

## การผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำทิ้งหลังจากกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพ ของน้ำเสียฟาร์มสุกรโดยใช้เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องเดี่ยว

นพดล โฆษก่าเหน็ด ณิชชา ประสงค์จันทร์ และโกสินทร์ ทีปรักษ์พันธ์\*

หลักสูตรรายวิชาวิทยาศาสตร์ สาขาศึกษาทั่วไป คณะศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย 90000

\*E-mail: Kosin.t@rmutsv.ac.th

รับบทความ: 12 มิถุนายน 2563 แก้ไขบทความ: 21 มกราคม 2564 ยอมรับตีพิมพ์: 9 กุมภาพันธ์ 2564

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำทิ้งหลังจากกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพของน้ำเสียฟาร์มสุกรโดยใช้เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องเดี่ยว น้ำเสียฟาร์มสุกรมีค่าซีโอดี  $9.25 \pm 0.35$  g/L และปริมาณของแข็งสารอินทรีย์ระเหย  $124.24 \pm 0.57$  g/L ซึ่งเหมาะสมสำหรับเป็นแหล่งคาร์บอนในการผลิตมีเทน จากการศึกษาการผลิตมีเทนที่อุณหภูมิ  $55^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 45 วัน พบว่า ที่ความเข้มข้นของน้ำเสียฟาร์มสุกร 10 g-VS ให้ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพสูงสุดดังนี้ ปริมาณผลผลิตแก๊สชีวภาพสะสม 3,210 mL ปริมาณผลผลิตมีเทนสะสม 1,759.90 mL และปริมาณผลได้มีเทน  $188.07 \text{ mL-CH}_4/\text{g-VS}$  ตามลำดับ มีประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดี 58.60% เมื่อนำน้ำเสียฟาร์มสุกรที่ผ่านกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพมาศึกษาการผลิตกระแสไฟฟ้าและการบำบัดน้ำเสียโดยใช้เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องเดี่ยว พบว่า สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้สูงสุด  $0.37 \pm 0.01$  mA โดยมีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ  $1,110.43 \pm 3.27 \text{ mA/m}^3$  มีค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า  $413.58 \pm 0.01 \text{ mW/m}^3$  ประสิทธิภาพเชิงคูลอมบ์ 2.04 และมีประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดี ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสเท่ากับ  $91.38 \pm 0.54$   $10.81 \pm 1.57$  และ  $35.29 \pm 3.40\%$  ตามลำดับ

**คำสำคัญ:** แก๊สชีวภาพ น้ำเสียฟาร์มสุกร เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องเดี่ยว

# Electricity Generation from Effluent after Biogas Production of Swine Wastewater Using Single Chamber Microbial Fuel Cell

Noppadon Podkumnerd, Nicha Prasongchan and Kosin Teeeparuksapun\*

Science Program, Department of General Education, Faculty of Liberal Arts,  
Rajamangala University of Technology Srivijaya, Songkhla 90000, Thailand

\*E-mail: Kosin.t@rmutsv.ac.th

Received: 12 June 2020 Revised: 21 January 2021 Accepted: 9 February 2021

## Abstract

This research investigated the production of electricity from effluent of biogas production of swine wastewater using single chamber microbial fuel cell (SCMFC). The swine wastewater had chemical oxygen demand (COD) of  $9.25 \pm 0.35$  g/L and total volatile organic compounds of  $124.24 \pm 0.57$  g/L which is suitable for methane production. The methane production was investigated at  $55^\circ\text{C}$  for 45 days. The highest biogas production performance was obtained at 10 g-VS of swine wastewater and the following results were obtained. The highest cumulative daily biogas production was 3,210 mL. The cumulative methane production and methane yield were 1,759.90 mL and  $188.07 \text{ mL-CH}_4/\text{g-VS}$ , respectively. The efficiency for COD removal was 58.60%. The swine wastewater effluent from biogas production was then used as substrate in SCMFC to investigate electricity production and wastewater treatment. The maximum current of  $0.37 \pm 0.01$  mA was obtained. The current density and power density were  $1,110.43 \pm 3.27 \text{ mA/m}^3$  and  $413.58 \pm 0.01 \text{ mW/m}^3$ , respectively and coulombic efficiency was 2.04. The performance for COD, nitrogen and phosphorus removal were  $91.38 \pm 0.54$ ,  $10.81 \pm 1.57$  and  $35.29 \pm 3.40\%$ , respectively.

**Keywords:** Biogas, Swine wastewater, Single chamber microbial fuel cell

## บทนำ

การเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรโลก รวมถึงการขยายตัวทั้งภาคอุตสาหกรรม ภาคเศรษฐกิจ และการพัฒนาความเป็นอยู่ที่ดีขึ้นของประชาชนส่งผลต่อความต้องการพลังงานที่สูงขึ้นตามลำดับ ทำให้มีการใช้พลังงานเป็นจำนวนมาก จาก

สถานการณ์ปัจจุบันพบว่าเชื้อเพลิงฟอสซิลมีปริมาณที่ลดลงอย่างรวดเร็วและอาจไม่เพียงพอต่อความต้องการของมนุษย์ (Du *et al.*, 2007; Klaisongkram and Holasut, 2015; Lovley, 2006; Pal and Sharma, 2020) จึงทำให้ต้องแสวงหาแหล่งพลังงานอื่นมาทดแทนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล

แหล่งพลังงานทดแทนที่น่าสนใจคือของเสียซึ่งมีอยู่โดยทั่วไปและสามารถนำมาใช้ในการผลิตพลังงาน เช่น การผลิตกระแสไฟฟ้าจากขยะและการนำน้ำเสียมาผลิตเป็นแก๊สชีวภาพ (Makisha and Semenova, 2018; Panpong *et al.*, 2017) เทคโนโลยีเหล่านี้นอกจากจะสามารถสร้างพลังงานทดแทน ลดการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลแล้ว ยังสามารถลดปัญหาการเกิดมลพิษอีกด้วย (Jehlee *et al.*, 2017; Lu *et al.*, 2016)

น้ำเสียฟาร์มสุกรเป็นมลพิษทางสิ่งแวดล้อมอันเนื่องมาจากมูลสัตว์และของเสียต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการเลี้ยงสุกร น้ำเสียฟาร์มสุกรที่เกิดจากการล้างคอกสุกรมีความสกปรกสูงและมีกลิ่นเหม็น เมื่อระบายลงสู่แหล่งน้ำส่งผลให้เกิดมลพิษทางน้ำ กระทั่งรบกวนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมได้ออกประกาศค่ามาตรฐานน้ำทิ้งเพื่อควบคุมให้ฟาร์มสุกรมีการบำบัดน้ำเสียให้ได้ตามมาตรฐานที่กำหนดก่อนที่จะระบายทิ้งลงสู่แม่น้ำหรือออกสู่สิ่งแวดล้อม โดยมาตรฐานน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดมลพิษประเภทการเลี้ยงสุกรจะต้องมีค่าซีโอดีอยู่ในช่วง 0.3–0.4 g/L ขึ้นอยู่กับขนาดของฟาร์มสุกร (Announcement from Ministry of Natural Resources and Environment [MONRE], 2015) ดังนั้นเพื่อเป็นการแก้ปัญหาของน้ำเสียฟาร์มสุกร จึงได้มีการนำเทคโนโลยีแก๊สชีวภาพมาใช้เพื่อเปลี่ยนน้ำเสียฟาร์มสุกรเป็นแก๊สชีวภาพ (Panyaping *et al.*, 2018; Prandini *et al.*, 2016) การผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำเสียฟาร์มสุกรอาศัยจุลินทรีย์ในการย่อยสารอินทรีย์ในภาวะที่ไม่มีอากาศ (anaerobic process) ซึ่งประกอบด้วย การย่อยสลายหลายขั้นตอน โดยอาศัยการทำงานร่วมกันของแบคทีเรียหลายกลุ่มที่ทำหน้าที่แตกต่างกันในแต่ละขั้นตอนของการย่อยสลาย แก๊ส

ชีวภาพที่เกิดขึ้นประกอบด้วยแก๊สมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) 50–70% แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) 30–50% และแก๊สอื่น ๆ ปริมาณเล็กน้อย เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $\text{H}_2\text{S}$ ) ไนโตรเจน ( $\text{N}_2$ ) ไฮโดรเจน ( $\text{H}_2$ ) (Mao *et al.*, 2015) การนำน้ำเสียจากฟาร์มสุกรมาใช้ในการผลิตแก๊สชีวภาพนั้นสามารถที่จะลดปริมาณของสารอินทรีย์ที่มีในน้ำเสียได้ (Amaral *et al.*, 2014) อย่างไรก็ตามการผลิตแก๊สชีวภาพโดยใช้น้ำเสียจากฟาร์มสุกรยังไม่สามารถลดปริมาณของค่าซีโอดีได้ทั้งหมด (Pongsak *et al.*, 2020) น้ำทิ้งจากกระบวนการหมักแก๊สชีวภาพจึงยังมีค่าซีโอดีสูงกว่ามาตรฐานซึ่งกำหนดไว้ที่ 0.3–0.4 g/L ทำให้ไม่สามารถปล่อยน้ำทิ้งลงสู่สิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ น้ำเสียฟาร์มสุกรยังมีปริมาณของไนโตรเจน และฟอสฟอรัสสูง (Maekawa *et al.*, 1995) จากรายงานของ Liu *et al.* (2011) พบว่า ในน้ำเสียฟาร์มสุกรมีปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัส 3.033 และ 0.189 g/L ตามลำดับ หากปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อมจะก่อให้เกิดผลเสียต่อระบบนิเวศ เช่น การเกิดยูโทรฟิเคชัน (eutrophication) ทำให้เกิดการแพร่กระจายของพืชน้ำอย่างรวดเร็วส่งผลให้ออกซิเจนลดลงและเป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำและสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ (Perera *et al.*, 2007; Zhang *et al.*, 2006) ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องบำบัดน้ำทิ้งหลังจากจากกระบวนการหมักแบบไร้อากาศอีกครั้ง โดยเทคโนโลยีที่น่าสนใจคือเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ซึ่งสามารถใช้ในการบำบัดน้ำเสียช่วยลดปริมาณของค่าซีโอดี ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสควบคู่กับการผลิตกระแสไฟฟ้า (Khanal, 2008; Tao *et al.*, 2014)

เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ (microbial fuel cell, MFC) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการเปลี่ยนพลังงานทางเคมีที่อยู่ในสารอินทรีย์ไปเป็นกระแสไฟฟ้า

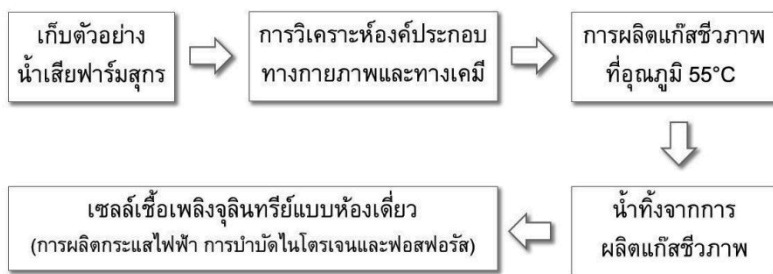
โดยอาศัยกระบวนการแคแทลิก (catalytic) ของ จุลินทรีย์ (Du *et al.*, 2007; Khanal, 2008; Logan *et al.*, 2005, 2007; Logan, 2008) เซลล์เชื้อเพลิง จุลินทรีย์ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว คือขั้วลบ หรือแอโนด (anode) และขั้วบวกหรือแคโทด (cathode) สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้อง เดี่ยว ขั้วแอโนดเป็นส่วนที่สัมผัสกับสารอินทรีย์ที่ บรรจุอยู่ในภาชนะ (reactor) เช่น กลูโคส น้ำเสีย ซึ่งเป็นสารตั้งต้นที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาของ จุลินทรีย์ จุลินทรีย์จะย่อยสารอินทรีย์ผ่านกระบวนการออกซิเดชัน (oxidation) แล้วดึงพลังงาน จากสารอินทรีย์มาใช้และปล่อยอิเล็กตรอนและ โปรตอนออกมา (Rabaey and Verstraete, 2005) อิเล็กตรอนที่ปล่อยออกมาจะเคลื่อนที่เข้าสู่ขั้ว ไฟฟ้าแอโนดและไหลไปยังขั้วไฟฟ้าแคโทดผ่าน วงจรภายนอกก่อให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้า ซึ่งไหลจากขั้วแคโทดไปยังขั้วแอโนดและเป็นการไหลในทิศทางที่ตรงข้ามกับการไหลของอิเล็กตรอน ในขณะที่เดียวกันโปรตอนที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ก็จะถูกส่งไปยังขั้วไฟฟ้า แคโทด โดยที่บริเวณขั้วไฟฟ้าแคโทดจะมีการเติม ออกซิเจนเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน เมื่อ รวมตัวกับโปรตอนจะเกิดปฏิกิริยาได้ผลิตภัณฑ์

เป็นน้ำที่ขั้วแคโทด (Khanal, 2008) เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์นำมาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า จากแหล่งน้ำเสียต่าง ๆ เช่น น้ำเสียฟาร์มสุกร (Goto and Yoshida, 2019; Kim *et al.*, 2008; Min *et al.*, 2005) น้ำเสียจากบ่อขยะ (Puig *et al.*, 2011) น้ำเสียชุมชน (Ahn and Logan, 2019; Puig *et al.*, 2011)

จากรายงานการวิจัยข้างต้น พบว่า เป็นการนำน้ำเสียจากแหล่งน้ำเสียโดยตรงมาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าและการบำบัดน้ำเสีย อย่างไรก็ตามพบว่าจะยังไม่มีรายงานของการนำน้ำทิ้ง จากกระบวนการหมักแก๊สชีวภาพมาใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าและการบำบัดน้ำเสียโดยเซลล์เชื้อเพลิง จุลินทรีย์ การศึกษานี้จึงเป็นงานวิจัยแรกที่มีการ นำน้ำเสียฟาร์มสุกรที่ผ่านกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพมาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องเดี่ยวควบคู่กับการศึกษา ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย

### วิธีการดำเนินการวิจัย

การศึกษการผลิตแก๊สชีวภาพและกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียฟาร์มสุกรมีขั้นตอนดังแสดงใน ภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยการผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียฟาร์มสุกรที่ผ่านกระบวนการหมักแก๊สชีวภาพโดยใช้เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องเดี่ยว

### ตัวอย่างน้ำเสียฟาร์มสุกร

ตัวอย่างน้ำเสียฟาร์มสุกรและตะกอนจุลินทรีย์ได้จากฟาร์มสุกรของเกษตรกรในพื้นที่ตำบลควนโส อำเภอควนเนียง จังหวัดสงขลา โดยเก็บน้ำเสียจากบ่อกักน้ำเสียรวมทั้งระบายจากคอกเลี้ยงสุกรก่อนผ่านเข้าสู่ระบบบำบัด โดยใช้วิธีจ้วงตักด้วยถัง และเก็บน้ำเสียในขวดเก็บตัวอย่างขนาด 10 L เก็บรักษาตัวอย่างไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ  $-4^{\circ}\text{C}$  นำตัวอย่างน้ำเสียฟาร์มสุกรมาวิเคราะห์องค์ประกอบทางกายภาพและทางเคมี ได้แก่ ปริมาณของแข็งทั้งหมด ปริมาณของแข็งสารอินทรีย์ระเหย ความเป็นด่าง ปริมาณกรดไขมัน ระยะเวลา ฟีเอช ปริมาณไขมัน ปริมาณโปรตีน ซีไอดี ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด และปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดโดยใช้วิธีมาตรฐาน (American Public Health Association [APHA], 1995; Kaparaju *et al.*, 2009) การวิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสใช้วิธี Inductively couple plasma–optical emission spectrometer (ICP–OES) โดยวิเคราะห์ ณ หน่วยเครื่องมือกลาง คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

### การผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำเสียฟาร์มสุกร

เตรียมกล้าเชื้อจุลินทรีย์โดยปรับพีเอชน้ำเสียฟาร์มสุกรและตะกอนจุลินทรีย์ด้วย  $\text{NaHCO}_3$  (2 g/L) เพื่อให้ได้ค่า pH ~7 จากนั้นจึงเติมน้ำเสีย 600 mL และตะกอนจุลินทรีย์ 2,400 mL ลงในถังหมักขนาด 5 L (ให้มีปริมาตรสุทธิ 3 L) หมักที่อุณหภูมิ  $55^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 2 สัปดาห์ จะได้กล้าเชื้อจุลินทรีย์สำหรับการทดลองการผลิตมีเทนในขั้นตอนต่อไป

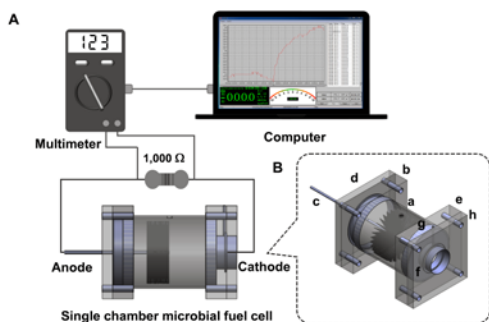
ทดลองผลิตมีเทนโดยใช้น้ำเสียฟาร์มสุกร 2 4 6 8 และ 10 g–VS โดยเติมน้ำเสียที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ความเข้มข้นละ 40 mL และ

กล้าเชื้อ 160 mL (ปริมาตรสุทธิ 200 mL) ลงในขวดน้ำเกลือขนาด 500 mL จากนั้นพ่นแก๊สไนโตรเจนในขวดน้ำเกลือประมาณ 3 นาทีเพื่อไล่แก๊สออกซิเจน ทำให้ระบบอยู่ในภาวะไร้อากาศ ปิดขวดด้วยฝาจุกซิลิโคนและฝาจุกอะลูมิเนียม โดยใช้ hand crimper หมักที่อุณหภูมิ  $55^{\circ}\text{C}$  และวิเคราะห์ปริมาตรของแก๊สโดยใช้วิธีการแทนที่น้ำ โดยเก็บตัวอย่างทุก ๆ 24 ชั่วโมง เป็นเวลา 45 วัน และนำไปวิเคราะห์ปริมาณของแก๊สมีเทนโดยใช้เครื่อง BIOGAS 5000 (Geotech, UK) และวิเคราะห์ค่าซีไอดีเมื่อสิ้นสุดกระบวนการหมัก สำหรับชุดการทดลองควบคุมเติมกล้าเชื้อ 160 mL และน้ำกลั่น 40 mL แทนน้ำเสียฟาร์มสุกร

### เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์

เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ที่ใช้ทดลองเป็นเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องเดียว (SCMFC) ภายในบรรจุด้วยน้ำเสียฟาร์มสุกรที่ได้หลังจากกระบวนการหมักแก๊สชีวภาพ ในการเก็บข้อมูลค่าทางไฟฟ้า SCMFC ทำโดยต่อเข้ากับตัวต้านทานภายนอก (load) ที่มีค่าความต้านทาน 1,000  $\Omega$  แล้วบันทึกข้อมูลของความต่างศักย์ที่ได้ทุก ๆ 1 วินาที โดยใช้ดิจิทัลมัลติมิเตอร์และบันทึกข้อมูลลงในคอมพิวเตอร์ตั้งในภาพที่ 2A

ถึงปฏิกรณ์ของ SCMFC ผลิตจากอะคริลิกใสแท่งทรงกระบอกยาว 98 mm มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 70 mm และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 66 mm (ภาพที่ 2B–a) ปริมาตรของถังปฏิกรณ์เท่ากับ  $335.41\text{ cm}^3$  หรือ  $0.00033541\text{ m}^3$  ด้านซ้ายของถังปฏิกรณ์ยึดติดกับแท่งอะคริลิกสี่เหลี่ยมขนาด  $90 \times 90\text{ mm}$  หนา 20 mm (ภาพที่ 2B–b) และเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 62.82 mm สำหรับใส่แปรงแกรไฟต์ (PANEX33160K, ZOLTEK) ที่ทำหน้าที่เป็น



**ภาพที่ 2** การติดตั้งระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องเดี่ยวสำหรับการวัดประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้า (A) และองค์ประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องเดี่ยว (B)

ขั้วแอโนด (ภาพที่ 2B-c) โดยมีฝาปิดขนาด 90×90 mm หนา 10 mm และเจาะรูขนาด 2.6 mm (ภาพที่ 2B-d) เพื่อสอดก้านของแปรงแกรไฟต์ ส่วนทางด้านขวาของถังปฏิกรณ์ยึดอยู่กับแท่งอะคริลิกสี่เหลี่ยมขนาด 90×90 mm หนา 20 mm (ภาพที่ 2B-e) เจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 31.87 mm สำหรับใส่ผ้าคาร์บอน (carbon cloth; เคลือบด้วย 0.5 mg/cm<sup>2</sup> 60% platinum) (ภาพที่ 2B-f) ที่ทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทดและเจาะรูด้านบนขนาด 0.25 mm สำหรับใส่ลวดไทเทเนียมที่ทำหน้าที่เป็น connector ของขั้วแคโทด (ภาพที่ 2B-g) และด้านนอกสุดปิดด้วยฝาปิดขนาด 90×90 mm หนา 10 mm ที่เจาะรูขนาด 32 mm เพื่อให้ขั้วแคโทดสัมผัสกับอากาศ (ภาพที่ 2B-h)

*การศึกษาประสิทธิภาพของ SCMFC*

*ความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า:*

การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของ SCMFC ในการผลิตกระแสไฟฟ้า ตัวอย่างน้ำเสียฟาร์มสุกรที่ผ่านกระบวนการหมักแก๊สชีวภาพใช้เป็นซับสเตรต วัดประสิทธิภาพของ SCMFC โดย

การวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าคร่อมตัวต้านทานภายนอกขนาด 1,000 Ω ค่าความต่างศักย์ที่วัดได้สามารถนำไปใช้ในการคำนวณกระแสไฟฟ้าโดยใช้กฎของโอห์มตามสมการที่ (1)

$$V = IR, I = V/R \quad \text{--- (1)}$$

เมื่อ V = ความต่างศักย์ (V), I = กระแสไฟฟ้า (A) และ R = ความต้านทานภายนอก (Ω)

รายงานกระแสไฟฟ้าในเทอมของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ซึ่งเป็นกวัดค่ากระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่ผิวของขั้วแอโนด (A/m<sup>2</sup>) หรือต่อปริมาตรของ SCMFC (A/m<sup>3</sup>)

*กำลังไฟฟ้า:* นำค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (V) และกระแสไฟฟ้า (I) ที่คำนวณได้ มาคำนวณปริมาณกำลัง ไฟฟ้าตามสมการที่ (2)

$$P = IV \quad \text{--- (2)}$$

เมื่อ P คือ กำลังไฟฟ้า (W), I คือ กระแสไฟฟ้า (A), V คือ ความต่างศักย์ (V) และ R คือ ความต้านทานภายนอก (Ω)

นำค่ากำลังไฟฟ้ามาคำนวณความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า (power density) และรายงานค่ากำลังไฟฟ้าต่อพื้นที่ผิวของอิเล็กโทรด (W/m<sup>2</sup>) หรือต่อปริมาตรของ SCMFC (W/m<sup>3</sup>)

*ประสิทธิภาพเชิงคูลอมบ์:* เมื่อจุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ทำให้เกิดการส่งผ่านประจุไฟฟ้าหรืออิเล็กตรอนระหว่างขั้วไฟฟ้าในการดึงอิเล็กตรอนที่เก็บอยู่ในสารชีวมวลเพื่อเปลี่ยนเป็นกระแสไฟฟ้าและได้พลังงานจากระบบกลับคืนมาใช้ การดึงอิเล็กตรอนออกมาดังกล่าวแสดงถึงค่าประสิทธิภาพเชิงคูลอมบ์ (coulombic efficiency, CE) ซึ่งนิยามได้ว่าเป็นสัดส่วนหรือเปอร์เซ็นต์ของการได้อิเล็กตรอนกลับคืนในรูปกระแสไฟฟ้าเทียบกับสารอินทรีย์เริ่มต้น (Klai-

songkram and Holasut, 2015) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (3) (Khanal, 2008)

$$CE = \frac{\int_0^t Idt}{Fbv\Delta C} \quad \dots (3)$$

โดยที่ F คือ ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (Faraday's constant) มีค่า 96,458 คูลอมบ์ต่อโมลอิเล็กตรอน (C/mol), b คือ จำนวนโมลอิเล็กตรอนต่อจำนวนโมลของซัลเฟต (b = 24 สำหรับกลูโคส), V คือ ปริมาตรของสารแอโนไลต์ (anolyte) (น้ำเสีย) และ ΔC คือ ผลต่างของความเข้มข้นของซัลเฟตจากเวลาที่ 0 ถึง t (หรือ ΔC = ค่าซีโอดีที่เปลี่ยนแปลงไป)

**การบำบัดน้ำเสีย:** บรรจุตัวอย่างน้ำเสียฟาร์มสุกรที่ผ่านกระบวนการหมักแก๊สชีวภาพใน SCMFC เมื่อเริ่มเดินระบบ เก็บตัวอย่างน้ำเสียทุก ๆ 24 ชั่วโมง และนำไปวิเคราะห์ค่าซีโอดี ปริมาณของไนโตรเจนและฟอสฟอรัส เพื่อประเมินประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย

### ผลการทดลอง

#### องค์ประกอบของน้ำเสียฟาร์มสุกร

น้ำเสียฟาร์มสุกรมีองค์ประกอบกายภาพและทางเคมีดังแสดงในตาราง 1 โดยพบว่ามีค่าซีโอดี 9.25±0.35 g/L ซึ่งสูงกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรตามมาตรฐานกำหนด (0.3–0.4 g/L)

#### การผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำเสียฟาร์มสุกร

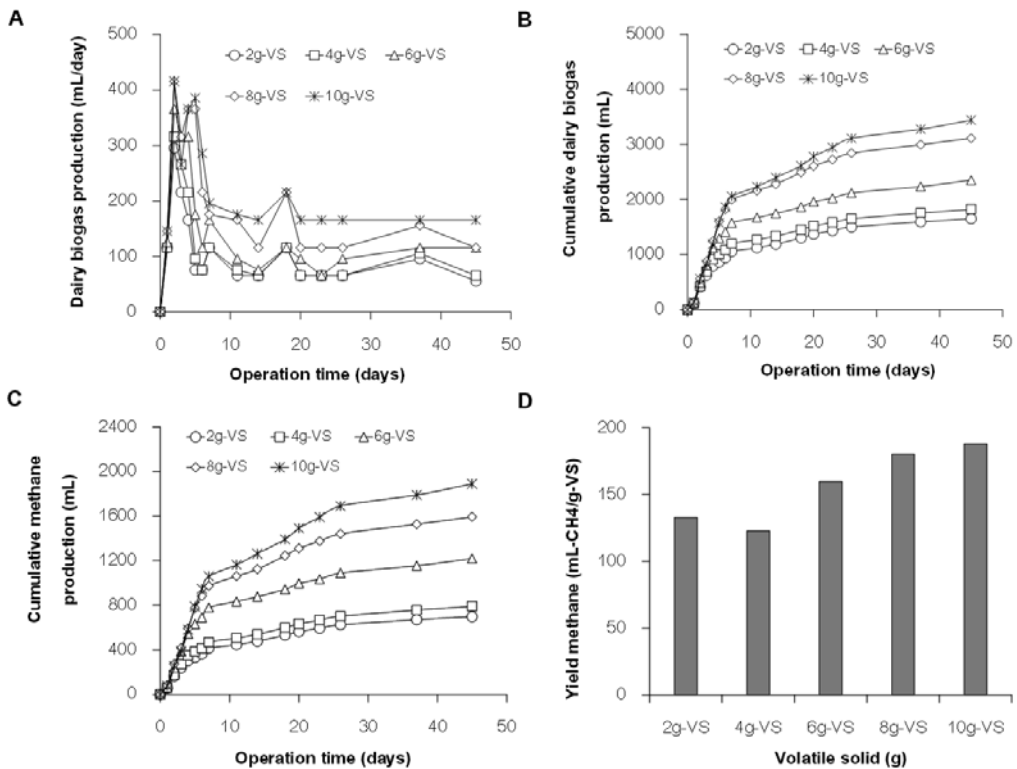
ผลการผลิตแก๊สชีวภาพที่อุณหภูมิ 55°C โดยใช้ น้ำเสียฟาร์มสุกรที่ความเข้มข้น 2 4 6 8 และ 10 g-VS (ภาพที่ 3) พบว่า การใช้ น้ำเสียฟาร์มสุกรสามารถผลิตแก๊สชีวภาพ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของน้ำเสียฟาร์มสุกร ปริมาณแก๊สชีวภาพที่ผลิตได้จะเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่ม

**ตาราง 1** องค์ประกอบทางกายภาพและทางเคมีของน้ำเสียฟาร์มสุกร

| องค์ประกอบของของเสียจากการเลี้ยงสุกร  | ปริมาณ      |
|---------------------------------------|-------------|
| ของแข็งทั้งหมด (g/L)                  | 187.41±1.46 |
| ของแข็งสารอินทรีย์ระเหย (g/L)         | 124.24±0.57 |
| ความเป็นด่าง (g/L CaCO <sub>3</sub> ) | 4.80±0.14   |
| กรดไขมันระเหยง่าย (g/L)               | 3.35±0.21   |
| ฟิเอช                                 | 7.25±0.04   |
| ไขมัน (%)                             | 3.48±0.08   |
| ไนโตรเจนทั้งหมด (%)                   | 4.58±0.33   |
| โปรตีน (%)                            | 28.59±2.08  |
| ซีโอดี (g/L)                          | 9.25±0.35   |
| ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด (%)      | 37.40±2.03  |

แหล่งอาหารให้กับจุลินทรีย์ โดยที่ความเข้มข้น 10 g-VS สามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้สูงที่สุดเท่ากับ 416 mL/day โดยใช้เวลาในการหมักเพียง 2 วัน จากนั้นการผลิตแก๊สชีวภาพจะคงที่หลังจากกระบวนการหมักเป็นเวลา 10 วัน ดังแสดงในภาพที่ 3A สำหรับชุดการทดลองควบคุมพบว่าไม่มีการผลิตแก๊สชีวภาพ

จากการวิเคราะห์ปริมาณผลผลิตของแก๊สชีวภาพสะสมของการหมักน้ำเสียฟาร์มสุกร (ภาพที่ 3B) พบว่า ทุกความเข้มข้นของน้ำเสียฟาร์มสุกร ปริมาณของแก๊สชีวภาพเกิดขึ้นตามระยะเวลาในการหมัก เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของน้ำเสียฟาร์มสุกร ปริมาณแก๊สชีวภาพสะสมที่วัดได้จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 6 วันแรก จากนั้นจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นทีละน้อย ผลการทดลองพบว่าปริมาณของแก๊สชีวภาพสะสมสูงที่สุดเท่ากับ 1,653 1,823 2,353 3,113 และ 3,210 mL สำหรับการหมักโดยใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียฟาร์มสุกร 2 4 6 8 และ 10 g-VS ตามลำดับ



ภาพที่ 3 ปริมาณผลผลิตแก๊สชีวภาพแต่ละวัน (A) ปริมาณผลผลิตแก๊สมีเทนสะสม (B) ปริมาณผลผลิตแก๊สชีวภาพสะสม (C) และปริมาณผลได้มีเทน (D) ของการผลิตแก๊สชีวภาพโดยใช้น้ำเสียฟาร์มสุกรที่ความเข้มข้น 2 4 6 8 และ 10 g-VS

ภาพที่ 3C แสดงปริมาณของแก๊สมีเทนสะสมที่ได้จากระบวนการหมักน้ำเสียฟาร์มสุกร โดยพบว่าความเข้มข้น 10 g-VS ให้ปริมาณแก๊สมีเทนสะสมสูงที่สุดเท่ากับ 1,759.90 mL และมีปริมาณของผลได้มีเทนสูงสุดเท่ากับ 188.07 mL-CH<sub>4</sub>/g-VS (ภาพที่ 3D)

น้ำเสียฟาร์มสุกรที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีค่าซีโอดีเริ่มต้น  $9.25 \pm 0.35$  g/L เมื่อนำมาหมักแก๊สชีวภาพที่อุณหภูมิ 55°C เป็นเวลา 45 วันพบว่า มีค่าซีโอดี  $3.83 \pm 0.04$  g/L ลดลงจากเดิม  $6.42 \pm 0.31$  g/L (มีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี 58.60%) อย่างไรก็ตามค่าซีโอดีของน้ำเสียฟาร์ม

สุกรที่ผ่านกระบวนการหมักแก๊สชีวภาพยังมีค่าสูงกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งของน้ำเสียฟาร์มสุกรที่กำหนดไว้ (0.3–0.4 g/L) จึงนำน้ำเสียฟาร์มสุกรที่ผ่านกระบวนการหมักแก๊สชีวภาพที่อุณหภูมิ 55°C มาศึกษาการผลิตกระแสไฟฟ้าและการบำบัดค่าซีโอดีโดยใช้ SCMFC ต่อไป

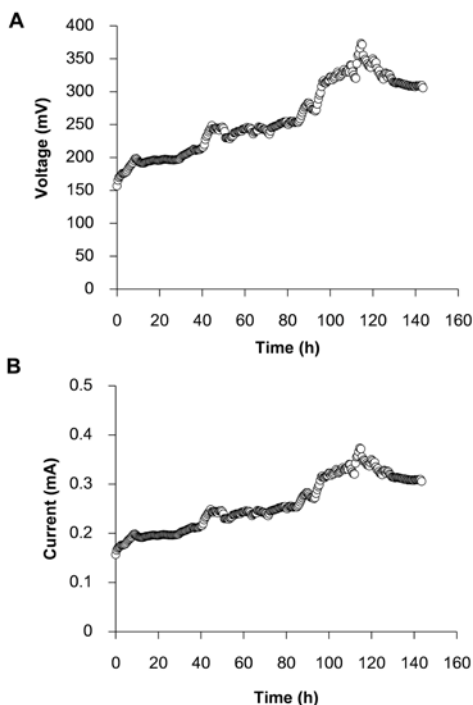
*ประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าของ SCMFC*

*ความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า*

นำน้ำเสียฟาร์มสุกรที่ผ่านกระบวนการหมักแก๊สชีวภาพที่อุณหภูมิ 55°C และมีค่าซีโอดี



3.83±0.04 g/L มาศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ในการผลิตกระแสไฟฟ้า ภาพที่ 4A แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบประสิทธิภาพของ SCMFC



ภาพที่ 4 การเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ไฟฟ้า (A) และการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้า (B) ของ SCMFC โดยใช้น้ำเสียฟาร์มสุกรที่ผ่านกระบวนการหมักแก๊สชีวภาพ

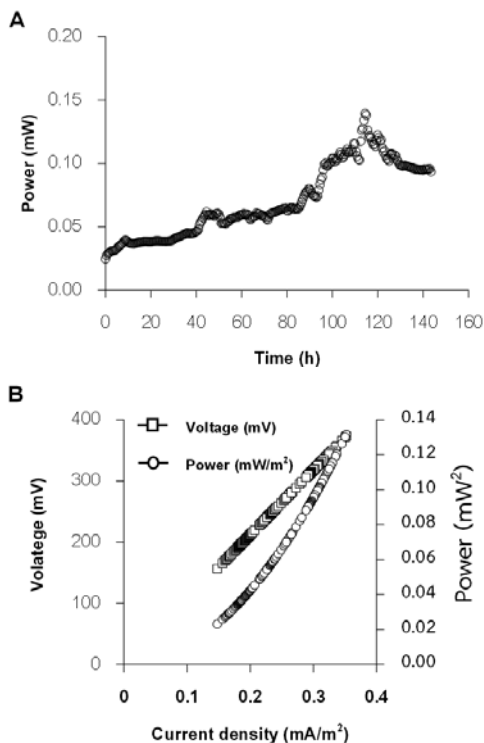
เมื่อเริ่มเดินระบบ ค่าศักย์ไฟฟ้าจะค่อย ๆ เพิ่มสูงขึ้น จากนั้นค่าศักย์ไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึง 115 ชั่วโมง และศักย์ไฟฟ้ามีค่าค่อย ๆ ลดลง โดยค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ  $372.45 \pm 1.10$  mV ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากจุลินทรีย์ในเชื้อเพลิงจุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียฟาร์มสุกร ซึ่งความ

ต่างศักย์ที่เกิดขึ้นนี้สอดคล้องกับการเจริญของจุลินทรีย์ โดยช่วงเริ่มต้นจุลินทรีย์อยู่ในช่วงปรับตัวให้เข้ากับภาวะแวดล้อม ทำให้ความต่างศักย์เพิ่มขึ้นเล็กน้อยหรือเกือบคงที่ เมื่อจุลินทรีย์ย่อยสารอินทรีย์เพื่อใช้การเจริญและเพิ่มจำนวนมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความต่างศักย์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนเข้าสู่ภาวะคงที่และลดลงเมื่อสารอาหารถูกใช้หมดไป (Attasiriluck, 2011)

เมื่อนำข้อมูลค่าศักย์ไฟฟ้ามาคำนวณค่ากระแสไฟฟ้า (ภาพที่ 4B) พบว่า ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้เท่ากับ  $0.37 \pm 0.01$  mA จากนั้นนำค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้มาคำนวณความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า โดยคำนวณจากค่ากระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่ผิวของแอโนด ( $1.06 \text{ m}^2$ ) และค่ากระแสไฟฟ้าต่อปริมาตรของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ ( $335.41 \text{ cm}^3$  หรือ  $0.00033541 \text{ m}^3$ ) พบว่า ค่ากระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่ผิวของอิเล็กโทรดและต่อปริมาตรของ SCMFC เท่ากับ  $0.35 \pm 0.01 \text{ mA/m}^2$  และ  $1,110.43 \pm 3.27 \text{ mA/m}^3$  ตามลำดับ

เมื่อนำค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ มาคำนวณกำลังไฟฟ้าและเขียนกราฟ (ภาพที่ 5A) พบว่าค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ  $0.139 \pm 0.001 \text{ mW}$  มีค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า  $0.131 \pm 0.001 \text{ mW/m}^2$  เมื่อคำนวณจากค่ากำลังไฟฟ้าต่อพื้นที่ผิวของอิเล็กโทรด และมีค่ากำลังไฟฟ้าต่อปริมาตรของ SCMFC เท่ากับ  $413.58 \text{ mW/m}^3$  หรือ  $1.60 \times 10^{-5} \text{ kWh}$  เมื่อเขียนกราฟระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้า (mV) ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ( $\text{mA/m}^2$ ) และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า ( $\text{mW/m}^2$ ) (ภาพที่ 5B) พบว่า

ความสัมพันธ์ของความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นแปรผันตรงกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า



ภาพที่ 5 กำลังไฟฟ้า (mW) (A) และความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าของ SCMFC ใช้น้ำเสียฟาร์มสุกรที่ผ่านกระบวนการหมักแก๊สชีวภาพ (B)

#### ประสิทธิภาพเชิงคูลอมบ์

ในการดึงเอาอิเล็กตรอนที่เก็บอยู่ในสารชีวมวลเพื่อเปลี่ยนเป็นกระแสไฟฟ้าและได้พลังงานจากระบบกลับคืนมาใช้ โดยคำนวณประสิทธิภาพเชิงคูลอมบ์ พบว่า มีค่าเท่ากับ 2.04% และเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นพบว่าประสิทธิภาพ

เชิงคูลอมบ์จากงานวิจัยนี้มีค่าน้อยกว่างานวิจัยของ Attasiriluck (2011) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 28.17% ทั้งนี้เนื่องจากน้ำเสียที่นำมาใช้ในการทดลองด้วยระบบ SCMFC เป็นน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพทำให้ค่าซีโอดีเริ่มต้นมีค่าต่ำกว่าน้ำเสียฟาร์มสุกรทั่วไป นอกจากนี้การหมักเชื้อในการทดลองของงานวิจัยนี้เป็นแบบกะ ซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยของ Attasiriluck (2011) ซึ่งใช้การหมักแบบต่อเนื่องหรือกึ่งกะ โดยบ่อนอาหารเลี้ยงเชื้อเข้าไป จึงทำให้พลังงานไฟฟ้าที่ได้มีค่ามาก เมื่อนำมาคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงคูลอมบ์ จึงได้ค่าที่สูงกว่า

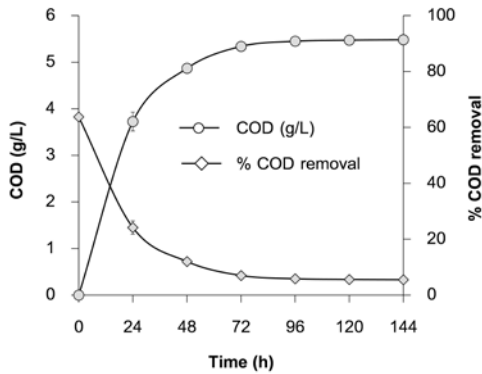
#### ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย

##### การบำบัดซีโอดี

น้ำเสียฟาร์มสุกรที่ผ่านกระบวนการหมักแก๊สชีวภาพและมีค่าซีโอดี  $3.83 \pm 0.04$  g/L เมื่อนำเข้าสู่กระบวนการผลิตไฟฟ้าโดยใช้ SCMFC และเก็บตัวอย่างเพื่อมาหาปริมาณของค่าซีโอดีพบว่า ค่าซีโอดีลดลงตามเวลาที่ทดสอบ SCMFC ตั้งในภาพที่ 6 เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 144 ชั่วโมง ค่าซีโอดีคงเหลือเท่ากับ  $0.33 \pm 0.03$  g/L สามารถบำบัดค่าซีโอดีได้  $3.99 \pm 0.01$  g/L (คิดเป็น  $91.38 \pm 0.54\%$ ) แสดงให้เห็นว่า เทคนิค SCMFC สามารถใช้ในการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำเสียฟาร์มสุกรได้อย่างมีประสิทธิภาพ

##### การบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัส

น้ำเสียฟาร์มสุกรที่ผ่านกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพที่อุณหภูมิ  $55^{\circ}\text{C}$  มีปริมาณของไนโตรเจน  $1.48 \pm 0.06$  g/L เมื่อสิ้นสุดกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า ค่าไนโตรเจนมีค่าคงเหลือ  $1.32 \pm 0.02$



ภาพที่ 6 ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีโดยใช้ SCMFC

g/L ลดลงเท่ากับ  $0.16 \pm 0.02$  g/L หรือมีประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจนเท่ากับ  $10.81 \pm 1.57\%$  สำหรับปริมาณของฟอสฟอรัส พบว่า เริ่มต้นมีปริมาณของฟอสฟอรัส  $0.34 \pm 0.01$  g/L เมื่อสิ้นสุดกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า มีปริมาณของฟอสฟอรัสคงเหลือ  $0.22 \pm 0.01$  g/L คิดเป็นปริมาณของฟอสฟอรัสที่บำบัดได้  $0.12 \pm 0.01$  g/L หรือ  $35.29 \pm 3.40\%$

### สรุปผลการทดลอง

น้ำเสียฟาร์มสุกรเป็นของเสียที่มีองค์ประกอบทางกายภาพและทางเคมีที่เหมาะสมสำหรับศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพ น้ำเสียจากกิจกรรมการเลี้ยงสุกรมีปริมาณค่าซีโอดีและปริมาณของแข็งสารอินทรีย์ระเหยได้เหมาะสมสำหรับเป็นแหล่งคาร์บอนในการผลิตมีเทน ในการศึกษาศักยภาพในการผลิตมีเทนโดยใช้น้ำเสียฟาร์มสุกรที่ความเข้มข้น 2–10 g-VS ที่อุณหภูมิ  $55^{\circ}\text{C}$  พบว่า ให้ปริมาณผลผลิตมีเทนสูงสุดที่ความเข้มข้น 10 g-VS ปริมาณผลผลิตแก๊สชีวภาพสะสม 3,210 mL

ปริมาณผลผลิตมีเทนสะสม 1759.90 mL-CH<sub>4</sub> และปริมาณผลได้มีเทน 188.07 mL-CH<sub>4</sub>/g-VS ตามลำดับ เมื่อสิ้นสุดกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพ น้ำเสียฟาร์มสุกรยังมีค่าซีโอดีที่สูงเกินกว่าค่ามาตรฐาน ไม่สามารถที่จะปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อมได้ เมื่อนำน้ำเสียดังกล่าวมาผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้ SCMFC พบว่า สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้สูงสุด  $0.37 \pm 0.01$  mA โดยมีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ  $0.35 \pm 0.01$  mA/m<sup>2</sup> หรือ  $1,110.43 \pm 3.27$  mA/m<sup>3</sup> มีค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า  $0.131 \pm 0.001$  mW/m<sup>2</sup> หรือ  $413.58$  mW/m<sup>3</sup> หรือ  $1.60 \times 10^{-5}$  kWh มีประสิทธิภาพเชิงคูลอมบ์ 2.04 และมีประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดี ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส  $91.38 \pm 0.54$   $10.81 \pm 1.57$  และ  $35.29 \pm 3.40\%$  ตามลำดับ ผลการทดลองจากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า SCMFC เป็นเทคนิคที่มีศักยภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าควบคู่กับการบำบัดน้ำเสีย อย่างไรก็ตาม กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จาก SCMFC มีปริมาณน้อย ไม่เหมาะในการใช้งานจริง อีกทั้งวัสดุอุปกรณ์ยังมีราคาแพง ดังนั้นจึงเป็นความท้าทายที่ต้องศึกษาวิจัยในด้านนี้อย่างต่อเนื่องเพื่อให้สามารถพัฒนาเทคโนโลยีให้เป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่สามารถใช้งานในอนาคตได้จริง

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัยที่ให้การสนับสนุนในการทำวิจัยนี้ (งบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2561)

## เอกสารอ้างอิง

- Ahn, Y., and Logan, B. E. (2010). Effectiveness of domestic wastewater treatment using microbial fuel cells at ambient and mesophilic temperatures. **Bioresource Technology** 101(2): 469–475.
- Amaral, A. C. do, Kunz, A., Steinmetz, R. L. R., Cantelli, F., Scussiato, L. A., and Justi, K. C. (2014). Swine effluent treatment using anaerobic digestion at different loading rates. **Engenharia Agrícola** 34(3): 567–576.
- American Public Health Association [APHA]. (1995). **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 19th ed. New York: Author.
- Announcement from Ministry of Natural Resources and Environment (MONRE), 2015.
- Attasiriluck, P. (2011). **Efficiency of Single Chamber Microbial Fuel Cell in Electricity Generation from Swine Wastewater**. (Doctoral dissertation). Available from <http://cuir.car.chula.ac.th/handle/123456789/36940>.
- Du, Z., Li, H., and Gu, T. (2007). A State of the art review on microbial fuel cells: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy. **Biotechnology Advances** 25: 464–482.
- Goto, Y., and Yoshida, N. (2019). Scaling up microbial fuel cells for treating swine wastewater. **Water** 11(9): 1803.
- Jehlee, A., Khongkliang, P., and O-Thong, S. (2017). Biogas production from *Chlorella* sp. TISTR8411 biomass cultivated on biogas effluent of seafood processing wastewater. **Energy Procedia** 138: 853–857.
- Kapajaru, M. Serrano, A. B., Thomsen, P. Kongjan, I. (2009). Bioethanol, biohydrogen and biogas production from wheat straw in a biorefinery concept. **Bioresource Technology** 100: 2562–2568.
- Khanal, S. K. (2008). **Anaerobic Biotechnology for Bioenergy Production Principles and Applications**. Singapore: Wiley-Blackwell.
- Kim, J. R., Dec, J., Bruns, M. A., and Logan, B. E. (2008). Removal of odors from swine wastewater by using microbial fuel cells. **Applied and Environmental Microbiology** 74(8): 2540–2543.
- Klaisongkram, N., and Holasut, K. (2015). Electricity generation of Plant Microbial Fuel Cell (PMFC) using *Cyperus involucreatus* R. **KKU Engineering Journal** 42(1): 117–124.
- Liu, Y., Kwag, J.-H., Kim, J.-H., and Ra, C. (2011). Recovery of nitrogen and phosphorus by struvite crystallization from swine wastewater. **Desalination** 277(1–3): 364–369.
- Logan, B. E., Murano, C., Scott, K., Gray N. D., and Head, I. M. (2005). Electricity generation from cysteine in a microbial fuel cell.

- Water Resources** 39(5): 942–952.
- Logan, B. E., Cheng, S., Watson, V., and Estadt, G. (2007). Graphite fiber brush anodes for increased power production in air–cathode microbial fuel cells. **Environmental Science & Technology** 41(9): 3341–3346.
- Logan, B. E. (2008). **Microbial Fuel Cell**. New Jersey: Wiley & Son.
- Lovley, D. R. (2006). Microbial fuel cells: Novel microbial physiologies and engineering approaches. **Current Opinion in Biotechnology** 17: 327–332.
- Lu, M., Niu, X., Liu, W., Zhang, J., Wang, J., Yang, J., Wang, W., Yang, Z. (2016). Bio-gas generation in anaerobic wastewater treatment under tetracycline antibiotic pressure. **Scientific Reports** 6(1):1–9.
- Maekawa, T., Liao, C. M., and Feng, X.–D. (1995). Nitrogen and phosphorus removal for swine wastewater using intermittent aeration batch reactor followed by ammonium crystallization process. **Water Research** 29(12): 2643–2650.
- Makisha, N., and Semenova, D. (2018). Production of biogas at wastewater treatment plants and its further application. **MATEC Web of Conferences** 144: 04016.
- Mao, C., Feng, Y., Wang, X., and Ren, G. (2015). Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 45: 540–555.
- Min, B., Kim, J., Oh, S., Regan, J. M., and Logan, B. E. (2005). Electricity generation from swine wastewater using microbial fuel cells. **Water Research** 39(20): 4961–4968.
- Pal, M., and Sharma, R. K. (2020). Development of wheat straw based catholyte for power generation in microbial fuel cell. **Biomass and Bioenergy** 138: 105591.
- Panpong, K., Srimachai, T., Nuithitikul, K., Kongjan, P., O–thong, S., Imai, T., and Kaewthong, N. (2017). Anaerobic co–digestion between canned sardine wastewater and glycerol waste for biogas production: Effect of different operating processes. **Energy Procedia** 138: 260–266.
- Panyaping, K., Khiewwijit, R., and Wongpankamol, P. (2018). Enhanced biogas production potential of microalgae and swine wastewater using co–digestion and alkaline pretreatment. **Water Science and Technology** 78(1): 92–102.
- Perera, P. W. A., Han, Z. Y., Chen Y. X., Wu, W. X. (2007). Recovery of nitrogen and phosphorus as struvite from swine wastewater biogas digester effluent. **Biomedical and Environmental Science** 20: 343–350.
- Pongsak, S., Piasai, C., Porndon, T., Boontian, N., Padri, M. (2020). Food per microorganism (F/M ratio) to pig manure waste-

- water biogas production at Suranaree University of Technology Farm. **KKU Research Journal (Graduate Studies)** 20(4): 36–45.
- Prandini, J. M., da Silva, M. L. B., Mezzari, M. P., Pirolli, M., Michelon, W., & Soares, H. M. (2016). Enhancement of nutrient removal from swine wastewater digestate coupled to biogas purification by microalgae *Scenedesmus* spp. **Bioresource Technology** 202: 67–75.
- Puig, S., Serra, M., Coma, M., Balaguer, M. D., and Colprim, J. (2011). Simultaneous domestic wastewater treatment and renewable energy production using microbial fuel cells (MFCs). **Water Science and Technology** 64(4): 904–909.
- Puig, S., Serra, M., Coma, M., Cabré, M., Dolors Balaguer, M., and Colprim, J. (2011). Microbial fuel cell application in landfill leachate treatment. **Journal of Hazardous Materials** 185(2–3): 763–767.
- Rabaey, K., and Verstraete, W. (2005). Microbial fuel cells: Novel biotechnology for energy generation. **Trends in Biotechnology** 23: 291–298.
- Tao, Q., Luo, J., Zhou, J., Zhou, S., Liu, G., and Zhang, R. (2014). Effect of dissolved oxygen on nitrogen and phosphorus removal and electricity production in microbial fuel cell. **Bioresource Technology** 164: 402–407.
- Zhang, Z. J., Zhu, J., and King, J. (2006). A two-step fed SBR for treating swine manure. **Process Biochemistry** 41(4): 892–900.