การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบใช้วัสดุกรองสำหรับบำบัดน้ำเสียน้ำชะขยะ

An economic worthiness assessment of a bio-filter microbial fuel cell for leachate wastewater treatment

วจัสกร กาญจนะ[1*], ฐิติพงศ์ พรหมจอม[2], วรินทร์ มีสัตย์[2]
Wajussakorn Kanjana[1*], Thitiphong Promjom[2], Warin Meesat[2]

Received: 10 July 2020 ; Revised: 9 October 2020 ; Accepted: 16 November 2020

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ (Microbial Fuel Cell, MFC) สำหรับบำบัดน้ำเสียเพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจการลงทุนระบบผลิตเชื้อเพลิงทางเลือกใหม่โดยพิจารณารายได้จากปริมาณกำลังไฟฟ้าจากกิจกรรมการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์และปริมาณคาร์บอนเครดิตจากการติดตั้งระบบเผาก๊าซชีวภาพเพื่อลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก ผู้วิจัยทำการทดลองโดยใช้ถังปฏิกรณ์เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ในระดับห้องปฏิบัติการเพื่อบำบัดน้ำชะขยะ ขนาดถัง 7.8 ลิตร ใส่วัสดุกรอง ไบโอบอลโดยมีอัตราส่วนช่องว่างวัสดุกรอง 10% ใช้ทดสอบช่วงระยะเวลาเก็บกักน้ำเสียแตกต่างกันระหว่าง 24-96 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่าถังปฏิกรณ์ที่มีเก็บกัก 96 ชั่วโมงที่อัตราการกรองน้ำเสีย 16 ลิตร/วัน มีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีและผลิตกำลังไฟฟ้าสูงที่สุด โดยสามารถบำบัดซีโอดีได้เท่ากับ 76% และให้ความต่างศักย์สูงสุดเท่ากับ 41.67 มิลลิโวลต์ ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกถังปฏิกรณ์ที่ระยะเวลาเก็บกักดังกล่าวสำหรับการประเมินการขายไฟฟ้าและคาร์บอนเครดิตของระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ จากการศึกษาพบว่ารายได้หลักของระบบเกิดจากการขายคาร์บอนเครดิตเพียงอย่างเดียวเท่ากับ 1,079 บาท/ถัง/ปี เทียบจากปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ลดลงเท่ากับ 2.2 ตัน-คาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า/ถัง/ปี และพบว่าไม่เกิดรายได้จากการขายไฟฟ้าอย่างมีนัยสำคัญโดยที่มีปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้เท่ากับ 0.03 วัตต์-ชั่วโมง/ถัง/ปี ผลวิเคราะห์ความคุ้มค่าของการลงทุนระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ข้างต้นจากมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value, NPV) และอัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return, IRR) ตลอดระยะเวลาเดินระบบ 10 ปีโดยคิดอัตรามูลค่าลดต่อปีคงที่ 7.73% พบว่าถังปฏิกรณ์ดังกล่าวไม่คุ้มค่าต่อการลงทุนโดยมีมูลค่าปัจจุบันสุทธิเท่ากับ -27,106 บาท และอัตราผลตอบแทนภายในเท่ากับ -22% จากต้นทุนวัสดุอุปกรณ์และเดินระบบทั้งหมด 35,000 บาท ทั้งนี้หากวิเคราะห์แนวโน้มการลงทุนจะมีความคุ้มค่ามากขึ้นหากเพิ่มจำนวนถังปฏิกรณ์ในระบบให้มากขึ้นและพัฒนาระบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของระบบ การเพิ่มจำนวนถังปฏิกรณ์เป็น 10 ถัง (อัตราการไหลรวม เท่ากับ 160 ลิตร/วัน) จะส่งผลให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิเท่ากับ 37,537 บาท และอัตราผลตอบแทนภายในเท่ากับ 16% จากต้นทุนทั้งหมดเท่ากับ 41,404 บาท ตลอดระยะเวลาเดินระบบ 10 ปี หากประกอบกับการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของระบบจาก 76% เป็น 90% อัตราผลตอบแทนภายในจะเพิ่มเป็น 22% จากผลการทดลองข้างต้นผู้วิจัยจึงเสนอแนะให้ผู้สนใจลงทุนระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ในปัจจุบันควรพิจารณาปัจจัยด้านกำลังการบำบัดน้ำเสียและประสิทธิภาพของระบบเพื่อวัตถุประสงค์ในการบำบัดน้ำเสียร่วมกับการเก็บกักก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์ในการประกอบการตัดสินใจ

คำสำคัญ: ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ การประเมินก๊าซเรือนกระจก

---

[1] อาจารย์ สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150
[2] นิสิตปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150
[1] Lecturer, Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Kantharawichai District, Maha Sarakham 44150, Thailand.
[2] Undergraduate Student, Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Kantharawichai District, Maha Sarakham 44150, Thailand.
* Corresponding author: Wajussakorn Kanjana, Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Kantharawichai District, Maha Sarakham 44150, Thailand.

Abstract

This research assessed economic worthiness of a microbial fuel cell (MFC) for wastewater treatment in order to provide information for investment guidance on new renewable fuel. Key financial parameters were incomes from electricity production from microbial activity and carbon credits earned from burning released biogas, which reduces greenhouse gas emission. Researchers operated a laboratory-scale reactor of MFC model, with a volume of 7.8 liters, for landfill leachate wastewater treatment, filled with Bioballs as bio-filter (10% void ratio) and then varying hydraulic retention time (HRT) in a range of 24-96 hours. The results showed that the reactor with HRT of 96 hours, operated with a filtration rate of 16 liters/day, had the highest efficiency of COD removal and electricity potential difference, which were 76% and 41.67 millivolt, respectively. Therefore, the reactor with HRT of 96 hours was selected to assess incomes from electricity sale and carbon credit from the MFC. The analysis pointed out that the most profitable revenue from the MFC was caused from only carbon credit, 1,079 baht/reactor/year, derived from greenhouse gas emission reduction of 2.2 ton-carbon dioxide equivalent/reactor/year, while electricity sale did not significantly make revenue by producing electricity of 0.03 watt-hour/reactor/year. From the results of worthiness analysis for the MFC system, to meet criteria of net present value (NPV) and internal rate of return (IRR) for 10-year operating period with an constant discounted rate of 7.73%, it was concluded that the MFC reactor was not worthy of an investment with NPV and IRR of -27,106 Baht and -22%, respectively, from all equipment and operation costs of 35,000 baht. Nevertheless, when considering the analysis of an investment, it would be more worthy by increasing the number and improving treatment efficiency of reactors. Increasing the number of reactors to 10 reactors (equivalent to a filtration rate of 160 liters/day) effected a change of NPV and IRR to 37,537 Baht and 16%, respectively, from all investment costs of 41,404 upon 10-year operating period. If increasing the number of reactors featuring improving COD treatment efficiency from 76% to 86%, IRR would increase to 22%. From the abovementioned results, the researchers suggested that those interested in MFC investment, for now, should consider factors, such as treatment capacity and efficiency of the system for purpose of wastewater treatment together with a biogas collecting system for utilization, as information for an investment decision making.

Keywords: Economic worthiness analysis, Microbial Fuel Cell, Greenhouse gas assessment

บทนำ

โลกมีความต้องการใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากสิ่งอำนวยความสะดวกทั้งหลายในปัจจุบันซึ่งมนุษย์ประดิษฐ์ขึ้นมาล้วนแต่ต้องการพลังงานมากขึ้นในรูปแบบต่างๆ ซึ่งพลังงานที่ใช้เพื่ออำนวยสะดวกส่วนใหญ่นั้นได้มาจากเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น ถ่านหิน แก๊สธรรมชาติ และน้ำมัน เป็นต้น ประกอบกับจำนวนประชากรโลกที่เพิ่มขึ้นทำให้ความต้องการใช้พลังงานมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องส่งผลให้แหล่งเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดลดน้อยลง อีกทั้งการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลยังส่งผลกระทบในด้านลบต่อสิ่งแวดล้อมในหลายๆ ด้านโดยเฉพาะสภาวะโลกร้อน ดังนั้นการแสวงหาแหล่งพลังงานทดแทนที่มีศักยภาพการผลิตพลังงานสูงและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมจึงมีแนวโน้มที่จะช่วยแก้ปัญหาดังกล่าวได้ ซึ่งเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ (Microbial Fuel Cell, MFC) เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจพัฒนา เนื่องจากสามารถเปลี่ยนพลังงานเคมีจากกิจกรรมการย่อยสลายสารอาหารของจุลินทรีย์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้นานตราบเท่าที่มีสารอินทรีย์ป้อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิง

ปัจจุบันได้มีการพัฒนาออกแบบถังปฏิกรณ์เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์เพื่อบำบัดและผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำชะขยะสังเคราะห์ โดยมีหลักการ คือ เติมน้ำชะขยะเข้าไปยังถังปฏิกรณ์ที่มีขั้วไฟฟ้าขั้วลบหรือแอโนด (Anode) จุ่มอยู่ เพื่อให้จุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำชะขยะแล้วปล่อยอิเล็กตรอนและโปรตอนออกมาจากปฏิกิริยาชีวเคมีการย่อยสลายสารอินทรีย์ โดยอิเล็กตรอนจะผ่านขั้วไฟฟ้าขั้วลบเข้าสู่วงจรไฟฟ้าแล้วจึงถูกปล่อยสู่ถังปฏิกรณ์ที่มีขั้วไฟฟ้าขั้วบวกหรือแคโทด (Cathode) จุ่มอยู่ซึ่งทำให้เกิดความต่างศักย์ (Voltage) ที่อิเล็กตรอนไหลเวียนไป ขณะที่โปรตอนซึ่งเป็นอนุมูลอิสระไฮโดรเจน (Ionized hydrogen) จะเคลื่อนที่ผ่านสารละลายในถังปฏิกรณ์ไปยังขั้วไฟฟ้าขั้วบวกและทำปฏิกิริยากับก๊าซออกซิเจนละลาย (Dissolved oxygen) ก่อเกิดเป็นน้ำ เพื่อทำให้สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง (ขวัญลดา พลสมบัติ และ สุภาวดี ศิริประทุม, 2560) แต่ทั้งนี้พบว่าเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ในปัจจุบันยังมีข้อกำจัดเกี่ยวกับปริมาณ

กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ ซึ่งอาจเนื่องมาจากถังปฏิกรณ์ที่ออกแบบขึ้นยังเป็นสภาวะจำลองและยังมีงานวิจัยอยู่อย่างจำกัดที่ศึกษาสภาวะธรรมชาติของจุลินทรีย์ในการย่อยสลายแหล่งน้ำเสียจริงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้า (ณัฐวุฒิ คล้ายสงคราม และ กันยรัตน์ โหละสุต, 2558) ตลอดจนวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ เช่น ขั้วไฟฟ้า และ เยื่อเลือกผ่านไอออน มีราคาสูง (กันยรัตน์ โหละสุต และคณะ, 2554) จากสาเหตุดังกล่าวการศึกษาเพื่อประเมินผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์จากเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์จึงมีความจำเป็นเพื่อวิเคราะห์แนวโน้มความคุ้มค่าในการลงทุนและเสนอแนะแนวทางพัฒนาตามหลักทางเศรษฐศาสตร์ (ขนิษฐา หมู่โสภิญ, 2554 ; ณัฐสิริ แสงธรรมธร, 2552)

เป็นที่ทราบกันว่าการลงทุนโครงการส่วนใหญ่มักก่อให้เกิดผลกระทบทางลบต่อสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรธรรมชาติ ดังนั้นการดำเนินงานโครงการใดๆ นอกจากความคุ้มค่าทางการเงินแล้วจำเป็นต้องมีการประเมินถึงผลกระทบทางลบที่เกิดขึ้นควบคู่ไปด้วย

ดังนั้น “การประเมินมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์สิ่งแวดล้อม” (Environmental economics valuation) จึงเป็นวิธีการประเมินมูลค่าผลกระทบทั้งทางบวกและทางลบเป็นตัวเงินเพื่อนำไปประเมินความคุ้มค่าของโครงการโดยพิจารณาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้วย (Bateman & Turner, 1993) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์สิ่งแวดล้อมของเซลล์เชื้อเพลิงต้นแบบจากผลตอบแทนทางการเงินโดยการขายไฟฟ้า และผลตอบแทนในการลดผลกระทบสิ่งแวดล้อมโดยการขายคาร์บอนเครดิตจากการลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกออกสู่ชั้นบรรยากาศจากการบำบัดน้ำเสียด้วยจุลินทรีย์โดยการรวบรวมและเผาก๊าซมีเทนที่ปลดปล่อยมาจากเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ เพื่อเป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจต่อการลงทุนต่อไป

วิธีการดำเนินงานวิจัย

เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ถูกออกแบบจากถังปฏิกรณ์กรองชีวภาพไม่เติมอากาศแบบไหลขึ้น (Up-flow non-aerobic bio filter) ทำจากถังพลาสติกใสเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 ซม. สูง 30 ซม. โดยแบ่งช่องเป็น 2 ช่อง ได้แก่ ช่องรูปกระบอกด้านล่างใส่วัสดุกรองที่ทำจากเส้นกระสอบปุ๋ยและขั้วไฟฟ้าแอโนด และช่องรูปกรวยด้านบนใส่ขั้วไฟฟ้าแคโทด ขั้วไฟฟ้าทำจากผ้าแกรไฟต์เป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาดกว้าง 10 ซม. ยาว 10 ซม. น้ำเสียจะถูกปล่อยเข้าระบบทางน้ำเข้าด้านบนแล้วไหลย้อนจากด้านล่างผ่านวัสดุกรองไหลล้นออกตรงทางน้ำเข้าและออกจากระบบผ่านทางน้ำออก ดัง Figure 1

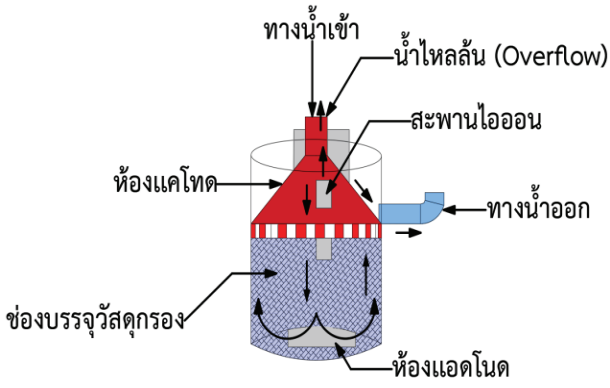

Figure 1 Configuration of Microbial Fuel Cell (MFC)

การทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียและผลิตไฟฟ้าทำโดยเติมน้ำเสียเข้าถังปฏิกรณ์อย่างต่อเนื่อง (Continuous flow) ที่อัตราการไหล 16 ลิตร/วัน น้ำเสียเป็นน้ำชะขยะจากบ่อฝังกลบ ตำบลหนองปลิง อำเภอเมือง จังหวัดมหาสารคาม มีค่าซีโอดี 128-240 กรัม/ลิตร ที่อัตราส่วนช่องว่างวัสดุกรอง 10% เนื่องจากเป็นอัตราส่วนช่องว่างวัสดุกรองที่มีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีสูงที่สุด (ขวัญลดา พลสมบัติ และ สุภาวดี ศิริประทุม, 2560) แล้วนำมาทดสอบปัจจัยระยะเวลาเก็บกักน้ำเสียที่ 24, 48, 72 และ 96 ชั่วโมง เพื่อเลือกระยะเวลาเก็บกักที่ทำให้ระบบประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีและผลิตไฟฟ้าสูงที่สุด

การวิเคราะห์ความคุ้มทุนของการลงทุนเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์จะพิจารณาแยกเป็น 2 รูปแบบการลงทุน ได้แก่ เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบไม่ติดตั้งและติดตั้งระบบเก็บกักก๊าซชีวภาพ โดยแต่ละแบบการลงทุนจะวิเคราะห์ความคุ้มค่าจากต้นทุนรวมต่อปี เทียบกับรายได้รวมต่อปีที่แตกต่างกันดังรายละเอียดใน Table 1 ผลตอบแทนจากปริมาณคาร์บอนเครดิตได้จากการประเมินปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ปลดปล่อยจากถังปฏิกรณ์จากระบบเก็บกักก๊าซชีวภาพมาใช้ประโยชน์เป็นเชื้อเพลิงทั้งหมด ค่าวัสดุอุปกรณ์ระบบเก็บกักก๊าซมีเทนได้จากการประเมินค่าใช้จ่ายในการติดตั้งระบบ โดยมีวัสดุอุปกรณ์ ได้แก่ ถังพลาสติก ท่อพีวีซี และวาล์วกันย้อน ดัง Figure 2

Table 1 Scenarios of Microbial Fuel Cell (MFC) investment

Investment scenario	Cost (C_t)	Return (B_t)
Microbial fuel cell without biogas holder	- Equipment cost for microbial fuel cell - Labor cost for system operation	-Electricity power quantity
Microbial fuel cell with biogas holder	- Equipment cost for microbial fuel cell - Equipment cost for biogas holder - Labor cost for system operation	- Electricity power quantity - Carbon credit quantity

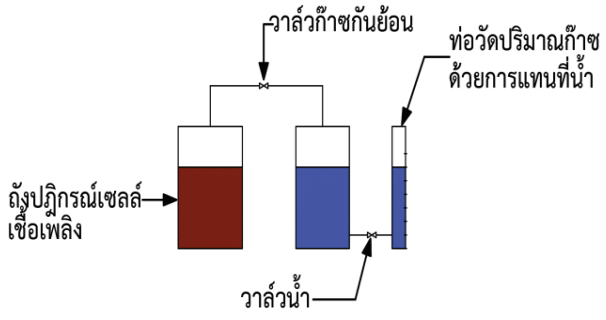

Figure 2 Configuration of water replacement biogas holder

วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล

ปริมาณกำลังไฟฟ้าของถังปฏิกรณ์เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ได้จากการตรวจวัดพารามิเตอร์ต่าง ๆขณะที่ถังปฏิกรณ์เซลล์เชื้อเพลิงเข้าสู่ภาวะเสถียรภาพ (Steady state) ของการย่อยสลายสารอินทรีย์ ปริมาณกระแสไฟฟ้าประเมินจากการตรวจวัดค่าความต่างศักย์วงจรเปิด (Open Circuit Voltage, OCV) จนมีค่าคงที่แล้วจึงนำตัวต้านทานภายนอก 500 โอห์ม มาต่อเพื่อวัดค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าแล้วนำมาคำนวณเป็นปริมาณกำลังไฟฟ้าตามลำดับ

การประเมินปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ปลดปล่อยจากถังปฏิกรณ์เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ใช้ข้อมูลพารามิเตอร์ต่าง ๆขณะที่ถังปฏิกรณ์เข้าสู่ภาวะเสถียรภาพของการย่อยสลายสารอินทรีย์ โดยประเมินได้จากสูตร ดังนี้ (UNFCCC, 2019)

$$BE_y = MEP_{wwtreatment,y} \times GWP_CH_4$$

$$MEP_{ww,treatment,y} = \sum_i (Q_{ww,i,y} \times COD_{inflow,i,y} \times \eta_{COD,BL,i} \times MCF_{wwtreatment.BL,i}) \times B_{o,ww} \times UF_{BL}$$

โดยที่

BE_y คือ ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าที่ปลดปล่อยออกจากระบบบำบัดน้ำเสีย (ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า/ปี)

GWP_CH_4 คือ ค่าศักยภาพการก่อให้เกิดโลกร้อนของก๊าซมีเทนเทียบกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (เท่ากับ 25)

$MBE_{WW,treatment,y}$ คือ ปริมาณก๊าซมีเทนที่ปลดปล่อยจากระบบบำบัดน้ำเสีย *i* (ตัน/ปี)

$Q_{ww,i,y}$ คือ ปริมาณน้ำเสียที่เข้าระบบบำบัดน้ำเสีย *i* (ลบ.ม./ปี)

$COD_{inflow,i,y}$ คือ ปริมาณซีโอดีของน้ำเสียเข้าระบบบำบัดน้ำเสีย *i* (ตัน/ลบ.ม./)

$h_{COD,BL,i}$ คือ ประสิทธิภาพการบำบัดการบำบัดซีโอดีของระบบบำบัดน้ำเสีย *i* (%)

$MCF_{ww,treatment,BL,I}$ คือ ค่าปัจจัยการแก้ไขสำหรับก๊าซมีเทน (Methane correction factor) (เท่ากับ 0.8)

$B_{O,ww}$ คือ ค่าการเกิดก๊าซมีเทนจากการย่อยสลายซีโอดี (เท่ากับ 0.25 ตันมีเทน/ตันซีโอดี)

UF_{BL} คือ ปัจจัยค่าความคลาดเคลื่อน (เท่ากับ 0.89)

ดัชนีชี้วัดในการวิเคราะห์ความคุ้มทุนของการลงทุนเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ ได้แก่ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value, NPV) และ อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return : IRR) โดยจะพิจารณาว่าการลงทุนคุ้มค่าเมื่อ NPV มากกว่า 0 และ IRR มากกว่าอัตราดอกเบี้ยหรือเงินเฟ้อในปีที่ลงทุน (7.73%) โดยคำนวณได้ตามสูตร ดังนี้ (Main, 2019 ; ณิชานันท์ ทองนาค, 2540)

$$NPV = \sum_{t=1}^{n} \frac{B_t - C_t}{(1+i)^t}$$

$$IRR = NPV = \sum_{t=1}^{n} \frac{B_t - C_t}{(1+r)^t} = 0$$

โดยที่

NPV คือ มูลค่าปัจจุบันสุทธิตลอดอายุการลงทุน (บาท)

B_t คือ ผลตอบแทนของการลงทุนในปีที่ t (บาท/ปี)

C_t คือ ต้นทุนของการลงทุนในปีที่ t (บาท/ปี)

i คือ อัตราส่วนลดต่อปี (7.73%/ปี)

IRR, r คือ อัตราผลตอบแทนภายในหรืออัตราส่วนลดเมื่อ *NPV = 0* ตลอดอายุการลงทุน (%)

ผลการทดลองและวิจารณ์

ผู้วิจัยได้ทำการเลือกถังปฏิกรณ์เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ที่มีอัตราส่วนช่องว่างวัสดุกรอง 10% ที่ระยะเวลาเก็บกักแตกต่างกันเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีละลายน้ำ (Soluble Chemical Oxygen Demand, SCOD) ในน้ำชะขยะและน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว ผลของประสิทธิภาพการบำบัดในช่วงเสถียรภาพของการบำบัดพบว่าถังปฏิกรณ์ที่ระยะเวลาเก็บกัก 96 ชั่วโมงมีประสิทธิภาพการบำบัด SCOD สูงสุดเท่ากับ 76% โดยมีค่า SCOD ของน้ำชะขยะเข้าถังปฏิกรณ์ 112,000 มิลลิกรัม/ลิตร และน้ำที่ผ่านการบำบัดออกจากถังปฏิกรณ์ 27,200 มิลลิกรัม/ลิตร ดังแสดงใน Figure 3 โดยที่ระยะเวลาเก็บกักดังกล่าวระบบให้ความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าที่มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 41.67 มิลลิโวลต์ และ 0.083 มิลลิแอมแปร์ ที่ค่าความต้านทานที่ 500 โอห์ม (ขวัญลดา พลสมบัติ และ สุภาวดี ศิริประทุ, 2560) เมื่อเปรียบเทียบกับผลงานวิจัยของ สุจิรา ศุกร์นิมิา (2553) พบว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาเก็บกักของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์จาก 12 เป็น 24 และ 36 ชั่วโมง จะทำให้ค่าความต่างศักย์มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 34 มิลลิโวลต์ เป็น 81-106 มิลลิโวลต์ ที่ความต้านทาน 300 กิโลโอห์ม ซึ่งมีความสัมพันธ์สอดคล้องกับงานของผู้วิจัย ส่วนค่าความต่างศักย์ที่แตกต่างกันอาจเป็นเพราะองค์ประกอบระบบเซลล์เชื้อเพลิงและน้ำเสียที่ใช้ไม่เหมือนกัน ทั้งนี้ผู้วิจัยจึงได้ใช้พารามิเตอร์ประสิทธิภาพและปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของระบบตนเองที่ทราบต้นทุนมาประเมินความคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์ต่อไป

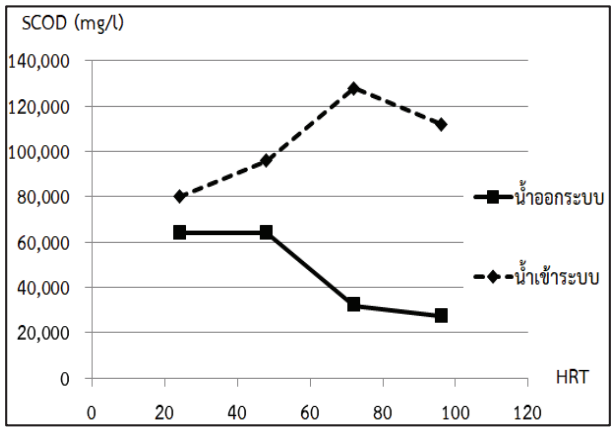

Figure 3 Profile of Soluble Chemical Oxygen Demand (SCOD) in influent and effluent from microbial fuel cell for different hydraulic retention time (HRT)

จากการประเมินผลตอบแทนการลงทุนถังปฏิกรณ์เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์พบว่าในระยะเวลาการลงทุน 10 ปี จากเงินลงทุนการก่อสร้างและเดินระบบทั้งหมด 35,000 บาท โดยมีรายละเอียดดังที่แสดงในTable 2 ปรากฏว่าถังปฏิกรณ์ที่อัตราการกรอง 16 ลิตร/วัน สามารถผลิตกำลังไฟฟ้ารวม 0.0003 กิโลวัตต์-ชั่วโมง โดยที่อัตราคิดลด 7.73% มีมูลค่าผลตอบแทนจากการขายไฟฟ้าทั้งหมด 0.0009 บาท จากราคาขายไฟฟ้าจากพลังงานเชื้อเพลิงทดแทน 2.8 บาท/หน่วย (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงานกระทรวงพลังงาน, 2562) และสามารถลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกรวม 22.12 ตัน-คาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า โดยที่อัตราคิดลด 7.73% มีมูลค่าผลตอบแทนจากการขายคาร์บอนเครดิตทั้งหมด 7,894 บาท ซึ่งมีผลตอบแทนสุทธิปีแรกของการลงทุนเท่ากับ 1,079 บาท จากราคาขายคาร์บอนเครดิต 487.7 บาท/ตัน-คาร์บอนไดออกไซด์ (บุญรอด เยาวพฤกษ์, 2562)

Table 2 Equipment and labor costs for microbial fuel cell investment

Item List	unit	Cost (Baht)	Salvage cost* (Baht)	Depreciated cost (Baht)
Investment cost for microbial fuel cell				
Plastic bucket 7.8 liter	1 bucket	60	6.6	53.4
Wastewater influent tank 120 liter	1 tank	183	19.8	163.2
Wastewater effluent tank 10 liter	1 tank	45	4.9	40.1
PVC pipe	8 meters	87	9.6	77.4
PVC pipe components	10 units	102	11.2	90.8
Computer	1 unit	3,000	330	2,670
Voltmeter	1 unit	390	42.9	347.1
Currentmeter	1 unit	23,040	2,534.4	20,505.6
PH and ORP meter	1 unit	8,200	902	7,298
Tank iron stand	1 unit	300	33	267
Total depreciated cost				31,512.6
Investment for biogas holder				
Check value	1 unit	490	53.9	436.1
PVC pipe components	5 units	57	6.3	50.7
Total depreciated cost				486.8
Labor cost for operating system				
Lump sum payment	10 times	3,000	-	3,000

Remark: *Referred from The Army Comptroller (2015) หรือ สบช. (2558)

จากมูลค่าผลตอบแทนรวมเทียบกับต้นทุนทำให้ถังปฏิกรณ์ไม่คุ้มค่าต่อการลงทุนจากค่า NPV และ IRR เท่ากับ -27,106 และ -22% ตามลำดับ ดังรายละเอียดผลตอบแทนที่แสดงใน Figure 4 ทั้งนี้หากต้องการเพิ่มความคุ้มค่าต่อการลงทุนอาจพิจารณาลดต้นทุนโดยการเช่าแทนการซื้อเครื่องมือตรวจวัดทางไฟฟ้าซึ่งมีราคาสูงเพื่อเพิ่มความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

ผู้วิจัยได้วิเคราะห์การประหยัดต่อขนาด (Economic of scale) โดยทำการประเมินแนวโน้มความคุ้มค่าของการลงทุนระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบถังปฏิกรณ์ 10 ถังต่อขนานกันหรืออัตราการกรองรวม 160 ลิตร/วัน ตามขนาดชุดทดลองขนาดเล็ก (Bench-scale pilot plant) ที่ได้วางแผนไว้โดยประเมินเงินลงทุนทั้งหมดเท่ากับ 41,404 บาท โดยมีต้นทุนเพิ่มจากชุดประกอบถังปฏิกรณ์อีก 9 ชุดปรากฏว่าระบบได้ผลตอบแทนจากการขายไฟฟ้ามูลค่ารวม 0.009 บาท และได้ผลตอบแทนสุทธิจากการขายคาร์บอนเครดิตมูลค่ารวม 78,941 บาท

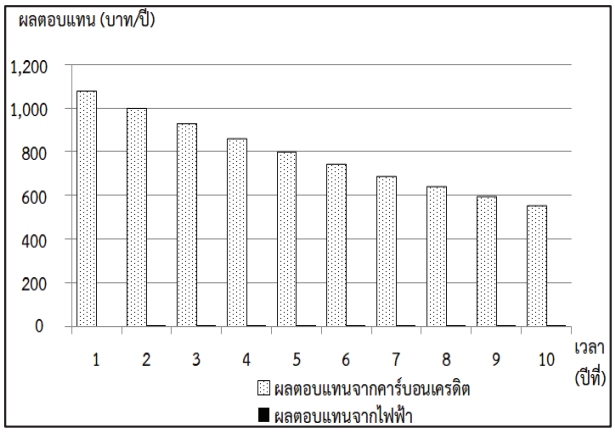

Figure 4 Financial returns of electricity and carbon credit sale from a microbial fuel call with biogas holder

เมื่อเทียบมูลค่าผลตอบแทนรวมกับต้นทุน ปรากฏว่าถังปฏิกรณ์แบบ 10 ถัง มีความคุ้มค่าต่อการลงทุนสูงกว่าระบบแบบถังเดียวโดยมีค่า NPV และ IRR เท่ากับ 37,537 และ 16% ตามลำดับ ดังแสดงใน Figure 5 เนื่องจากระบบมีต้นทุนเพิ่มขึ้นไม่มากจากต้นทุนถังพลาสติก ท่อพีวีซีและส่วนประกอบท่อพีวีซี โดยที่ไม่จำเป็นต้องลงทุนคอมพิวเตอร์และเครื่องมือตรวจวัดต่างๆ ซึ่งเป็นต้นทุนคงที่ (Fixed cost) เพิ่มเติม ทั้งนี้ค่า NPV และ IRR อาจไม่ตรงกับค่าที่ได้จากการคำนวณหากจำนวนถัง อัตราการกรอง และองค์ประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ที่ออกแบบเปลี่ยนแปลงไปจากงานวิจัยนี้

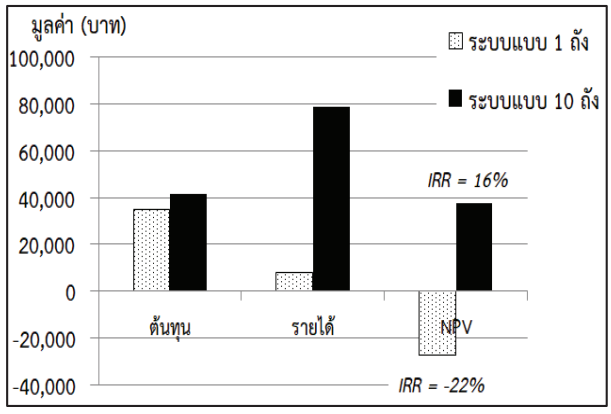

Figure 5 Comparison of investment cost, return and worthiness between 1 tank and 10 tanks microbial fuel cell system

จากผลการทดลองข้างต้นผลตอบแทนทั้งหมดของการลงทุนมาจากการขายคาร์บอนเครดิตซึ่งปริมาณคาร์บอนเครดิตที่ผลิตได้จะขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของการบำบัดซีโอดี ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงศึกษาแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของระบบที่มีผลต่อค่า IRR พบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าประสิทธิภาพตั้งแต่ 76% ถึง 90% ซึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบได้ เช่น การเดินระบบด้วยอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่เหมาะสม การเปลี่ยนวัสดุกรองที่มีพื้นที่ผิวมากขึ้น และอาจทำการเปลี่ยนขั้วไฟฟ้าเป็นแท่งแกรไฟต์กลวงหรือผ้าคาร์บอนเคลือบแพลตตินัมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทอิเล็กตรอนจากสารอินทรีย์ให้ดียิ่งขึ้น (ภาคภูมิ อัตตสิริลักษณ์, 2554) ผลการประเมินของระบบแบบ 1 ถังปฏิกรณ์ พบว่าการเพิ่มประสิทธิภาพไม่มีผลทำให้เกิดความคุ้มค่าต่อการลงทุนโดยมีค่าระหว่าง IRR –22% ถึง -20% ตามความสัมพันธ์ y = 0.39x-0.14 แต่การเปลี่ยนแปลงค่าประสิทธิภาพของระบบแบบ 10 ถังปฏิกรณ์ตั้งแต่ 76% ถึง 90% ขึ้นไปทำให้มีความคุ้มค่าในการลงทุนเพิ่มขึ้นถึงค่า IRR สูงสุด 22% ตามความสัมพันธ์ y = 0.14x-0.33 ดังที่แสดงใน Figure 6

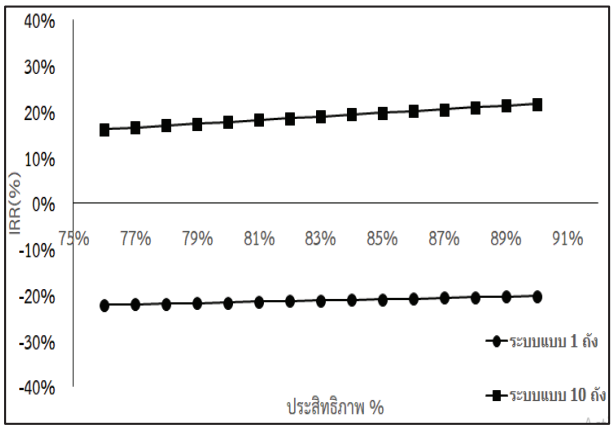

Figure 6 Relationship of Internal Rate of Return (IRR) and Soluble Chemical Oxygen Demand (sCOD) removal efficiency between 1 tank and 10 tanks microbial fuel cell system

จากผลการทดลองที่พบว่าผลตอบแทนจากการกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีมูลค่าน้อยซึ่งไม่มีนัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงความคุ้มทุน ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการประเมินกำลังไฟฟ้าที่ระบบแบบ 1 ถังปฏิกรณ์ (อัตราการกรอง 16 ลิตร/วัน) ควรผลิตได้เพื่อให้ระบบมีความคุ้นทุนทั้งในกรณีที่รวมและไม่รวมผลตอบแทนจากการขายคาร์บอนเครดิต ดังที่แสดงใน Figure 7 และ 8

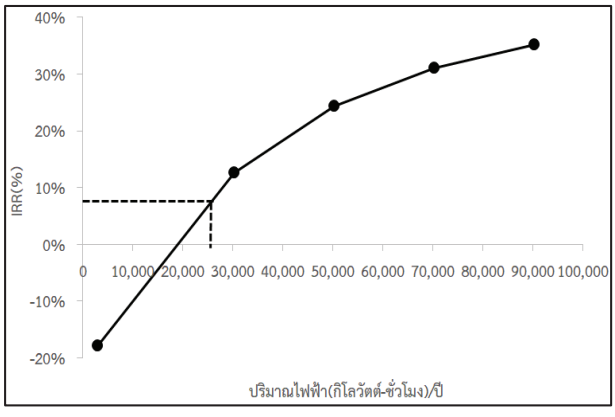

Figure 7 Relationship of Internal Rate of Return (IRR) and electricity production from a microbial fuel cell, not including carbon credit return

ผลการประเมินพบว่าในกรณีที่ไม่รวมผลตอบแทนจากคาร์บอนเครดิต ระบบควรผลิตกำลังไฟฟ้าให้ได้ประมาณ 30,000 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ปี เพื่อให้ IRR มีค่าอย่างน้อย 13% (หรืออย่างน้อย 25,000 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ปี จึงคุ้มค่าต่อการลงทุนที่ค่า IRR เท่ากับ 7.73%) ส่วนในกรณีรวมผลตอบแทนจากคาร์บอนเครดิต พบว่าระบบสามารถลดปริมาณผลิตไฟฟ้าได้อย่างน้อยเหลือประมาณ 3 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ปี เพื่อให้ IRR มีค่าอย่างน้อย 7%

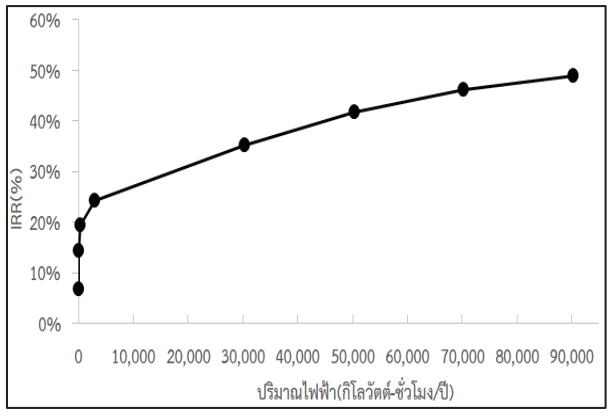

Figure 8 Relationship of Internal Rate of Return (IRR) and electricity production from a microbial fuel cell, including carbon credit return

สรุป

ระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ได้ถูกออกแบบเพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสียร่วมกับการผลิตไฟฟ้าซึ่งทำให้ก่อให้เกิดรายได้จากการขายไฟฟ้าและมีแนวโน้มที่จะใช้เป็นเชื้อเพลิงทางเลือกในอนาคต จึงทำให้เห็นถึงความสำคัญของความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในการลงทุนโดยพิจารณารายได้จากคาร์บอนเครดิตจากการลงทุนระบบเก็บก๊าซชีวภาพเพื่อลดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมร่วมด้วย การประเมินรายได้จากถังปฏิกรณ์ต้นแบบเพื่อบำบัดน้ำชะขยะพบว่า ถังปฏิกรณ์ไม่สามารถสร้างรายได้จากการผลิตไฟฟ้าซึ่งได้กำลังไฟฟ้าเพียง 0.03 วัตต์-ชั่วโมง/ถัง/ปี แต่รายได้ทั้งหมดมาจากผลตอบแทนจากการขายคาร์บอนเครดิต โดยถังปฏิกรณ์จะมีความคุ้มค่าต่อการลงทุนเมื่อเดินระบบที่อัตราการกรองที่สูงขึ้นตั้งแต่ 160 ลิตร/วัน ขึ้นไป ซึ่งจะทำให้ระบบมีมูลค่ากำไร 37,537 บาท และมีผลตอบแทนภายใน 16% ในระยะเวลาเดินระบบ 10 ปี ที่อัตราลด 7.73%

การพัฒนาระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดเป็นปัจจัยที่ควรพิจารณาเพื่อเพิ่มรายได้จากการผลิตไฟฟ้าและคาร์บอนเครดิต หากประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของระบบเพิ่มขึ้นจะทำให้มีแนวโน้มค่า IRR เพิ่มขึ้น เมื่อเดินระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ที่อัตราการกรอง 160 ลิตร/วัน โดยเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ 90% จะทำให้ค่าผลตอบแทนภายในมีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 22% การพัฒนาเพื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ก็เป็นอีกแนวทางหนึ่งในการเพิ่มความคุ้มค่าต่อการลงทุน หากไม่พิจารณารายได้จากคาร์บอนเครดิตร่วมด้วยพบว่า ระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ที่อัตราการกรอง 16 ลิตร/วัน ควรพัฒนาการผลิตกำลังไฟฟ้าให้ได้ถึง 25,000 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ปี แต่หากพิจารณารายได้จากคาร์บอนเครดิตร่วมด้วยควรพัฒนาการผลิตกำลังไฟฟ้าให้ได้ถึง 3 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/

ปี จากผลการทดลองข้างต้นหากผู้ที่สนใจจะลงทุนระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ในปัจจุบันควรพิจารณาติดตั้งระบบเก็บก๊าซชีวภาพเพื่อเพิ่มรายได้จากการขายคาร์บอนเครดิต รวมถึงการเพิ่มขนาดหรืออัตราการกรองของระบบเพื่อให้ระบบมีความคุ้มค่าต่อการลงทุนมากยิ่งขึ้น แต่ทั้งนี้งานวิจัยที่มีวัตถุประสงค์ในการเพิ่มประสิทธิภาพและการผลิตไฟฟ้าเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อพัฒนาระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ให้เป็นระบบผลิตเชื้อเพลิงทดแทนเชิงพาณิชย์ในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ภายใต้โครงการทุนอุดหนุนงานวิจัยอาจารย์รุ่นใหม่ งบประมาณเงินรายได้ประจำปี 2562 และขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.เพชร เพ็งชัย นางสาวขวัญลดา พลสมบัติ และ นาวสางสุภาวดี ศิริประทุม เป็นอย่างสูงที่เอื้อเฟื้อข้อมูลประกอบการทำวิจัยฉบับนี้

เอกสารอ้างอิง

กันยรัตน์ โหละสุต และคณะ. (2554). *เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพวิวัฒนาการ การผลิตไฟฟ้าจากน้ำเสีย*. มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

ขนิษฐา หมู่โสภิญ. (2554). *เซลล์เชื้อเพลิง: แนวทางใหม่เพื่อการผลิตพลังงาน*. มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.

ขวัญลดา พลสมบัติ และ สุภาวดี ศิริประทุม. (2560). *ผลของอัตราส่วนช่องว่างชั้นกรองที่มีต่อการบำบัดซีโอดีและบีโอดีในน้ำชะขยะด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ที่สร้างจากถังกรองชีวภาพไม่เติมอากาศแบบไหลขึ้น*. ปริญญานิพนธ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะทำงานเพื่อพิจารณากำหนดอายุการใช้งานสินทรัพย์ของ อผศ. (2562). *ปรับปรุงหลักเกณฑ์การคำนวณค่าเสื่อมราคาสินทรัพย์ถาวร. พ.ศ.2562*. จาก http://www.wvo. thaigov.net/ตารางอายุการใช้งานสินทรัพย์ถาวรของ%20อผศ.pdf.

ณิชานันท์ ทองนาค. (2540). *การศึกษาความเป็นไปได้ในทางเศรษฐศาสตร์ในการนำน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดกลับมาใช้ประโยชน์ในเขตพื้นที่เมืองพัทยา จังหวัดชลบุรี*. ฐานข้อมลวิทยานิพนธ์ไทย.

ณัฐวุฒิ คล้ายสงคราม และกันยรัตน์ โหละสุต. (2558). การผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพโดยใช้ต้นกกราชิน. *วิศวกรรมสารมหาวิทยาลัยขอนแก่น, 42*(1), 117-124.

ณัฐสิริ แสงธรรมธร. (2552). *การผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียโดยใช้เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ*. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

บุญรอด เยาวพฤกษ์. (2562). *ราคาของคาร์บอนเครดิต. พ.ศ. 2562*. ; จาก http://siamcarbonmarkets.blogspot.com.

ภาคภูมิ อัตตสิริลักษณ์. (2554). *ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียฟาร์มสุก*. ปริญญานิพนธ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สำนักงานนโยบายและแผนพลังงานกระทรวงพลังงาน. (2562). *ผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก. พ.ศ.2562*. จาก http://www.eppo.go.th/index.php/th/electricity/private/vspp.

สำนักงานปลัดบัญชีกองทัพบก (สบช.). (2555). *ปรับปรุงหลักเกณฑ์การคำนวณค่าเสื่อมราคาทรัพย์สินถาวร*. แผนกบัญชีทรัพย์สินและเงินกองทุน กบช.ฝป.

สุจิรา ศุกร์นิมิต. (2553). *การผลิตกระแสไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องคู่โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลไม้กระป๋อง*. ปริญญานิพนธ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อินทุอร เข็มมา และณัฐวรรณ รักษา. (2561). *ผลของอัตราส่วนช่องว่างชั้นกรองที่มีต่อการบำบัดฟอสเฟตและซัลเฟตในน้ำชะขยะด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ที่สร้างจากถังกรองชีวภาพไม่เติมอากาศแบบไหลขึ้น*. วิทยานิพนธ์คณะวิศวกรรมศาสตร: มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.

Bateman, I.J., & Turner, R.K. (1993). *Valuation of the environment, methods and techniques: The contingent valuation method, Sustainable Environmental Economics and Management*. Principles and Practice, Belhaven Pre.

Main, M.A. (2019). *Project Economics and Decision Analysis, Volume I*, Deterministic Mode.

UNFCCC. (2019). *Small-scale Methodology, Methane Recovery in Wastewater Treatment AMS-III-H*. Version 19.0 Sectoral scope(s): 01 and 13, United Nation Framework Convention on Climate.