

การเพิ่มความพร้อมและส่งเสริมศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากผักตบชวา โดยการปรับสภาพด้วยความร้อนและคลื่น

Enhancement of Biogas Production Potential from Water Hyacinth by Thermal and Waved Pre-Treatment

นันทนัฐ ศรีประเสริฐ* และ พรพงศ์ ศรีประเสริฐ

Nanthanat Sriprasert* and Pakpong Sriprasert

Received: 4 August 2021, Revised: 23 March 2022, Accepted: 8 June 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแนวทางการปรับสภาพผักตบชวาโดยใช้ความร้อนและการให้คลื่นเพื่อเพิ่มความพร้อมและส่งเสริมศักยภาพในการใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับกระบวนการย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจนเพื่อการผลิตก๊าซชีวภาพ เทคนิคการปรับสภาพด้วยความร้อนที่ศึกษาคือ การใช้เตาอบลมร้อน อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิหม้อนึ่งแรงดันไอน้ำ และการให้คลื่นไมโครเวฟและคลื่นอัลตราโซนิก ด้วยอุณหภูมิและระยะเวลาที่แตกต่างกัน ประสิทธิภาพการปรับสภาพผักตบชวาพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงของสารอินทรีย์ในรูปสารละลายได้แก่ CODs และ VFAs โดยพบว่า CODs มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและระยะเวลาการให้ความร้อนและคลื่นที่สูงขึ้น การให้คลื่นไมโครเวฟที่อุณหภูมิ 220 °C นาน 10 นาที ให้ CODs สูงที่สุดคือ 3,498 mg/L ขณะที่อัตราการเพิ่มของค่า CODs สูงสุดเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการปรับสภาพคิดเป็น 17.8 เท่าเมื่อให้คลื่นไมโครเวฟที่ 160 °C นาน 10 นาที ขณะที่การให้คลื่นอัลตราโซนิกมีอัตราการเพิ่มขึ้นของ CODs ต่ำที่สุดคือ 1.0 - 2.3 เท่า และมี CODs สูงสุด 533 mg/L เมื่อให้คลื่นอัลตราโซนิก 20 นาทีที่อุณหภูมิห้อง การใช้ความร้อนโดยตรงด้วยเทคนิคอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิมี CODs สูงสุด 2,467 mg/L (100 °C 120 นาที) การใช้เตาอบลมร้อนมี CODs สูงสุด 2,250 mg/L (110 °C 120 นาที) ส่วนการใช้หม้อนึ่งแรงดันไอน้ำ มี CODs สูงสุด 924 mg/L (105 °C 20 นาที) สรุปได้ว่าการปรับสภาพผักตบชวาโดยใช้ความร้อนและการให้คลื่นส่งผลให้มีสารอินทรีย์ในรูปสารละลายที่มีความพร้อมเพื่อการเป็นสารตั้งต้นสำหรับการย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจนเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งมีแนวโน้มต่อการเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพและช่วยส่งเสริมศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ

สาขาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ตำบลขามเรียง อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

Division of Environmental Technology, Faculty of Environment and Resource Studies, Mahasarakham University, Khamriang, Kantarawichai, Maha Sarakham 44150, Thailand.

* ผู้ติดต่อประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): Nanthanat@msu.ac.th Tel: 06 3995 4566

คำสำคัญ: การย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจน, ก๊าซชีวภาพ, ผักตบชวา, การปรับสภาพด้วยความร้อน, การปรับสภาพด้วยคลื่น

ABSTRACT

This research aims to study methods for water hyacinth pre-treatment by thermal and waved applications in order to use as a feedstock for anaerobic digestion in attempt to promote biogas production potential and enhancing substrate readily. The thermal pre-treatment techniques applied in this study are hot air oven, temperature controlled water bath, and steam pressure autoclave, while ultrasonic waves are performed at different temperatures and durations. The water hyacinth pre-treatment efficiency was determined by the transformation of organic compounds into soluble form, including CODs and VFAs. It was found that CODs tended to increase with higher temperature and duration of heating and waving. Microwave heating at 220 °C for 10 min yielded the highest CODs at 3,498 mg/L, while the highest CODs increase compared to the absence of conditioning was 17.8 folds at 160 °C for 10 min. Ultrasonic irradiation had the lowest rate of CODs increment of 1.0 - 2.3 folds, and maximum CODs of 533 mg/L was found when ultrasonic was applied for 20 min at room temperature. Direct heating by hot water bath showed maximum CODs of 2,467 mg/L (100 °C 120 min). Hot air oven had a maximum CODs of 2,250 mg/L (110 °C 120 min), whereas an autoclave presented maximum CODs of 924 mg/L (105 °C 20 min). These indicated that the pre-treatment methods of water hyacinth by heating and waving resulted in an increase in organic matter in soluble form which is readily available as a substrate for anaerobic digestion. Therefore, more biodegradable substrate and biogas production potential enhancement could be expected.

Key words: anaerobic digestion, biogas, water hyacinth, thermal pre-treatment, waved pre-treatment

บทนำ

ผักตบชวาได้รับการขนานนามว่าเป็น “วัชพืชน้ำที่เลวร้ายที่สุดในแหล่งน้ำตามธรรมชาติ” เนื่องจากความสามารถในการเจริญเติบโตและการปรับตัวตามสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ที่ดี ส่งผลให้ผักตบชวาสามารถเจริญเติบโตเป็นแพหนาอัดแน่นครอบคลุมผิวน้ำได้ในระยะเวลาอันสั้น เพียง 2-3 สัปดาห์ แพหนาของชั้นผักตบชวาบนผิวน้ำนี้เป็นอุปสรรคโดยตรงต่อการใช้ประโยชน์ของแหล่งน้ำจากกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ (Bhattacharya and Kumar, 2010; Barua and Kalamdhad, 2016) ทั้งใน

ด้านการอุปโภค บริโภค การชลประทาน การคมนาคม และทัศนียภาพ แพหนาของผักตบชวาจะกีดขวางการส่งผ่านของแสงอาทิตย์ลงสู่ใต้ผิวน้ำทำให้พืชน้ำชนิดอื่น ๆ ใต้ผิวน้ำไม่สามารถทำการสังเคราะห์แสงได้ในเวลากลางวัน อีกทั้งยังขัดขวางการละลายของออกซิเจนโดยตรงบริเวณผิวน้ำลงสู่แหล่งน้ำ ส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนละลายในแหล่งน้ำ (dissolved oxygen, DO) มีค่าลดต่ำลงอย่างมาก โดยเฉพาะในช่วงเวลากลางคืน ทำให้แหล่งน้ำเกิดสภาวะไร้ออกซิเจน (anaerobic condition) สัตว์น้ำและพืชน้ำอื่น ๆ ไม่สามารถดำรงอยู่ได้ และแหล่งน้ำเกิดสภาพเน่าเสีย นอกจากนี้ ยังมีรายงานว่าแหล่งน้ำ

ที่ปกคลุมด้วยแพผักตบชวาจะมีอัตราการระเหยของน้ำสูงกว่าแหล่งน้ำตามปกติสูงถึง 3-8 เท่า (Chanathaworn, 2017; Sukasem *et al.*, 2017) จากการจับใช้ (up taking) และการคายน้ำ (dehydration) ของผักตบชวาซึ่งทำให้แหล่งน้ำสูญเสียความสามารถในการเก็บกักน้ำ (โดยเฉพาะแหล่งน้ำนิ่งที่ปราศจากการไหลถ่ายเท เช่น หนอง บึงหรือทะเลสาบ) นอกจากนี้ เมื่อผักตบชวาทายลงและขาดการเก็บน้ำออก จะทำให้เกิดการสะสมและทับถมของซากผักตบชวาในแหล่งน้ำส่งผลให้เกิดการเน่าเสีย ดินเน่าและสูญเสียความสามารถในการเป็นแหล่งกักเก็บน้ำในที่สุด เมื่อพิจารณาในเชิงสุขอนามัยยังพบว่าแพผักตบชวาเป็นแหล่งเพาะพันธุ์สำคัญของพาหะนำโรคและสัตว์เคี้ยวรื้อนราคาอื่น ๆ เช่น ยุง หนอนแมลงวัน หอยทาก หอยเชอรี่ และงู เป็นต้น (Patil *et al.*, 2014) จากที่กล่าวมาจึงสามารถอนุมานได้ว่าผักตบชวาเป็นวัชพืชซึ่งก่อให้เกิดปัญหาหลักต่อแหล่งน้ำตามธรรมชาติ ดังนั้น การกำจัด การควบคุม และการใช้ประโยชน์จากวัชพืชที่มีอยู่อย่างมหาศาลและหาได้โดยง่ายของผักตบชวาจึงเป็นแนวทางที่มีความสำคัญเร่งด่วน ซึ่งมีนักวิจัยทั่วโลกให้ความสนใจอย่างกว้างขวาง

หนึ่งในแนวทางการบริหารจัดการวัชพืชชนิดนี้ที่มีประสิทธิภาพคือ การนำไปหมักในสภาวะไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic digestion, AD) เพื่อการผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานสะอาดและหมุนเวียนได้ทดแทนการพึ่งพาแหล่งพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล เนื่องจากผักตบชวามีไนโตรเจนซึ่งเป็นธาตุอาหารสำคัญ และมีองค์ประกอบที่มีแนวโน้มในการย่อยสลายทางชีวภาพได้ดี อย่างไรก็ตาม องค์ประกอบสำคัญในผักตบชวาคือลิกโนเซลลูโลส (lignocellulosic substances) ได้แก่ ลิกนิน เฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลส โดยเฉพาะลิกนินซึ่งเป็นองค์ประกอบ

ซับซ้อนที่ยากต่อการย่อยสลายทางชีวภาพตามธรรมชาติ เป็นอุปสรรคและความท้าทายสำคัญอันทำให้ความสามารถในการผลิตก๊าซชีวภาพจากชีวมวลลิกโนเซลลูโลส หลายการศึกษารายงานว่ามีชีวมวลกลุ่มนี้เพียง 20-30 % เท่านั้นที่สามารถถูกย่อยและเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทนได้ระหว่างกระบวนการ AD (Sawatdeenarunat *et al.*, 2018; Kucharska *et al.*, 2018) ด้วยเหตุนี้ การปรับสภาพ (pre-treatment) ลิกโนเซลลูโลสจากชีวมวลหลายวิธีเพื่อเพิ่มความสามารถของการย่อยในขั้นตอนไฮโดรไลซิสและประสิทธิภาพโดยรวมของกระบวนการผลิตก๊าซมีเทนจึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ วิธีการดังกล่าวมีทั้งในรูปแบบทางกายภาพ เคมี ชีวภาพรวมถึงการใช้หลายวิธีร่วมกัน (Kumar and Sharma, 2017) ตัวอย่างเช่น การบดสับซึ่งเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการเพิ่มพื้นที่ผิวโดยรวมของวัตถุดิบ (feedstock) ทำให้การย่อยเป็นไปได้ง่ายขึ้นแต่วิธีการนี้มีปัญหาหลักคือต้องการพลังงานและการดูแลซ่อมบำรุงเครื่องจักรสูง การปรับสภาพด้วยสารเคมี เช่น การเติมกรด ด่าง หรือสารฟอสเฟต มีข้อดีคือช่วยเพิ่มความสามารถในการละลายของเฮมิเซลลูโลสและการใช้พลังงานต่ำ แต่มีข้อเสียคืออาจทำให้เกิดการปนเปื้อนของสารเคมีในวัตถุดิบ การกักตุนถึงปฏิกรณ์และระบบต่อรวมถึงต้นทุนราคาสูงสำหรับสารเคมีที่ใช้เพื่อการปรับสภาพและการปรับค่าพีเอช (Rodriguez *et al.*, 2017) เช่นเดียวกับการปรับสภาพทางชีวภาพซึ่งแม้ว่าจะเป็นวิธีการที่ต้องการพลังงานในการดำเนินการต่ำและมีโอกาสปนเปื้อนสารยับยั้งหรือสารยับยั้ง (inhibitor) ทางชีวภาพน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับวิธีการอื่น อย่างไรก็ตาม วิธีการนี้ก็มีประสิทธิภาพต่ำ อัตราการย่อยเกิดขึ้นได้ช้าเนื่องจากต้องอาศัยความจำเพาะเจาะจงของกลุ่มจุลินทรีย์และเอนไซม์ ส่งผลให้มีความต้องการพื้นที่และปฏิกรณ์ขนาดใหญ่ รวมถึงเอนไซม์จำเพาะบางชนิดมีราคาสูงมาก

(Seidl and Goulart, 2016) นอกเหนือจากวิธีการต่าง ๆ ที่กล่าวมา การใช้ความร้อน (thermal pre-treatment) เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่ได้รับคามนิยมในการปรับสภาพวัตถุดิบประเภทลิกโนเซลลูโลสซึ่งแม้จะเป็นวิธีการที่มีข้อจำกัดหลักคือความต้องการพลังงานสูง อย่างไรก็ตาม พลังงานความร้อนนี้อาจชดเชยได้ด้วยความร้อนเหลือทิ้งจากส่วนของระบบความร้อนร่วม (combined heat and power, CHP) ในโรงงานผลิตก๊าซชีวภาพ (Wang *et al.*, 2018) การให้ความร้อนกับวัตถุดิบทำได้หลายวิธี เช่น การใช้ลมร้อน อ่างอังไอน้ำ หม้อนึ่งไอน้ำ การใช้ความร้อนแรงดันสูง และการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งการปรับสภาพด้วยวิธีการนี้จะทำให้โครงสร้างที่ซับซ้อนของลิกนินและเฮมิเซลลูโลสที่ห่อหุ้มหรือเคลือบโครงสร้างเซลลูโลสมีแนวโน้มที่จะถูกย่อยได้มากขึ้น (Shrestha *et al.*, 2007) จากการทำลายพันธะไฮโดรเจนในโครงสร้างรูปผลึกเชิงซ้อนระหว่างลิกโนเซลลูโลสและเซลลูโลส (cellulose crystallinity) ช่วยให้เกิดช่องว่าง ความพรุน และพื้นที่ผิวสัมผัสเพิ่มขึ้น เอนไซม์สามารถเข้าถึงวัตถุดิบได้ง่าย ทำให้มีผลิตภัณฑ์จากการย่อยลิกโนเซลลูโลสในรูปสารละลาย (solubilization) ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่พร้อมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพมากขึ้น (Sawatdeenarunat *et al.*, 2015; Kumar *et al.*, 2018; Álvarez *et al.*, 2016) ส่งผลให้มีของแข็งระเหยในวัตถุดิบถูกกำจัด (volatile solid destruction, VSD) ได้ง่ายและมีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงขึ้น

การปรับสภาพลิกโนเซลลูโลสด้วยความร้อนโดยตรงอาศัยหลักสำคัญ 3 ประการสำหรับการถ่ายเทความร้อน ได้แก่ การนำความร้อน (conduction) การพาความร้อน (convection) และการแผ่รังสี (radiation) ซึ่งจะเริ่มต้นด้วยการพาความร้อน ตามด้วยการนำความร้อนสู่วัตถุดิบเพื่อการทำลายโครงสร้างที่ยาก

ต่อการย่อยสลายทางชีวภาพโดยอาศัยตัวกลาง (medium) ในการพาความร้อนที่แตกต่างกัน เช่น ลมร้อน น้ำร้อน หรือไอน้ำร้อน เป็นต้น จากนั้นความร้อนจะถูกถ่ายเทสู่ภาชนะบรรจุวัตถุดิบและนำความร้อนนั้นไปเพื่อทำลายโครงสร้างผนังเซลล์จากภายนอกทีละชั้นสู่แกนกลางของวัตถุดิบ (Barua and Kalamdhad, 2017a) แตกต่างกับการให้ความร้อนด้วยการให้คลื่นไมโครเวฟ เกิดจากการเหนี่ยวนำโมเลกุลของน้ำในส่วนที่มีขั้วเมื่อได้รับคลื่นไมโครเวฟที่มีความถี่สูงมากจะเหนี่ยวนำให้โมเลกุลของน้ำเปลี่ยนทิศ สลับไปมาอย่างรวดเร็วตามทิศทางของสนามไฟฟ้าเกิดการเสียดสีกันระหว่างโมเลกุลของน้ำที่สั่นสะเทือนทำให้เกิดความร้อนขึ้นมา (Kaatze, 1995) ซึ่งหากการให้ความร้อนนี้มากเพียงพอจะเกิดการทำลายพันธะไฮโดรเจนในผนังเซลล์พืช (Toreci *et al.*, 2009; Chatchavanthatri, 2016) ในขณะที่การให้คลื่นอัลตราโซนิกในรูปแบบของคลื่นที่มีการอัดและขยายผ่านตัวกลางของเหลวเกิดสภาวะแรงดันที่เป็นลบภายในตัวกลางส่งผลให้เกิดการยุบตัวของโมเลกุลตัวกลางเกิดเป็นฟองอากาศขนาดเล็ก ๆ ที่เรียกว่าการเกิดควิเตชัน (cavitation) ความรุนแรงจากการยุบตัวนี้จะทำให้เกิดการปลดปล่อยพลังงานรอบ ๆ ฟองอากาศขนาดเล็ก ส่งผลให้วัสดุลิกโนเซลลูโลสมีปริมาตรช่องว่างและรูพรุนหรือมีสภาพเป็นโพรง และมีพื้นที่ผิวสัมผัสเพิ่มขึ้น (Lomwichai, 2015) ง่ายต่อการเข้าถึงของเอนไซม์จากจุลินทรีย์เช่นเดียวกับวิธีการให้ความร้อน

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาแนวทางการใช้ความร้อนและคลื่นเพื่อการปรับสภาพผักตบชวาให้มีความพร้อมสำหรับการใช้เป็นวัตถุดิบในการย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจนเพื่อเสริมสร้างศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยทำการศึกษาวิธีการให้ความร้อนด้วยอากาศร้อน (hot air oven) แรงดันไอน้ำ (autoclave)

น้ำร้อน (hot water bath) และการให้คลื่นไมโครเวฟ (microwave) และคลื่นอัลตราโซนิก โดยประสิทธิภาพการปรับสภาพแต่ละวิธีการพิจารณาจากค่าซีโอดีละลาย (CODs) และค่ากรดไขมันระเหย (VFAs) ซึ่งอนุมานถึงปริมาณสารอินทรีย์ในรูปสารละลายที่มีความพร้อมสำหรับการเป็นสารตั้งต้นเพื่อการผลิตเป็นก๊าซชีวภาพ

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมตัวอย่างผักตบชวา

1.1 เก็บตัวอย่างผักตบชวาจากโครงการอนุรักษ์ฟื้นฟูแหล่งน้ำกุดต่างใจ บริเวณคลองบ้านท่าขอนยาง ต.ท่าขอนยาง อ.กันทรวิชัย จ.มหาสารคาม

1.2 ทำการแยกส่วนใบ ดอก ราก และลำต้น แล้วชั่งน้ำหนักของผักตบชวาแต่ละองค์ประกอบ (พิจารณาเป็นน้ำหนักสด)

1.3 ทุกส่วนประกอบได้ถูกนำมาสับและบดด้วยเครื่องบดให้มีขนาดเล็ก แล้วคลุกเคล้าให้เข้ากัน

1.4 วิเคราะห์ลักษณะสมบัติเบื้องต้นของผักตบชวาและนำไปปรับสภาพด้วยการให้ความร้อนด้วยอากาศร้อน (hot air oven) แร้งดันไอน้ำ (autoclave) น้ำร้อน (hot water bath) การให้คลื่นไมโครเวฟ (microwave) และคลื่นอัลตราโซนิก

2. การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของผักตบชวา

นำตัวอย่างผักตบชวาที่ผ่านการบดให้ละเอียดปริมาณ 50 g ใส่บีกเกอร์ขนาด 250 mL หุ้มปากบีกเกอร์ด้วยกระดาษฟอยด์ (ยกเว้นกรณีปรับสภาพด้วยเครื่องย่อยไมโครเวฟซึ่งใช้ภาชนะเฉพาะกับเครื่องย่อยไมโครเวฟเท่านั้น) เพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นและกรดไขมันระเหยเนื่องจากความร้อนจากกระบวนการปรับสภาพ จากนั้นนำไปให้ความร้อนด้วยเทคนิคต่าง ๆ ตามอุณหภูมิและระยะเวลาในการให้ความร้อนที่กำหนด สภาวะละ 2 บีกเกอร์ (รวมชุดควบคุมของแต่ละสภาวะ) ภายหลัง

การปรับสภาพด้วยเทคนิคต่าง ๆ ทำการแบ่งตัวอย่างผักตบชวาออกเป็น 2 ส่วน เพื่อวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของผักตบชวา (characterization of water hyacinth) คือ การศึกษามวลรวมผักตบชวาจากส่วนใบ ลำต้น และราก และลักษณะสมบัติทางกายภาพเคมีซึ่งประกอบไปด้วย องค์ประกอบของแข็งได้แก่ ปริมาณของแข็งทั้งหมด (total solids, TS) ปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมด (volatile solids, VS) ปริมาณเถ้า (ash) และค่าความชื้น (moisture) พีเอช (pH) ซีโอดีในส่วนของเหลวหรือซีโอดีละลาย (soluble COD, CODs) สภาพด่างทั้งหมด (total alkalinity, TA) และกรดไขมันระเหย (volatile fatty acids, VFAs)

ส่วนที่ 1 ถ่ายตัวอย่างจากบีกเกอร์จำนวน 15 g ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 500 mL เติมน้ำกลั่น 300 mL (กำหนดอัตราส่วนผักตบชวา/น้ำกลั่น หรืออัตราส่วน solid/liquid, S/L ratio เท่ากับ 5 g/100 mL) ปิดปากขวดรูปชมพู่ด้วยกระดาษฟอยด์ นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่อุณหภูมิห้อง 150 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำไปแยกส่วนของเหลวด้วยการปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 6,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นจึงนำเฉพาะของเหลวส่วนใส (supernatant) มาทำการวิเคราะห์ CODs, VFAs และ TA

ส่วนที่ 2 นำตัวอย่างผักตบชวาในส่วนที่เหลือประมาณ 35 g ไปวิเคราะห์ค่า pH, moisture, TS, VS และ ash

3. การรวบรวมข้อมูล

การให้ความร้อนด้วยเตาอบลมร้อน หม้อนึ่ง ความดันไอน้ำ อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ และการให้คลื่นด้วยไมโครเวฟและคลื่นอัลตราโซนิก เป็นการปรับสภาพผักตบชวา โดยทำการศึกษาผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการปรับสภาพผักตบชวา ซึ่งสภาวะในการให้ความร้อนและการให้คลื่นใน

งานวิจัยครั้งนี้ ได้ทำการเลือกจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ผ่านมา (Barua and Kalamdhad, 2017a) เพื่อให้สามารถใช้เป็นข้อมูลในการเปรียบเทียบกับผลการศึกษานี้

3.1 การหาองค์ประกอบและลักษณะสมบัติของผักตบชวา ดังรายละเอียดในข้อ 1.2

3.2 การศึกษาผลของอุณหภูมิและระยะเวลาให้ความร้อนด้วยเทคนิคต่าง ๆ (เตาอบลมร้อน, หม้อนึ่งความดันไอน้ำ และอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ)

3.2.1 อุณหภูมิในการให้ความร้อน

เตรียมตัวอย่างผักตบชวาที่อุณหภูมิแตกต่างกันด้วยระยะเวลาที่กำหนด เปรียบเทียบกับชุดควบคุม (ไม่ปรับสภาพผักตบชวา) ของแต่ละสภาวะ โดยรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. เตาอบลมร้อน ที่ 80, 90, 100, 110 และ 120 °C เป็นเวลา 120 นาที
2. หม้อนึ่งความดันไอน้ำ ที่ 105, 110, 120 และ 135 °C เป็นเวลา 20 นาที
3. อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ ที่ 70, 80, 90 และ 100 °C เป็นเวลา 30 นาที

3.2.2 ระยะเวลาในการให้ความร้อน

เตรียมผักตบชวาคละแยกแบ่งเป็นชุดควบคุม และชุดที่ปรับสภาพด้วยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิที่เหมาะสมที่ได้จากขั้นตอน 3.2.1 มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. เตาอบลมร้อนที่ 30, 60, 90 และ 120 นาที
2. อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ ที่ 30, 60, 90 และ 120 นาที

3.3 การศึกษาผลของคลื่นและระยะเวลาให้คลื่นไมโครเวฟ และคลื่นอัลตราโซนิก

3.3.1 อุณหภูมิในการให้คลื่น

เตรียมตัวอย่างผักตบชวาที่อุณหภูมิแตกต่างกันด้วยระยะเวลาที่กำหนด เปรียบเทียบกับชุดควบคุม (ไม่ปรับสภาพผักตบชวา) ของแต่ละสภาวะ โดยรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. คลื่นไมโครเวฟ ที่ 160, 180, 200 และ 220 °C เป็นเวลา 10 นาที
2. คลื่นอัลตราโซนิก ทำการศึกษาที่อุณหภูมิห้อง

3.2.2 ระยะเวลาในการให้คลื่น

เตรียมผักตบชวาคละแยกแบ่งเป็นชุดควบคุม และชุดที่ปรับสภาพด้วยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิที่เหมาะสมที่ได้จากขั้นตอน 3.3.1 มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

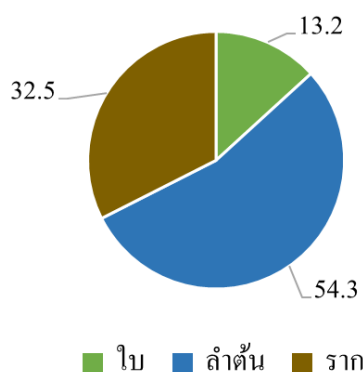
1. คลื่นไมโครเวฟ ที่ 3 และ 5 นาที
2. คลื่นอัลตราโซนิก ที่ 10, 20 และ 30 นาที

ระบุอุณหภูมิและระยะเวลาในการให้ความร้อนและให้คลื่นเพื่อปรับสภาพผักตบชวาที่เหมาะสมของแต่ละเทคนิคโดยพิจารณาจากค่าซีโอดีในส่วนของเหลว (CODs) เป็นหลัก โดยพารามิเตอร์ CODs, VFAs, TA, pH, moisture, TS, VS และ ash ได้ทำการวิเคราะห์ซ้ำ (replicate) อย่างน้อย 3 ครั้ง โดยรายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. องค์ประกอบและลักษณะสมบัติของผักตบชวา

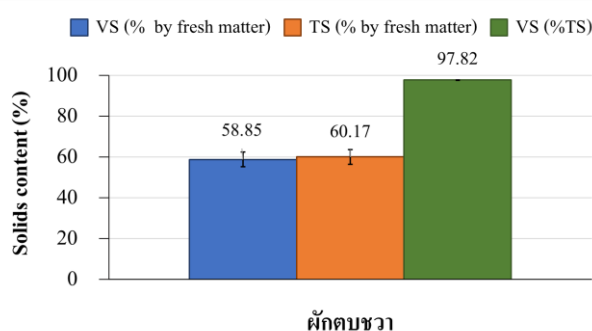
พบ ลำต้น ราก ใบ (คิดเป็นร้อยละโดยน้ำหนักสด) มีอัตราส่วน 54.3: 32.5: 13.2 ตามลำดับ ดังภาพที่ 1



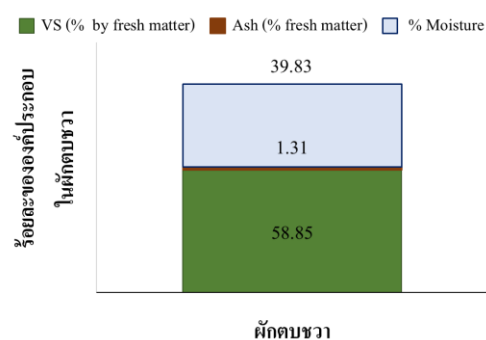
ภาพที่ 1 องค์ประกอบของต้นผักตบชวาร้อยละ โดยน้ำหนักสด (เปียก)

ตัวอย่างผักตบชวาที่ใช้เพื่อวิเคราะห์ลักษณะสมบัติเบื้องต้น และเพื่อการปรับสภาพที่สภาวะต่าง ๆ แต่ผลการทดลอง ได้ทำการเตรียมที่อัตราการส่วนของลำต้น:ใบ:ราก เท่ากับ 54.3: 32.5: 13.2 โดยน้ำหนักสด ตัวอย่างผักตบชวาทุกส่วนถูกนำมาสับและบดด้วยเครื่องบดให้มีขนาดเล็ก จากนั้นคลุกเคล้าให้เข้ากัน

ทั้งในส่วนที่เป็นของแข็งและของเหลว ผลการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติเบื้องต้นของผักตบชวา (characterization of water hyacinth) โดยพบว่าตัวอย่างผักตบชวาคละเอียดย่อยทุกส่วนมีค่าพีเอช 7.80 ± 0.1 ส่วนองค์ประกอบของแข็งในผักตบชวาแสดงดังภาพที่ 2



(A)



(B)

ภาพที่ 2 องค์ประกอบของแข็ง (A) และค่าความชื้น (B) ในผักตบชวา

พิจารณาภาพที่ 2 พบว่าองค์ประกอบส่วนใหญ่ของมวลรวมผักตบชวา คือของแข็งทั้งหมด (total solids, TS) ประกอบด้วยของแข็งระเหยได้ (volatile solid, VS) ซึ่งหมายถึงสารอินทรีย์ และเถ้าได้แก่ส่วนที่เป็นสารอนินทรีย์หรือสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยาก ภาพที่ 2(A) สังเกตพบว่าของแข็งในผักตบชวาส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของแข็งระเหย (VS) ซึ่งมีมากถึง 58.85 โดยน้ำหนักสด (% FM) หรือ 97.82 (% TS)

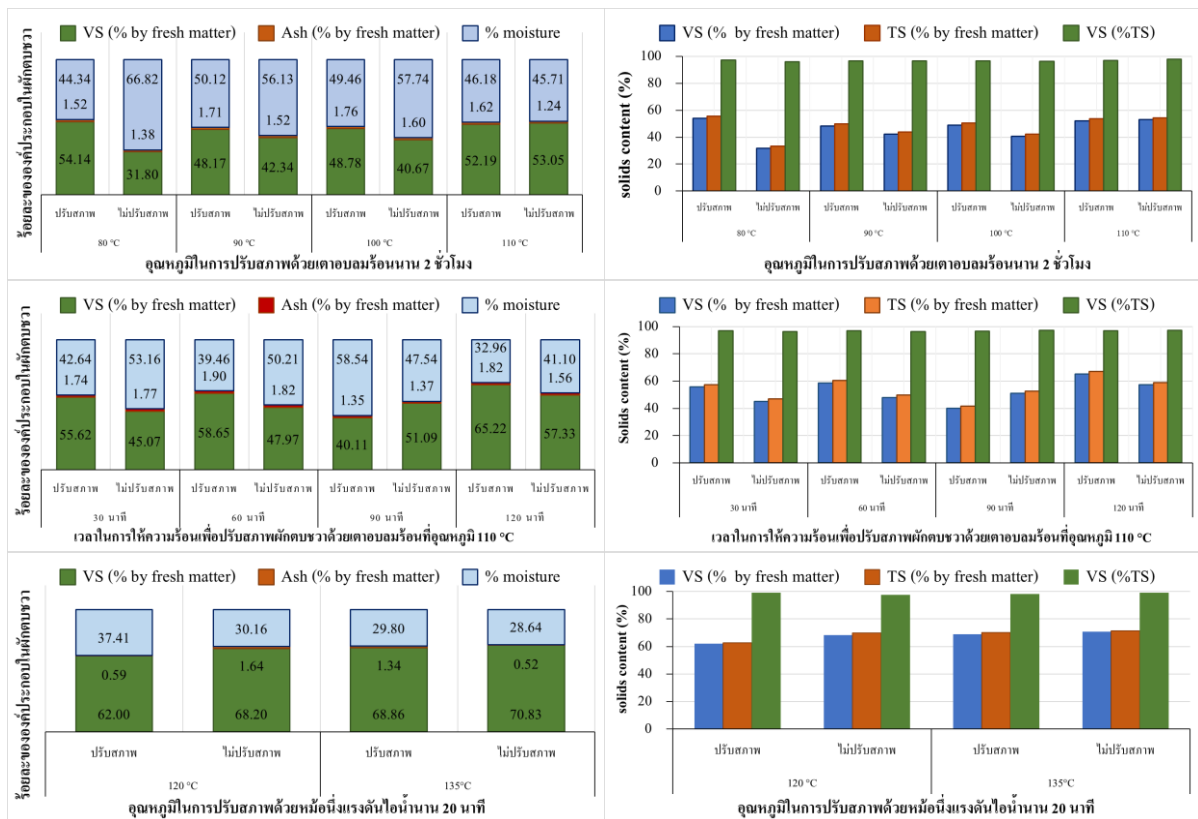
แสดงให้เห็นว่าผักตบชวามีแนวโน้มที่จะมีศักยภาพในการเป็นวัตถุดิบเพื่อการผลิตก๊าซชีวภาพได้ดี เนื่องจากปริมาณของแข็งระเหยในผักตบชวา หมายถึงปริมาณสารอินทรีย์ที่มีศักยภาพในการเปลี่ยนรูปไปเป็นก๊าซชีวภาพภายหลังกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยจากภาพที่ 2(B) พบปริมาณเถ้าเพียง 1.31 % โดยองค์ประกอบส่วนที่เหลือคือความชื้นมากถึง 39.83 %

2. ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการให้ความร้อนหรือให้คลื่นเพื่อการปรับสภาพต่อลักษณะสมบัติของผักตบชวา

2.1 องค์ประกอบของแข็ง (solids content)

เทคนิคการเตรียมตัวอย่างผักตบชวาในกระบวนการปรับสภาพได้ทำการห่อหุ้มปากบีกเกอร์ขนาด 250 mL ที่บรรจุผักตบชวา 50 g ด้วยกระดาษฟอยด์เพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นระหว่างการปรับสภาพที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่าง ๆ พบว่าหากเปรียบเทียบความชื้นในชุดควบคุมของแต่ละสภาวะ (กรณีไม่ปรับสภาพ) และกรณีปรับสภาพ เกิดการ

สูญเสียความชื้นไม่มากนัก ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่าเทคนิคที่ใช้เพื่อการเตรียมตัวอย่างดังกล่าวเป็นวิธีการที่เหมาะสมเนื่องจากไม่ทำให้ลักษณะสมบัติของตัวอย่างด้าน solids content เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิและระยะเวลาในการให้ความร้อนที่เปลี่ยนแปลงในช่วง 80-110 °C สำหรับเตาอบลมร้อน และ 120-135 °C สำหรับหม้อนึ่งแรงดันไอน้ำ ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการให้ความร้อนด้วยเตาอบลมร้อนและหม้อนึ่งแรงดันสูงต่อ solids content (%) ในผักตบชวาแสดงดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการปรับสภาพผักตบชวากับเตาอบลมร้อนและหม้อนึ่งแรงดันไอน้ำต่อ solids content และ moisture

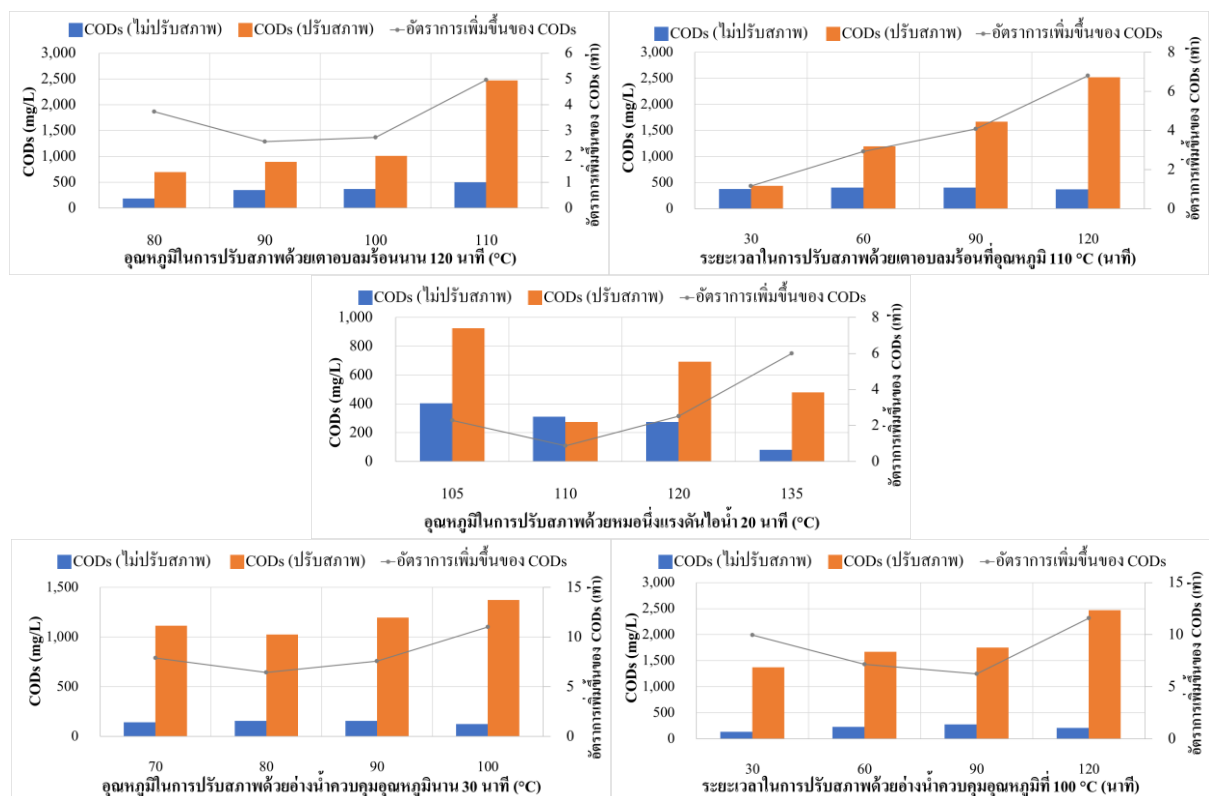
การปรับสภาพผักตบชวาด้วยเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 80 90 100 และ 110 °C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง และที่ 110 °C เป็นระยะเวลา 30 60 90 และ 120 นาที พบ TS มีค่าระหว่างร้อยละ 33.18 - 67.04 (% FM) พบว่าส่วนใหญ่อยู่ในรูป VS หรือสารอินทรีย์ โดยมีสูงถึง 31.80 - 65.22 (% FM) หรือ 95.84 - 97.71 (% TS) โดยพบว่ามี ash (สารอนินทรีย์หรือสารอินทรีย์ย่อยสลายได้ยากทางชีวภาพ) เพียง 1.24 - 1.90 (% FM)

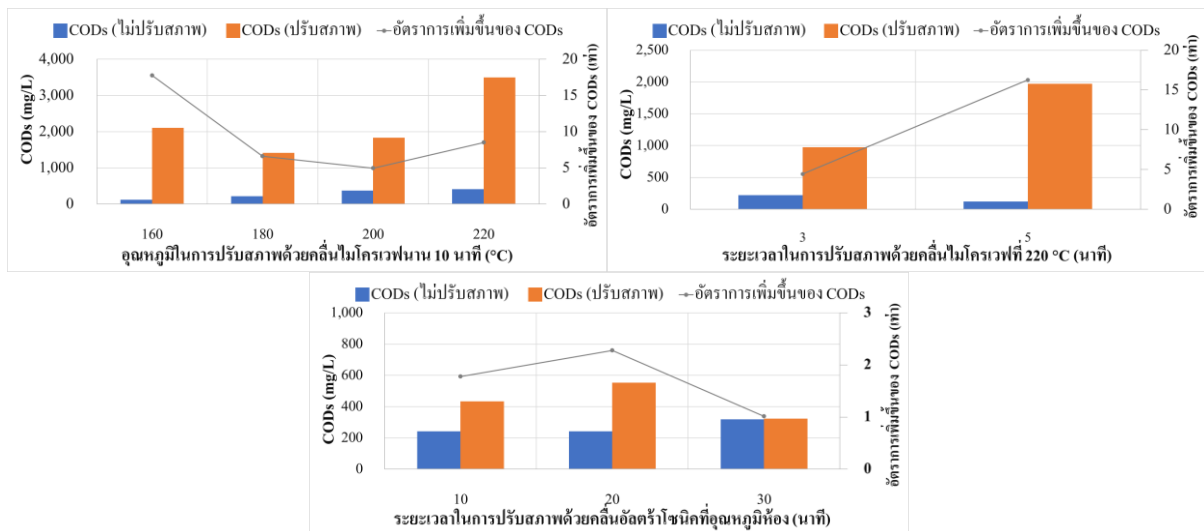
การปรับสภาพด้วยหม้อนึ่งแรงดันไอน้ำที่อุณหภูมิ 120 และ 135 °C เป็นระยะเวลา 20 นาที พบว่า TS มีค่าระหว่าง 62.59 - 71.36 (% FM) พบว่าส่วนใหญ่อยู่ในรูป VS หรือสารอินทรีย์ โดยมีสูงถึง 62.00 - 70.83 (% FM) หรือ 97.65 - 99.27 (% TS) โดยพบว่ามี ash เพียง 0.52 - 1.64 (% FM)

จึงกล่าวได้ว่าผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพและไม่ปรับสภาพด้วยเตาอบลมร้อนและหม้อนึ่งแรงดันไอน้ำในทุกสภาวะมีอัตราส่วนของปริมาณสารอินทรีย์ที่มีศักยภาพในการเปลี่ยนรูปไปเป็นก๊าซชีวภาพ (มีเทน) ภายหลังกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนสูง และจะเห็นได้ว่ากระบวนการปรับสภาพผักตบชวาไม่ทำให้เกิดการสูญเสียสารอินทรีย์ในรูป VS

2.2 ซีโอดีในส่วนของของเหลวหรือซีโอดีละลาย (soluble COD, CODs)

ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการให้ความร้อนและการให้คลื่นด้วยเทคนิคต่าง ๆ ต่อ CODs แสดงดังภาพที่ 4





ภาพที่ 4 ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการปรับสภาพผักตบชวาต่อ CODs

จากภาพที่ 4 จะเห็นได้ว่า โดยภาพรวมการปรับสภาพผักตบชวากับเทคนิคต่าง ๆ CODs มีค่าสูงกว่ากรณีที่ไม่มีการปรับสภาพ อัตราส่วนการเพิ่มขึ้นของ CODs มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและระยะเวลาการปรับสภาพที่สูงขึ้น ซึ่งให้ข้อมูลประกอบข้อบ่งชี้ของลักษณะการย่อยสลายของผักตบชวาที่ยากต่อการย่อยสลายซึ่งอยู่ในรูปของแข็งหรือ slurry สามารถถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปแบบของสารอินทรีย์ละลาย (soluble form) ซึ่งมีความพร้อมต่อการเป็นสารตั้งต้นเพื่อการผลิตก๊าซชีวภาพได้มากขึ้น ช่วยลดระยะเวลาในการปรับตัวของจุลินทรีย์ในช่วง lag phase และเพิ่มศักยภาพโดยรวมของการผลิตก๊าซมีเทน (Phuttaro *et al.*, 2019; Barua and Kalamdhad, 2017b) และช่วยลดระยะเวลาในขั้นตอนการเกิดไฮโดรไลซิส (hydrolysis stage) ซึ่งเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวางว่าขั้นตอนนี้เป็นปัจจัยควบคุมหลักของกระบวนการทั้งหมด (overall rate limitation) ในการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจน จากการศึกษาพบว่ากรณีใช้เตาอบลมร้อน ให้ค่า CODs สูงที่สุดเท่ากับ 2,250 mg/L จากการปรับสภาพด้วยอุณหภูมิ 110 °C เป็น

เวลา 120 นาที กรณีหม้อนึ่งแรงดันไอน้ำได้ CODs สูงสุดที่ 924 mg/L (105 °C เป็นเวลา 20 นาที) อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิให้ค่า CODs สูงที่สุดเท่ากับ 2,467 mg/L (100 °C เป็นเวลา 120 นาที) ไมโครเวฟให้ค่า CODs สูงที่สุดเท่ากับ 3,498 mg/L (220 °C เป็นเวลา 10 นาที) และคลื่นอัลตราโซนิกให้ค่า CODs สูงที่สุดเท่ากับ 533 mg/L (อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 20 นาที)

ในการศึกษานี้แม้ว่าจะมีวิธีการ อุณหภูมิ และช่วงเวลาของการปรับสภาพผักตบชวาที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามจากภาพที่ 4 การปรับสภาพโดยการให้คลื่นอัลตราโซนิกมีอัตราการเพิ่มขึ้นของ CODs น้อยที่สุด (1.0 - 2.3) เท่า เมื่อเทียบกับชุดควบคุม ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากพลังงานของการให้คลื่นไม่เพียงพอต่อการทำลายโครงสร้างผนังเซลล์พืช ประกอบกับเป็นการทดลอง ณ อุณหภูมิห้อง และการให้คลื่นอัลตราโซนิกมิใช่การปรับสภาพวัตถุดิบโดยการให้ความร้อนโดยตรง นอกจากนี้ ยังมีรายงานว่า การปรับสภาพวัตถุดิบด้วยคลื่นอัลตราโซนิกส่วนใหญ่นิยมใช้กับวัตถุดิบที่มีปริมาณน้ำสูง เช่น มูลสัตว์ น้ำเสีย หรือตะกอนจุลินทรีย์ (Braeutigam, *et al.*, 2014; Gallipoli, *et al.*, 2014) เพื่อการส่งผ่านคลื่น

เสี่ยงจากผิวย่อยต่อของน้ำกับของแข็งมากกว่าผิวย่อยต่อของอากาศกับของแข็ง ดังนั้นการปรับสภาพวัตถุดิบด้วยวิธีการนี้ควรจะมีการเติมน้ำเพิ่มเติม (Rodriguez, 2017)

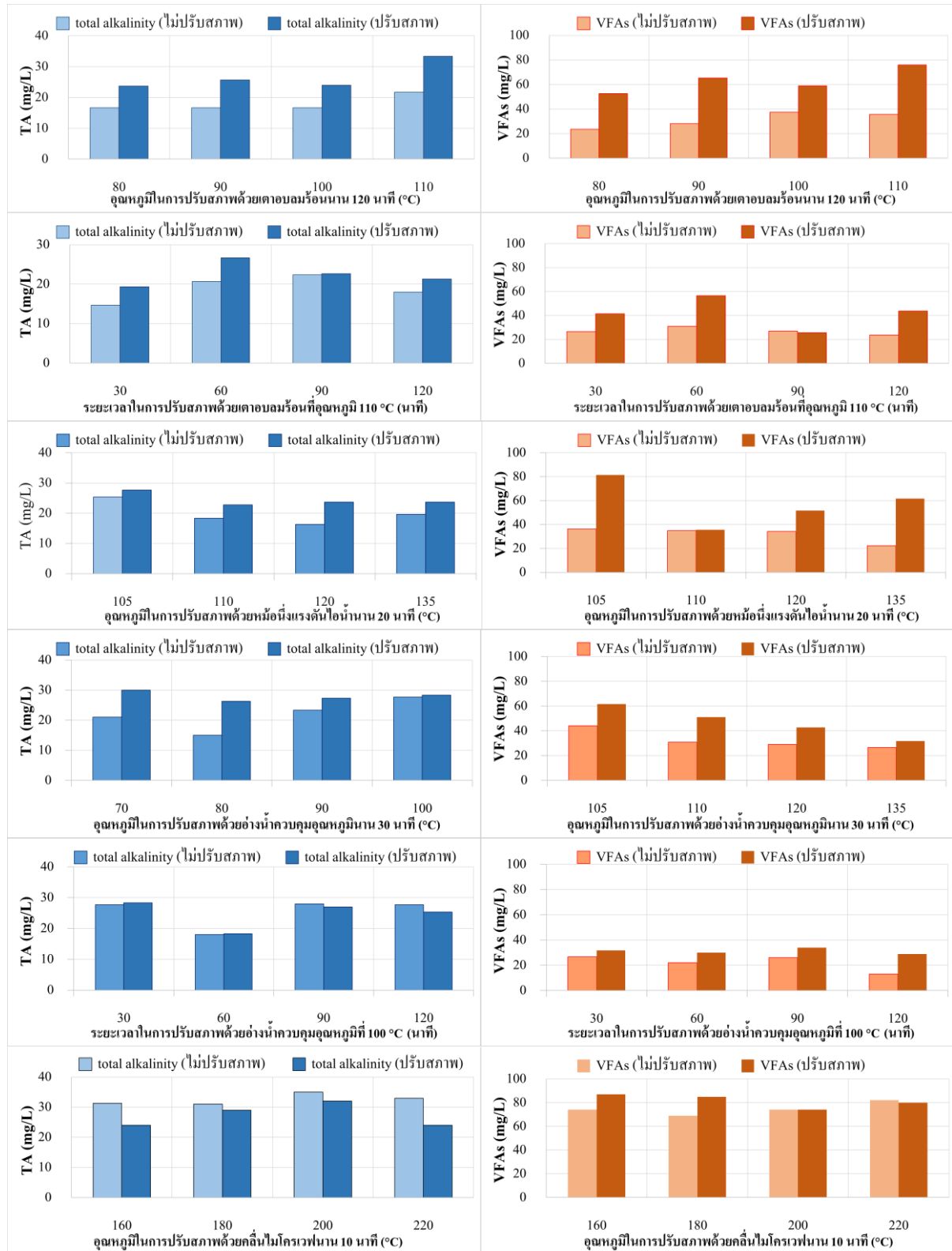
เมื่อพิจารณาการปรับสภาพโดยการพาความร้อนโดยตรงด้วยตัวกลางคือลมร้อน น้ำร้อนและไอน้ำร้อน พบว่าการปรับสภาพด้วยไอน้ำร้อนมีค่า CODs สูงสุดคือ 2,467 mg/L คิดเป็น 11.6 เท่า เมื่อเทียบกับชุดควบคุม ผลการศึกษานี้แตกต่างจากการศึกษาของ Barua and Kalamdhad (2017a) ซึ่งปรับสภาพผักตบชวาด้วยเทคนิคเตาอบลมร้อน ไอน้ำควบคุมอุณหภูมิ หม้อนึ่งไอน้ำและไมโครเวฟ ในช่วงอุณหภูมิ 70 - 220 °C ด้วยระยะเวลา 5 - 150 นาที ได้สรุปว่าการปรับสภาพด้วยเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 90 °C นาน 60 นาทีเป็นสภาวะที่มีอัตราการเพิ่มขึ้นของ CODs สูงที่สุดคิดเป็น 2.3 เท่าของชุดควบคุม โดยผู้วิจัยให้เหตุผลว่าการใช้อุณหภูมิหรือระยะเวลาสูงกว่าสภาวะดังกล่าวจะทำให้ผักตบชวาสυญเสียสารอินทรีย์ในรูปของ VFAs จากการระเหย รวมถึงการสูญเสียความชื้นที่จะทำให้ผักตบชวามีลักษณะแห้ง และมี CODs ลดลง ซึ่งอาจเป็นเหตุผลที่ทำให้มีผลการทดลองแตกต่างจากผลการศึกษาในครั้งนี้ที่มีการลดการระเหยโดยทำการทดลองในภาชนะปิด

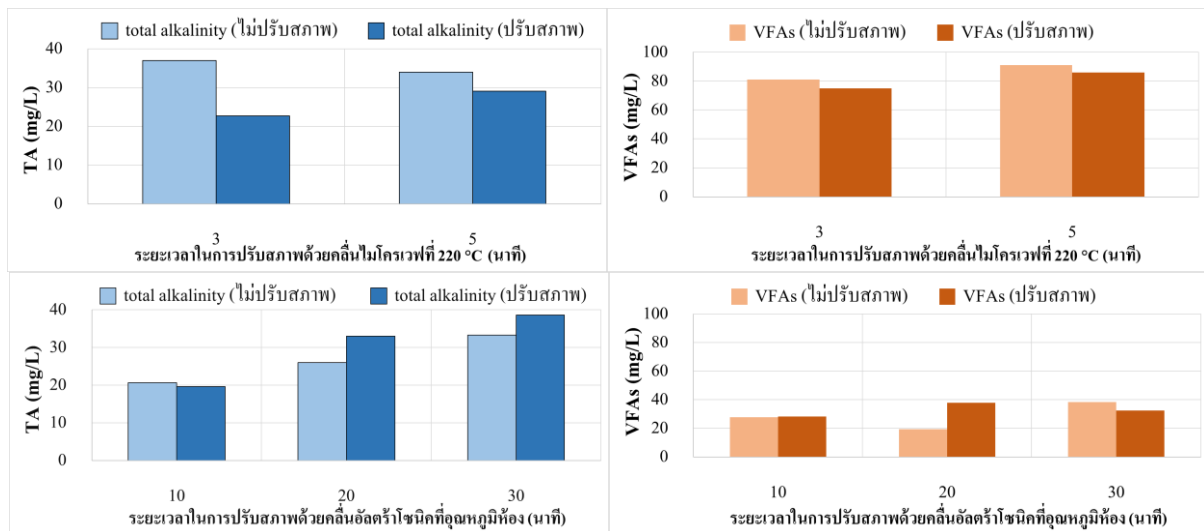
จากภาพที่ 4 เมื่อพิจารณา CODs พบว่าการปรับสภาพด้วยไมโครเวฟที่อุณหภูมิสูงสุด 220 °C เป็นเวลานานที่สุด 10 นาทีจะมีค่าสูงที่สุดคือ 3,498 mg/L ขณะที่อัตราการเพิ่มขึ้นของ CODs สูงสุดคิดเป็น 17.8 เท่าเมื่อเทียบกับชุดการทดลองในกรณีชุดควบคุมในกรณีที่ใช้ไมโครเวฟที่ 160 °C นาน 10 นาที แม้จะเห็นว่าเป็นสภาวะที่มี CODs ซึ่งเป็นสารตั้งต้นที่พร้อมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดอย่างไรก็ตาม

ปัจจัยอื่น ๆ ควรมีการศึกษาเพิ่มเติม เนื่องจากมีรายงานว่า การปรับสภาพวัตถุดิบลิกโนเซลลูโลสที่อุณหภูมิสูงเกินไปนอกจากจะเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานแล้วยังมีโอกาask่อให้เกิดสารที่เป็นพิษหรือสารยับยั้งที่เกิดจากการย่อยลิกนินและน้ำตาลบางชนิดเช่น สารประกอบฟีนอล อนุพันธ์ของฟูราน (furan derivatives) โดยเฉพาะ furfural และ 5-hydroxymethylfurfural (HMF) ซึ่งส่งผลเสียต่อจุลินทรีย์ในระบบการย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Ghasimi *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2018) ตัวอย่างเช่น รายงานของ Phuttaro *et al.* (2019) ศึกษาการปรับสภาพหญ้าเนเปียร์ด้วยเทคนิคน้ำร้อนแรงดันสูง (hydrothermal pretreatment) ที่อุณหภูมิ 125 - 200 °C ซึ่งพบว่าการปรับสภาพที่ 200 °C จะมีปริมาณ CODs สูงที่สุดคิดเป็นประมาณ 20 เท่าของชุดควบคุม อย่างไรก็ตาม จากการทดสอบศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนแบบ batch พบว่าการปรับสภาพที่อุณหภูมิ 175 °C ให้ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนสูงที่สุด ในขณะที่การปรับสภาพที่ 200 °C มีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนต่ำที่สุด เนื่องจากตรวจพบสารยับยั้งจากการปรับสภาพคือ furfural และ HMF ด้วยเหตุนี้ จึงควรดำเนินการศึกษาองค์ประกอบอื่น ๆ ในผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพแล้วโดยเฉพาะสารยับยั้งที่อาจส่งผลต่อศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ รวมถึงศึกษาแนวทางในการลดพลังงานเพื่อการปรับสภาพผักตบชวาในอนาคต

2.3 สภาพด่าง (total alkalinity, TA) และกรดไขมันระเหย (volatile fatty acids, VFAs)

ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการให้ความร้อนและการให้คลื่นด้วยเทคนิคต่าง ๆ ต่อลักษณะสมบัติของผักตบชวา แสดงดังภาพที่ 5





ภาพที่ 5 ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการปรับสภาพผักตบชวาต่อ TA และ VFAs

จากภาพที่ 5 แสดงให้เห็นว่า TA มีค่าไม่เกิน 100 mg/L ซึ่งถือว่ามีความเหมาะสมสำหรับระบบการย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจน ดังนั้น ในการดำเนินระบบในสถานการณ์จริงซึ่งใช้ปฏิบัติการแบบต่อเนื่อง (continuous mode) หากไม่ได้รับ alkalinity จากวัตถุดิบเพียงพอ ระบบอาจจำเป็นต้องได้รับการเสริมสภาพต่าง (alkalinity supplementation) ด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ (buffer solution) เพื่อเป็นการป้องกันไม่ทำให้ระบบถูกยับยั้งด้วยกรดอินทรีย์ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากการย่อยสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน

และเมื่อพิจารณาจากภาพรวมของ VFAs พบว่า VFAs มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นภายหลังการปรับสภาพเมื่อเทียบกับชุดควบคุม ซึ่งให้ให้เห็นว่ามีสารอินทรีย์ในรูปสารอินทรีย์ละลายที่พร้อมต่อการเป็นสารตั้งต้นเพื่อการผลิตก๊าซชีวภาพมากขึ้น และมีแนวโน้มที่จะถูกย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่ายขึ้น สอดคล้องกับแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่า CODs โดยทั่วไปกรดอ่อน เช่น กรดฟอร์มิกและกรดอะซิติก จะเกิดขึ้นจากการปรับสภาพวัตถุดิบลิกโนเซลลูโลสด้วยความร้อน ซึ่งจะช่วยกระตุ้นการปรับสภาพเซลลูโลสต่อไปภายใต้สภาวะออกซิเดชันด้วยกรด (oxidative acidic condition) ตามอุณหภูมิที่สูงขึ้นของ

การปรับสภาพ (Yousefifar *et al.*, 2017; Mohapatra *et al.*, 2017) โดยมักจะพบกรดอะซิติกเป็นหลักใน VFAs ซึ่งเป็นผลมาจากการย่อยสารอินทรีย์กลุ่มอะเซทิล (acetyl group) ในองค์ประกอบของชีวมวลเฮมิเซลลูโลส (Jönsson and Martín, 2016)

สรุป

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการปรับสภาพผักตบชวาโดยใช้ความร้อนและการให้คลื่นเพื่อให้มีความพร้อม มีแนวโน้มในการย่อยสลายทางชีวภาพ เป็นการส่งเสริมให้มีศักยภาพสำหรับใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตก๊าซชีวภาพมากขึ้น โดยเทคนิคการให้ความร้อนโดยตรงได้แก่ เตาอบลมร้อน อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ หม้อนึ่งแรงดันไอน้ำ และการให้คลื่นไมโครเวฟและอัลตราโซนิก ประสิทธิภาพการเพิ่มความพร้อมต่อการเป็นสารตั้งต้นเพื่อการผลิตก๊าซชีวภาพพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงของสารอินทรีย์ในรูปสารละลายจาก CODs และ VFAs ผลการศึกษาพบว่า การปรับสภาพผักตบชวาส่งผลให้มีค่า CODs สูงขึ้นกว่าการไม่ปรับสภาพ โดย CODs มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามระดับอุณหภูมิและ

ระยะเวลาการให้ความร้อนและการให้กลิ่นที่สูงขึ้น การปรับสภาพด้วยวิธีการให้ความร้อนโดยตรงซึ่งมี น้ำร้อนเป็นตัวกลางในการพาความร้อนจากเทคนิค อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิให้ค่า CODs สูงที่สุด อัตรา การเพิ่มขึ้นของ CODs จากวิธีการปรับสภาพด้วยการ ให้กลิ่นอัลตราโซนิกมีค่าต่ำที่สุด ในขณะที่การ เพิ่มขึ้นของ CODs จากการให้กลิ่นไมโครเวฟที่ อุณหภูมิสูงมีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับผักตบชวาที่ไม่ มีการปรับสภาพ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ โครงการสนับสนุนทุน นักวิจัยใหม่ (วท.) ประจำปี 2562 ฝ่ายนักเรียนทุน รัฐบาลทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี แห่งชาติ และเงินทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณ เงินรายได้ ประจำปี 2563 คณะสิ่งแวดล้อมและ ทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

เอกสารอ้างอิง

- Álvarez, C., Reyes-Sosa, F.M. and Díez, B. 2016. Enzymatic hydrolysis of biomass from wood. **Microbial Biotechnology** 9(2): 149-156.
- Barua, V.B. and Kalamdhad, A.S. 2016. Water hyacinth to biogas: a review. **Pollution Research** 35(3): 491-501.
- Barua, V.B. and Kalamdhad, A.S. 2017a. Effect of various types of thermal pretreatment techniques on the hydrolysis, compositional analysis and characterization of water hyacinth. **Bioresource Technology** 227: 147-154.
- Barua, V.B. and Kalamdhad, A.S. 2017b. Biochemical methane potential test of untreated and hot air oven pretreated water hyacinth: A comparative study. **Journal of Cleaner Production** 166: 273-284.
- Bhattacharya, A. and Kumar, P. 2010. Water Hyacinth as a potential biofuel crop. **Electronic Journal of Environmental, Agricultural and Food Chemistry** 9(1): 112-122.
- Braeutigam, P., Franke, M. and Ondruschka, B. 2014. Effect of ultrasound amplitude and reaction time on the anaerobic fermentation of chicken manure for biogas production. **Biomass and Bioenergy** 63: 109-113.
- Chanathaworn, J. 2017. Operating condition optimization of water hyacinth and earthworm bedding wastewater for biogas production. **Energy Procedia** 138: 253-259.
- Chatchavanthatri, N. 2016. Alkaline and microwave-assisted alkali pretreatments of rice straw for enhancing the efficiency of enzymatic hydrolysis. Master Thesis of Engineering, Suranaree University of Technology. (in Thai)
- Gallipoli, A., Gianico, A., Gagliano, M.C. and Braguglia, C.M. 2014. Potential of high-frequency ultrasounds to improve sludge anaerobic conversion and surfactants removal at different food/inoculum ratio. **Bioresource Technology** 159: 207-214.
- Ghasimi, D.S.M., Aboudi, K., de Kreuk, M., Zandvoort, M.H. and van Lier, J.B. 2016. Impact of lignocellulosic-waste intermediates on hydrolysis and methanogenesis under

- thermophilic and mesophilic conditions. **Chemical Engineering Journal** 295: 181-191.
- Jönsson, L.J. and Martín, C. 2016. Pretreatment of lignocellulose: Formation of inhibitory by-products and strategies for minimizing their effects. **Bioresource Technology** 199: 103-112.
- Kaatze, U. 1995. Fundamentals of microwaves. **Radiation Physics and Chemistry** 45(4): 539-548.
- Kucharska, K., Hołowacz, I., Konopacka-Łyskawa, D., Rybarczyk, P. and Kamiński, M. 2018. Key issues in modeling and optimization of lignocellulosic biomass fermentative conversion to gaseous biofuels. **Renewable Energy** 129: 384-408.
- Kumar, A.K. and Sharma, S. 2017. Recent updates on different methods of pretreatment of lignocellulosic feedstocks: a review. **Bioresources and Bioprocessing** 4(1): 7.
- Kumar, M., Oyedun, A.O. and Kumar, A. 2018. A review on the current status of various hydrothermal technologies on biomass feedstock. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 81: 1742-1770.
- Lomwichai, K. 2015. Enhancement of bio-methane production from cassava pulp using ultrasonic wave in pretreatment process. Master Thesis of Engineering, Suranaree University of Technology. (in Thai)
- Mohapatra, S., Mishra, C., Behera, S.S. and Thatoi, H. 2017. Application of pretreatment, fermentation and molecular techniques for enhancing bioethanol production from grass biomass - A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 78: 1007-1032.
- Patil, J.H., Antonyraj, M.a.L., Shankar, B.B., Shetty, M.K. and Kumar, B.P.P. 2014. Anaerobic Co-digestion of Water Hyacinth and Sheep Waste. **Energy Procedia** 52: 572-578.
- Phuttaro, C., Sawatdeenarunat, C., Surendra, K.C., Boonsawang, P., Chaiprapat, S. and Khanal, S.K. 2019. Anaerobic digestion of hydrothermally- pretreated lignocellulosic biomass: Influence of pretreatment temperatures, inhibitors and soluble organics on methane yield. **Bioresource Technology** 284: 128-138.
- Rodriguez, C., Alaswad, A., Benyounis, K.Y. and Olabi, A.G. 2017. Pretreatment techniques used in biogas production from grass. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 68: 1193-1204.
- Sawatdeenarunat, C., Surendra, K.C., Takara, D., Oechsner, H. and Khanal, S.K. 2015. Anaerobic digestion of lignocellulosic biomass: Challenges and opportunities. **Bioresource Technology** 178: 178-186.
- Sawatdeenarunat, C., Nam, H., Adhikari, S., Sung, S. and Khanal, S.K. 2018. Decentralized biorefinery for lignocellulosic biomass: Integrating anaerobic digestion with thermochemical conversion. **Bioresource Technology** 250: 140-147.
- Seidl, P.R. and Goulart, A.K. 2016. Pretreatment processes for lignocellulosic biomass conversion to biofuels and bioproducts. **Current Opinion**

in Green and Sustainable Chemistry 2:
48-53.

Shrestha, S., Fonoll, X., Khanal, S.K. and Raskin, L.

2017. Biological strategies for enhanced hydrolysis of lignocellulosic biomass during anaerobic digestion: Current status and future perspectives. **Bioresource Technology** 245: 1245-1257.

Sukasem, N., Khanthi, K. and Prayoonkham, S.

2017. Biomethane Recovery from Fresh and Dry Water Hyacinth Anaerobic Co-Digestion with Pig Dung, Elephant Dung and Bat Dung with Different Alkali Pretreatments. **Energy Procedia** 138: 294-300.

Toreci, I., Kennedy, K.J. and Droste, R.L. 2009.

Evaluation of continuous mesophilic anaerobic sludge digestion after high temperature microwave pretreatment. **Water Research** 43(5): 1273-1284.

Wang, D., Shen, F., Yang, G., Zhang, Y., Deng, S.,

Zhang, J., Zeng, Y., Luo, T. and Mei, Z. 2018. Can hydrothermal pretreatment improve anaerobic digestion for biogas from lignocellulosic biomass?. **Bioresource Technology** 249: 117-124.

Yousefifar, A., Baroutian, S., Farid, M.M., Gapes,

D.J. and Young, B.R. 2017. Fundamental mechanisms and reactions in non-catalytic subcritical hydrothermal processes: A review. **Water Research** 123: 607-622.