประกอบของวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพในปฏิกรณ์แบบไฮบริดแซนแนลย่อยส่วน แสดงดังตารางที่ 1 เมื่อเปรียบเทียบกับค่า pH ที่เหมาะสมของวัตถุดิบหมักสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพซึ่งควรอยู่ในช่วง 6.8-7.2 (Sohgratok, 2013)

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของวัตถุดิบหลักที่นำมาผลิตก๊าซชีวภาพในปฏิกรณ์แบบไฮบริดแซนแนลย่อยส่วน

พารามิเตอร์	วัตถุดิบ			
	ADE	POME	Decanter cake	เชื้อตั้งต้น
COD (mg/l)	20,000	79,000	1,760,000	92,000
TS (mg/l)	6,499	32,500	NA	55,220
VFA (mg/l)	3,000	4,700	NA	1,080
VS (mg/l)	1,233	21,200	768,588	34,016
pH	7.51	4.31	9.37	7.6
ALK (mg/l asCaCO ₃)	2,670	2,100	NA	NA
C/N ratio	3-4.5 ^{3*}	18-24 ^{1*}	950-1,100 ^{2*}	NA

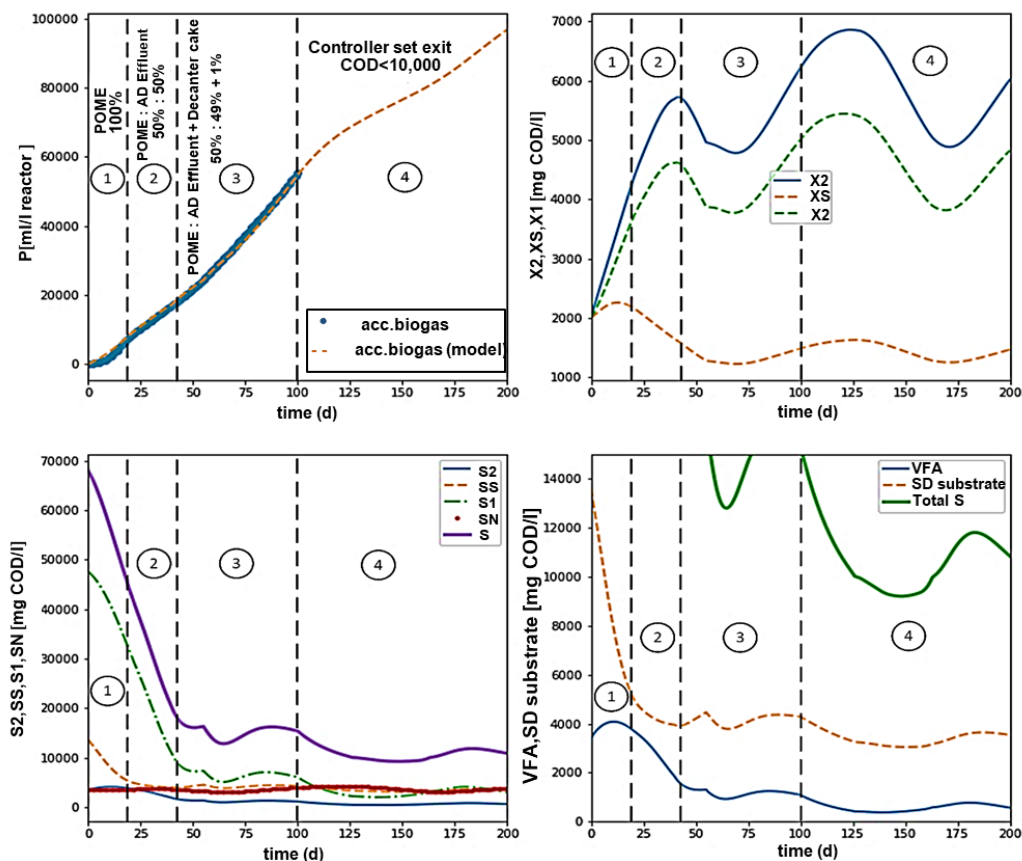
ที่มา: ^{1*} Nurliyana *et al.* (2015), ^{2*} Panpong & Srimachai (2018), ^{3*} ค่าประมาณจากข้อมูลค่าไนโตรเจนรวม (Total nitrogen, TN) และค่าซีโอดีของ ADE โดยสมมติว่าค่า TN ใน ADE เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย

จากตารางที่ 1 พบว่า ค่า pH ของ POME มีค่า 4.31 ซึ่งค่อนข้างเป็นกรด ส่วนน้ำทิ้งจากระบบการผลิตก๊าซชีวภาพ และเชื้อตั้งต้นที่ได้จากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม บริษัทพระแสง กรีนพาวเวอร์ จำกัด จังหวัดสุราษฎร์ธานี ซึ่งมีค่าเป็นกลางค่อนข้าง

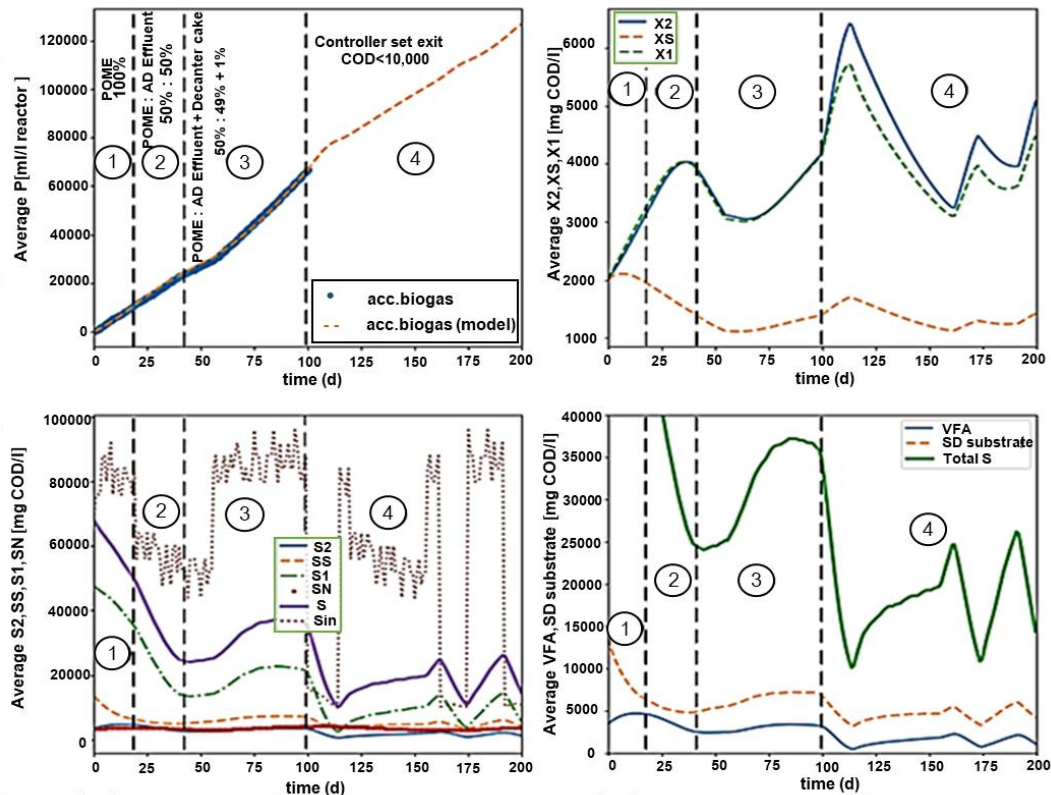
ไปทางต่างคือ 7.51 และ 7.6 ตามลำดับ ส่วนกากตะกอนปาล์มมีค่า pH อยู่ในช่วงของความเป็นด่างมีค่า 9.37 หากเรานำวัตถุดิบแต่ละชนิดเหล่านี้มาใช้หมักร่วมกันด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสมจะสามารถทำให้ระบบเกิดความสมดุลส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนสารอินทรีย์ให้กลายเป็นก๊าซชีวภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับค่า COD ของวัตถุดิบหลักที่นำมาผลิตก๊าซชีวภาพในปฏิกรณ์แบบไฮบริดแซนัลย่ส่วนนั้นพบว่า POME และกากตะกอนปาล์มมีค่า COD สูง เท่ากับ 79,000 mg/l และ 1,760,000 mg/l ตามลำดับ ในขณะที่น้ำทิ้งจากระบบการผลิตก๊าซชีวภาพมีค่า COD เท่ากับ 20,000 mg/l ซึ่งหากนำน้ำทิ้งจากระบบการผลิตก๊าซชีวภาพนี้มาใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตก๊าซชีวภาพในปฏิกรณ์แบบไฮบริดแซนัลย่ส่วนเพียงอย่างเดียวจะได้ปริมาณก๊าซชีวภาพน้อย แต่หากนำวัตถุดิบอื่นเช่น POME และกากตะกอนปาล์มมาผสมด้วยจะช่วยทำให้ค่า COD ของน้ำหมักอยู่ในช่วงที่เหมาะสม จะทำให้ได้ปริมาณก๊าซชีวภาพต่อหน่วย COD ที่เพิ่มขึ้น และหากพิจารณาถึงอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) จะพบว่า POME มีค่าอัตราส่วน C/N อยู่ในช่วง 18-24 ซึ่งอยู่ในช่วงที่ซ้อนกับช่วง C/N ที่เหมาะสมคือ 20-30 และในขณะที่กากตะกอนปาล์มนั้นมีค่าอัตราส่วน C/N สูงมากคืออยู่ในช่วง 950-11,000 ซึ่งเหมาะสมที่สุดสำหรับจุลินทรีย์ที่ผลิตก๊าซชีวภาพ (Wang *et al.*, 2012) ซึ่งหากนำกากตะกอนปาล์มเพียงเล็กน้อยมาผสมเป็นวัตถุดิบหมักร่วมกับน้ำทิ้งจากระบบการผลิตก๊าซชีวภาพและ POME จะสามารถช่วยความสมดุลให้กับระบบได้ ปรับค่าอัตราส่วน C/N และส่งผลต่อประสิทธิภาพของการผลิตก๊าซชีวภาพได้อีกด้วย

2. ผลการทดลองดำเนินการผลิตก๊าซชีวภาพโดยใช้ปฏิกรณ์แบบไฮบริดแซนัล

จากการสอบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Model calibration) กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Extended AMOCO ที่พัฒนาขึ้นโดยใช้ข้อมูลการผลิตก๊าซชีวภาพด้วย POME ในปฏิกรณ์แบบไฮบริดแซนัลย่ส่วนเป็นเวลา 100 วัน แสดงดังภาพที่ 4



(a)



(b)

ภาพที่ 4 โปรไฟล์ตัวแปรสถานะของการดำเนินการผลิตก๊าซชีวภาพ (วันที่ 0-100) และผลการจำลองสถานการณ์ (วันที่ 101-200) โดยการควบคุมด้วย a) การปรับ HRT (b) การปรับสัดส่วนการหมุนวนน้ำทิ้งจากระบบการผลิตก๊าซชีวภาพ ด้วยระบบอัตโนมัติ

ภาพที่ 4(a) แสดงโปรไฟล์ของตัวแปรสถานะ (State variables) ของการดำเนินการผลิตก๊าซชีวภาพในปฏิกรณ์แบบไฮบริดแชนนัลยอส่วนเป็นเวลา 100 วัน และต่อด้วยผลการจำลองสถานการณ์ให้ดำเนินการผลิตต่ออีก 100 วัน รวมเป็น 200 วันโดยกำหนดให้น้ำเสียเข้ามีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับระยะเวลาที่ผ่านมา โดยการควบคุมเพื่อให้น้ำทิ้งจากระบบการผลิตก๊าซชีวภาพ (บ่อที่ 4) มีค่าต่ำกว่า 10,000 mg/l สองแบบคือ แบบแรกเป็นการปรับ HRT (ภาพที่ 4(a)) และแบบที่สองเป็นการควบคุมการปรับสัดส่วนการหมุนวนน้ำทิ้งจากระบบการผลิตก๊าซชีวภาพ แสดงดังภาพที่ 4(b) โดยข้อมูลที่ได้จากการวัดและวิเคราะห์ค่า COD ผลได้ของมีเทน และ VFA พบว่ามีความสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการทำนายแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างมาก โดยพารามิเตอร์ที่ได้จากการสอบเทียบด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าดังนี้ $\mu_{1,m} = 0.33 \text{ d}^{-1}$ $\mu_{2,m} = 0.45 \text{ d}^{-1}$ $\mu_{s,m} = 0.225 \text{ d}^{-1}$ $K_s = K_{s1} = K_{s2} = 60,000 \text{ mg/l}$ $f_2 = 0.05$ $f_N = 0.19$ $X_{S0} = X_{10} = X_{20} = 2,000 \text{ mg COD/l}$ $f_{SX} = 0.7$ $f_{1S} = 1.0$ $Y_{PS} = 0.23-0.60 \text{ ml Biogas/mg COD}$ ซึ่งขึ้นอยู่กับสถานะภาพของระบบในแต่ละช่วงของการหมัก โดยทุกพารามิเตอร์ที่ได้นั้น เมื่อนำมาวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า มีค่าผ่านเกณฑ์ทางสถิติที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 90 ทุกพารามิเตอร์ตามแนวทางการประมาณค่าพารามิเตอร์ของ Seekao *et al.* (2021) จากภาพที่ 4(a) และ (b) จะเห็นว่าเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ผ่านการสอบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แล้ว มาใช้ในการทำนายการผลิตก๊าซชีวภาพในช่วง 100 วันแรก ผลการจำลองสถานการณ์การผลิตก๊าซชีวภาพพบว่า ปริมาณของก๊าซชีวภาพที่ทำนายโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าเกือบเท่ากับผลการทดลองตลอดช่วงเวลาที่ทำกรทดลองผลิตจริง ส่วนค่าการทำนายค่า VFA และ COD ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ก็มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองเช่นกัน ถึงแม้จะมีความคลาดเคลื่อนมากกว่า แต่ก็มีแนวโน้มถูกต้องและสามารถใช้ในการทำนายได้ในทางปฏิบัติ

อภิปรายผลการวิจัย

1. องค์ประกอบของวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพในปฏิกรณ์แบบไฮบริดแบบขนานย่อยส่วน

องค์ประกอบของวัตถุดิบทั้งสามชนิด (ตารางที่ 1) มีความใกล้เคียงกับวัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัยของ Nurliyana *et al.* (2015) Thongpan *et al.* (2016) และ Choong *et al.* (2018) ถ้าใช้ค่าช่วง C/N ที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพเนื่องจากค่าความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคาร์บอนและไนโตรเจนในสารอินทรีย์ที่มีความสำคัญต่อการย่อยสลายทางชีววิทยา ค่าซึ่งเป็นที่ยอมรับจากงานวิจัยจำนวนมากคือ C/N อยู่ในช่วง 20-30 ถ้าสัดส่วนของ C สูงเกินไปหรือต่ำเกินไปจะส่งผลได้โดยตรงต่อปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพ จะสังเกตว่า POME มีค่า C/N ที่เหมาะสม โดยไม่ต้องมีการปรับค่าแต่อย่างใด ในขณะที่ ADE (C/N อยู่ในช่วง 3-4.5) และกากตะกอนปาล์ม (C/N อยู่ในช่วง 950-1,100) มีสัดส่วนของ C ต่ำและสูงเกินไป ดังนั้นการใช้สัดส่วนระหว่างวัตถุดิบทั้ง 3 ชนิดให้เหมาะสมจะทำให้ค่า C/N อยู่ในช่วงที่เหมาะสมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Extended AMOCO และพารามิเตอร์ที่ได้ มาใช้ในการจำลองสถานการณ์ในการควบคุมให้น้ำเสียที่ออกจากระบบให้มี COD ไม่เกิน 10,000 mg/l โดยใช้อัตราการบำบัดน้ำเสียในการปรับภาระอินทรีย์เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ วิธีนี้ยังทำให้ผู้ควบคุมการผลิตก๊าซชีวภาพสามารถควบคุมให้การผลิตก๊าซชีวภาพได้มากขึ้นกว่าการใช้วิธีปรับสัดส่วนการหมวนน้ำทั้งอีกด้วย

2. การผลิตก๊าซชีวภาพโดยใช้ปฏิกรณ์แบบไฮบริดแบบขนาน

จากภาพที่ 4 ถ้าให้ค่า COD ขาเข้ามีค่าเท่ากันตลอดในระยะเวลา 100-200 วันพบว่า ทั้งสองอัลกอริทึมจะสามารถควบคุมให้ค่า COD ของน้ำทิ้งจากระบบการผลิตก๊าซชีวภาพที่ขาออกมีค่าต่ำกว่า 10,000 mg/l ได้เช่นเดียวกัน แต่การควบคุมโดยการปรับ HRT สามารถให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพมากกว่า ทั้งนี้ก็เพราะว่า การหมวนของน้ำทิ้งจากระบบการผลิตก๊าซชีวภาพจะทำให้เกิดการชะล้างของจุลินทรีย์ให้หลุดออกไปจากระบบมีมากขึ้นกว่าการเพิ่ม HRT ในทางตรงข้ามการใช้การเพิ่ม HRT ในการควบคุมให้ค่า COD ของน้ำทิ้งจากระบบการผลิตก๊าซชีวภาพที่ขาออกมีค่าต่ำกว่า 10,000 mg/l จึงมีประสิทธิภาพมากกว่า การควบคุมโดยใช้การหมวนเวียน ADE กลับไปใช้ใหม่ทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพมีค่าสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Sidabutar *et al.* (2020) ซึ่งพบว่า การหมวนเวียน ADE ร้อยละ 25 ให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพจาก POME ที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ในทำนองเดียวกันการเพิ่ม HRT สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแหล่งคาร์บอนให้เป็นมีเทนแต่จะต้องเพิ่มขนาดของระบบเพื่อรองรับอัตราการเข้าของน้ำเสียเท่าเดิม (Thongpan *et al.*, 2016) อย่างไรก็ตามการควบคุมอย่างง่ายทั้งสองวิธีก็มีข้อจำกัดที่ทำให้การใช้งานจริงอาจจะไม่สามารถทำได้ หากว่าปริมาณของน้ำเสียที่ต้องเข้ามามีมากกว่าความจุของบ่อผลิตก๊าซชีวภาพ ดังนั้นทางโรงงานจะสามารถเพิ่มความจุของบ่อก๊าซได้อย่างน้อยร้อยละ 20-30 ของความจุปกติ เพื่อที่จะรักษาระดับอัตราการไหลเข้าของน้ำเสียให้เท่าเดิม หรือเปลี่ยนแปลงไปตามอัตราการผลิตรายวัน ซึ่งทำให้ปริมาณน้ำเสียไม่คงที่ ขึ้นลงตามอัตราการผลิตของโรงงานนั้น ๆ ณ เวลาใดเวลาหนึ่ง

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ขยายขอบเขตของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Extended AMOCO ที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในงานวิจัยทางการด้านการควบคุมและติดตามสมรรถนะของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ โดยทั้งครอบคลุมวัตถุดิบที่มีความซับซ้อนมากขึ้น และสามารถเข้ากับวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพจากของเสียโรงงานน้ำมันปาล์มดิบในระดับอุตสาหกรรมได้ และสาธิตให้เห็นว่าสามารถนำมาใช้ในการอธิบายผลการผลิตก๊าซชีวภาพของการหมักร่วมระหว่าง POME น้ำทิ้งจากระบบการผลิตก๊าซชีวภาพ และกากตะกอนปาล์มได้ เมื่อนำมาจำลองสถานการณ์ที่ใช้อัลกอริทึมในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Extended AMOCO ของการควบคุมอย่างง่ายให้ระดับของ COD ขาออกมีค่าไม่สูงกว่า 10,000 mg/l เป็นระดับที่กำหนดไว้โดยใช้วิธีการปรับเปลี่ยน HRT หรืออัตราการหมวนวนกลับของน้ำทิ้งจากระบบการผลิตก๊าซชีวภาพพบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถทำนายเป้าหมายของกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพและยังสามารถควบคุมการผลิตได้ดีโดยการควบคุมโดยการปรับ HRT ให้มีประสิทธิภาพมากกว่าในกรณีที่อัตราการไหลเข้าของน้ำเสียมีปริมาณมาก แต่การเพิ่มอัตราการวนกลับของน้ำทิ้งจากระบบการผลิตก๊าซชีวภาพจะช่วยรักษาให้ระบบดำเนินการผลิตต่อไปได้ในช่วงที่มีอัตราการผลิตต่ำ ทำให้น้ำเสียเข้าสู่ระบบมีปริมาณลดลงมากจึงทำให้ Extended AMOCO model มีศักยภาพที่นำไปใช้ในการวางยุทธศาสตร์ในการควบคุมโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และมีศักยภาพที่จะนำไปใช้ได้จริงในระดับอุตสาหกรรม

ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยในเรื่องที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่าง POME กับวัตถุดิบอื่น ๆ ยังมีน้อยมาก และมีความข้อจำกัดในการควบคุมค่า COD ขาออกมีค่าไม่สูงกว่า 10,000 mg/l จึงทำให้การพัฒนาเทคโนโลยี



ในการควบคุมการผลิตก๊าซชีวภาพให้ได้มีคุณภาพที่ดียังมีข้อจำกัด และยังไม่ได้เพิ่มการทำนายการเปลี่ยนแปลงของ VFA Alk NH_3 และ H_2S เพราะยังไม่มีข้อมูลที่เพียงพอในการสอบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แต่เป็นแนวคิดที่จะนำไปต่อยอดในอนาคต จึงควรเร่งรัดให้มีการขยายผลและดำเนินการวิจัยต่อยอดอย่างเร่งด่วนเพื่อให้อุตสาหกรรมของประเทศไทยมีความก้าวหน้าสามารถแข่งขันได้อย่างยั่งยืน

กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้ได้รับทุนสนับสนุนงบประมาณปี 2562 โดยสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา ผ่านอุทยานวิทยาศาสตร์ฯ มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

เอกสารอ้างอิง

- Bernard, O., Hadj-Sadok, Z., Dochain, D., Genovesi, A. & Steyer, J.-P. (2001). Dynamical model development and parameter identification for an anaerobic wastewater treatment process. *Biotechnology and Bioengineering*, 75(4), 424–438. <https://doi.org/10.1002/bit.10036>
- Choong, Y. Y., Chou, K. W. & Norli, I. (2018). Strategies for improving biogas production of palm oil mill effluent (POME) anaerobic digestion: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 2993–3006. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.036>
- Corbellini, V., Ferretti, G., Ficara, E., Leva, A., Malpei, F. & Negri, A. (2019). Modelling and structure-tailored control of biogas plants fed on agro-food residues. *2019 18th European Control Conference (ECC)*, 2374–2379. <https://doi.org/10.23919/ECC.2019.8795865>
- Della Bona, A., Ferretti, G., Ficara, E. & Malpei, F. (2015). LFT modelling and identification of anaerobic digestion. *Control Engineering Practice*, 36, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2014.11.008>
- Ficara, E., Hassam, S., Allegrini, A., Leva, A., Malpei, F. & Ferretti, G. (2012). Anaerobic digestion models: A comparative study. *7th Vienna International Conference on Mathematical Modelling*, 45(2), 1052–1057. <https://doi.org/10.3182/20120215-3-AT-3016.00186>
- Freese, S. D., Trollip, D. L. & Nozaic, D. J. (2003). Manual for testing of water and wastewater treatment chemicals. Final Report to the Water Research Commission.
- Hassam, S., Ficara, E., Leva, A. & Harmand, J. (2015). A generic and systematic procedure to derive a simplified model from the anaerobic digestion model No. 1 (ADM1). *Biochemical Engineering Journal*, 99, 193–203. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2015.03.007>
- Lok, X., Chan, Y. J. & Foo, D. C. Y. (2020). Simulation and optimisation of full-scale palm oil mill effluent (POME) treatment plant with biogas production. *Journal of Water Process Engineering*, 38, 101558. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101558>
- Mata-Alvarez, J., Dosta, J., Romero-Güiza, M. S., Fonoll, X., Peces, M. & Astals, S. (2014). A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 36, 412–427. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.039>
- Nurliyana, M. Y., H'ng, P. S., Rasmina, H., Kalsom, M. S. U., Chin, K. L., Lee, S. H., Lum, W. C. & Khoo, G. D. (2015). Effect of C/N ratio in methane productivity and biodegradability during facultative co-digestion of palm oil mill effluent and empty fruit bunch. *Industrial Crops and Products*, 76, 409–415. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.04.047>
- Panpong, K. & Srimachai, T. (2018). Biogas production by anaerobic co-digestion process between community distillery slop with glycerol waste. *Naresuan University Journal: Science and Technology*, 26(4), 50–60.



- Rakmak, N., Noynoo, L., Jijai, S. & Siripatana, C. (2019). Monod-Type Two-Substrate Models for Batch Anaerobic Co-digestion. *Google Scholar*, 11-20.
- Rakmak, N. & Promraksa, A. (2022). The influence of longitudinal dispersion on the capacity and stability of UASB operation with substrate inhibition. *South African Journal of Chemical Engineering*, 39(1), 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2021.10.001>
- Sangsri, S., Siripatana, C., Rakmak, N., Wadchasit, P. & Jijai, S. (2021). Evaluating biomethane potential of inocula from different active biogas digesters for palm oil mill effluent by BMP and SMA: effect of dilution and sources. *Walailak Journal of Science and Technology*, 18(1), 6515. <https://doi.org/10.48048/wjst.2021.6515>
- Seekao, N., Sangsri, S., Rakmak, N., Dechapanya, W. & Siripatana, C. (2021). Co-digestion of palm oil mill effluent with chicken manure and crude glycerol: biochemical methane potential by monod kinetics, *Heliyon*, 7(2), e06204. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06204>
- Sidabutar, R., Trisakti, B., Husin, A. & Irvan. (2020). Effect of recycle ratio on methanogenic anaerobic digestion of palm oil mill effluent (POME) in a stirred tank reactor assisted by ultrafiltration membrane into biogas in transition conditions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 801(1), 012053. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/801/1/012053>
- Sohgratok, N. (2013). Biogas Production from Decanter Cake of Palm Oil Mill with Wastewater from Frozen Seafood Industry. *Master's Thesis, Engineering in Environmental Engineering, Prince of Songkla University*.
- Thongpan, H., Thongnan, R., Rakmak, N. & Siripatana, C. (2016). Modeling OF batch And continuous anaerobic digestion OF palm oil mill effluent: the effect OF wastewater-sludge ratio. *Jurnal Teknologi*, 78(5-6).
- 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.