

การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบใช้วัสดุกรองสำหรับบำบัดน้ำเสียห้ำชะขยะ

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

ว้จัสกร กาญจนะ^{1*}, จฐิตีพงศ์ พรหมจอม², วรินทร์ มีสตัย²

Wajussakorn Kanjana^{1*}, Thitiphong Promjom², Warin Meesat²

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

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ (Microbial Fuel Cell, MFC) สำหรับบำบัดน้ำเสียเพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจการลงทุนระบบผลิตเชื้อเพลิงทางเลือกใหม่โดยพิจารณารายได้จากปริมาณกำลังไฟฟ้าจากกิจกรรมการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์และปริมาณคาร์บอนเครดิตจากการติดตั้งระบบเผาก๊าซชีวภาพเพื่อลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก ผู้วิจัยทำการทดลองโดยใช้ถังปฏิกรณ์เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ในระดับห้องปฏิบัติการเพื่อบำบัดน้ำเสียขนาดถึง 7.8 ลิตร ใช้วัสดุกรอง ไบโอบอลโดยมีอัตราส่วนช่องว่างวัสดุกรอง 10% ใช้ทดสอบช่วงระยะเวลาเก็บกักน้ำเสียแตกต่างกันระหว่าง 24-96 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่าถึงปฏิกรณ์ที่มีเก็บกัก 96 ชั่วโมงที่อัตราการกรองน้ำเสีย 16 ลิตร/วัน มีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีและผลิตกำลังไฟฟ้าสูงที่สุด โดยสามารถบำบัดซีโอดีได้เท่ากับ 76% และให้ความต่างศักย์สูงสุดเท่ากับ 41.67 มิลลิโวลต์ ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกถึงปฏิกรณ์ที่ระยะเวลาเก็บกักดังกล่าวสำหรับการประเมินการขายไฟฟ้าและคาร์บอนเครดิตของระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ จากการศึกษาพบว่ารายได้หลักของระบบเกิดจากการขายคาร์บอนเครดิตเพียงอย่างเดียวเท่ากับ 1,079 บาท/ถึง/ปี เทียบจากปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ลดลงเท่ากับ 2.2 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า/ถึง/ปี และพบว่าไม่เกิดรายได้จากการขายไฟฟ้าอย่างมีนัยสำคัญโดยที่มีปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้เท่ากับ 0.03 วัตต์-ชั่วโมง/ถึง/ปี ผลวิเคราะห์ความคุ้มค่าของการลงทุนระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ข้างต้นจากมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value, NPV) และอัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return, IRR) ตลอดระยะเวลาเดินระบบ 10 ปีโดยคิดอัตรามูลค่าลดต่อปีคงที่ 7.73% พบว่าถึงปฏิกรณ์ดังกล่าวไม่คุ้มค่าต่อการลงทุนโดยมีมูลค่าปัจจุบันสุทธิเท่ากับ -27,106 บาท และอัตราผลตอบแทนภายในเท่ากับ -22% จากต้นทุนวัสดุอุปกรณ์และเดินระบบทั้งหมด 35,000 บาท ทั้งนี้หากวิเคราะห์แนวโน้มการลงทุนจะมีความคุ้มค่ามากขึ้นหากเพิ่มจำนวนถึงปฏิกรณ์ในระบบให้มากขึ้นและพัฒนาาระบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของระบบ การเพิ่มจำนวนถึงปฏิกรณ์เป็น 10 ถึง (อัตราการไหลรวม เท่ากับ 160 ลิตร/วัน) จะส่งผลให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิเท่ากับ 37,537 บาท และอัตราผลตอบแทนภายในเท่ากับ 16% จากต้นทุนทั้งหมดเท่ากับ 41,404 บาท ตลอดระยะเวลาเดินระบบ 10 ปี หากประกอบกับการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของระบบจาก 76% เป็น 90% อัตราผลตอบแทนภายในจะเพิ่มเป็น 22% จากผลการทดลองข้างต้นผู้วิจัยจึงเสนอแนะให้ผู้สนใจลงทุนระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ในปัจจุบันควรพิจารณาปัจจัยด้านกำลังการบำบัดน้ำเสียและประสิทธิภาพของระบบเพื่อวัตถุประสงค์ในการบำบัดน้ำเสียร่วมกับเก็บกักก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์ในการประกอบการตัดสินใจ

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 ซึ่งพลังงานที่ใช้เพื่ออำนวยความสะดวกส่วนใหญ่นั้นได้มาจากเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น ถ่านหิน แก๊สธรรมชาติ และน้ำมัน เป็นต้น ประกอบกับจำนวนประชากรโลกที่เพิ่มขึ้นทำให้ความต้องการใช้พลังงานมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องส่งผลให้แหล่งเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดลดน้อยลง อีกทั้งการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในหลายๆ ด้านโดยเฉพาะภาวะโลกร้อน ดังนั้นการแสวงหาแหล่งพลังงานทดแทนที่มีศักยภาพการผลิตพลังงานสูงและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมจึงมีแนวโน้มที่จะช่วยแก้ปัญหาดังกล่าวได้ ซึ่งเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ (Microbial Fuel Cell, MFC) เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจพัฒนา เนื่องจากสามารถเปลี่ยนพลังงานเคมีจากกิจกรรมการย่อยสลายสารอาหารของจุลินทรีย์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้นานตราบเท่าที่มี

สารอินทรีย์ป้อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิง

ปัจจุบันได้มีการพัฒนาออกแบบถึงปฏิกรณ์เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์เพื่อบำบัดและผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำชะขยะสังเคราะห์ โดยมีหลักการ คือ เติมน้ำชะขยะเข้าไปยังถึงปฏิกรณ์ที่มีขั้วไฟฟ้าขั้วลบหรือแอโนด (Anode) จุ่มอยู่เพื่อให้จุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำชะขยะแล้วปล่อยอิเล็กตรอนและโปรตอนออกมาจากปฏิกิริยาชีวเคมีการย่อยสลายสารอินทรีย์ โดยอิเล็กตรอนจะผ่านขั้วไฟฟ้าขั้วลบเข้าสู่วงจรไฟฟ้าแล้วจึงถูกปล่อยสู่ถึงปฏิกรณ์ที่มีขั้วไฟฟ้าขั้วบวกหรือแคโทด (Cathode) จุ่มอยู่ซึ่งทำให้เกิดความต่างศักย์ (Voltage) ที่อิเล็กตรอนไหลเวียนไป ขณะที่โปรตอนซึ่งเป็นอนุมูลอิสระไฮโดรเจน (Ionized hydrogen) จะเคลื่อนที่ผ่านสารละลายในถังปฏิกรณ์ไปยังขั้วไฟฟ้าขั้วบวกและทำปฏิกิริยากับก๊าซออกซิเจนละลาย (Dissolved oxygen) ก่อเกิดเป็นน้ำเพื่อทำให้สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง (ขั้วลบคอปอลสมบัติ และ สุภาวดี ศิริประทุม, 2560) แต่ทั้งนี้พบว่าเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ในปัจจุบันยังมีข้อจำกัดเกี่ยวกับปริมาณ

กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ ซึ่งอาจเนื่องมาจากถึงปฏิกรณ์ที่ ออกแบบขึ้นยังเป็นสภาวะจำลองและยังมีงานวิจัยอยู่อย่าง จำกัดที่ศึกษาสภาวะธรรมชาติของจุลินทรีย์ในการย่อยสลาย แหล่งน้ำเสียจริงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้า (ณัฐวุฒิ คล้ายสงคราม และ กันยรัตน์ โหละสุต, 2558) ตลอดจน วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ เช่น ขั้วไฟฟ้า และ เยื่อเลือกผ่านไอออน มีราคาสูง (กันยรัตน์ โหละสุต และคณะ, 2554) จากสาเหตุดังกล่าวการศึกษาเพื่อ ประเมินผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์จากเซลล์เชื้อเพลิง จุลินทรีย์จึงมีความจำเป็นเพื่อวิเคราะห์แนวโน้มความคุ้ม ค่าในการลงทุนและเสนอแนะแนวทางพัฒนาตามหลักทาง เศรษฐศาสตร์ (ชนิษฐา หมูโสภิญ, 2554 ; ณัฐสิริ แสงธรรมธร, 2552)

เป็นที่ทราบกันว่าการลงทุนโครงการส่วนใหญ่มักก่อให้เกิดผลกระทบทางลบต่อสิ่งแวดล้อมและ ทรัพยากรธรรมชาติ ดังนั้นการดำเนินงานโครงการใด ๆ นอกจากความคุ้มค่าทางการเงินแล้วจำเป็นต้องมีการประเมิน ถึงผลกระทบทางลบที่เกิดขึ้นควบคู่ไปด้วย

ดังนั้น “การประเมินมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์สิ่งแวดล้อม” (Environmental economics valuation) จึงเป็นวิธีการประเมินมูลค่าผลกระทบทั้งทางบวกและทางลบเป็นตัว เงินเพื่อนำไปประเมินความคุ้มค่าของโครงการโดยพิจารณา ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้วย (Bateman & Turner, 1993) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินมูลค่าทาง เศรษฐศาสตร์สิ่งแวดล้อมของเซลล์เชื้อเพลิงต้นแบบจากผล ตอบแทนทางการเงินโดยการขายไฟฟ้า และผลตอบแทนใน การลดผลกระทบสิ่งแวดล้อมโดยการขายคาร์บอนเครดิตจาก การลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกออกสู่ชั้นบรรยากาศจากการ บำบัดน้ำเสียด้วยจุลินทรีย์โดยการรวบรวมและเผาก๊าซมีเทน ที่ปลดปล่อยมาจากเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ เพื่อเป็นข้อมูล ประกอบการตัดสินใจต่อการลงทุนต่อไป

วิธีการดำเนินงานวิจัย

เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ถูกออกแบบจากถังปฏิกรณ์ กรองชีวภาพไม่เติมอากาศแบบไหลขึ้น (Up-flow non-aerobic bio filter) ทำจากถังพลาสติกใสเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 ซม. สูง 30 ซม. โดยแบ่งช่องเป็น 2 ช่อง ได้แก่ ช่องรูปกระบอกด้านล่างใส่วัสดุกรองที่ทำจากเส้นกระสอบปุ๋ยและขั้วไฟฟ้าแอโนด และช่องรูปกรวยด้านบนใส่ขั้วไฟฟ้าแคโทด ขั้วไฟฟ้าทำจาก

ผ้าแกรไฟต์เป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาดกว้าง 10 ซม. ยาว 10 ซม. น้ำเสียจะถูกปล่อยเข้าระบบทางน้ำเข้าด้านบนแล้วไหล ย้อนจากด้านล่างผ่านวัสดุกรองไหลล้นออกตรงทางน้ำเข้าและ ออกจากระบบผ่านทางน้ำออก ดัง Figure 1

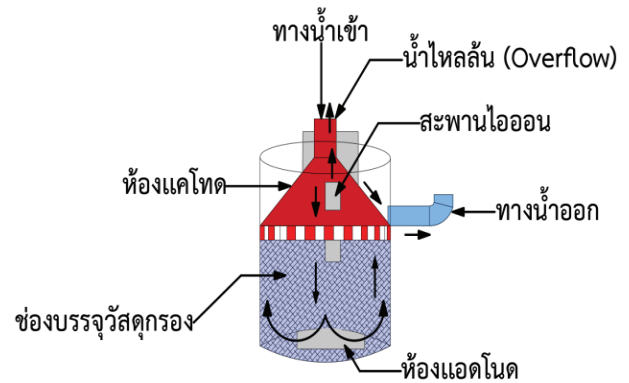


Figure 1 Configuration of Microbial Fuel Cell (MFC)

การทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียและผลิต ไฟฟ้าทำโดยเติมน้ำเสียเข้าถังปฏิกรณ์อย่างต่อเนื่อง (Con- tinuous flow) ที่อัตราการไหล 16 ลิตร/วัน น้ำเสียเป็นน้ำ ชะขะจากบ่อฝังกอบ ตำบลหนองปลิง อำเภอเมือง จังหวัด มหาสารคาม มีค่าซีโอดี 128-240 กรัม/ลิตร ที่อัตราส่วนช่อง ว่างวัสดุกรอง 10% เนื่องจากเป็นอัตราส่วนช่องว่างวัสดุกรอง ที่มีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีสูงที่สุด (ขวัญฤดา พลสมบัติ และ สุภาวดี ศิริประทุม, 2560) แล้วนำมาทดสอบปัจจัยระยะ เวลาเก็บกักน้ำเสียที่ 24, 48, 72 และ 96 ชั่วโมง เพื่อเลือก ระยะเวลากักน้ำเสียที่ทำให้ระบบประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี และผลิตไฟฟ้าสูงที่สุด

การวิเคราะห์ความคุ้มค่าของการลงทุนเซลล์เชื้อ เพลิงจุลินทรีย์จะพิจารณาแยกเป็น 2 รูปแบบการลงทุน ได้แก่ เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบไม่ติดตั้งและติดตั้งระบบเก็บกัก ก๊าซชีวภาพ โดยแต่ละแบบการลงทุนจะวิเคราะห์ความคุ้มค่า จากต้นทุนรวมต่อปี เทียบกับรายได้รวมต่อปีที่แตกต่างกัน ดังรายละเอียดใน Table 1 ผลตอบแทนจากปริมาณคาร์บอน เครดิตได้จากการประเมินปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ปลดปล่อย จากถังปฏิกรณ์จากระบบเก็บกักก๊าซชีวภาพมาใช้ประโยชน์ เป็นเชื้อเพลิงทั้งหมด ค่าวัสดุอุปกรณ์ระบบเก็บกักก๊าซมีเทน ได้จากการประเมินค่าใช้จ่ายในการติดตั้งระบบ โดยมีวัสดุ อุปกรณ์ ได้แก่ ถังพลาสติก ท่อพีวีซี และวาล์วกันย้อน ดัง Figure 2

Table 1 Scenarios of Microbial Fuel Cell (MFC) investment

Investment scenario	Cost (C)	Return (B)
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

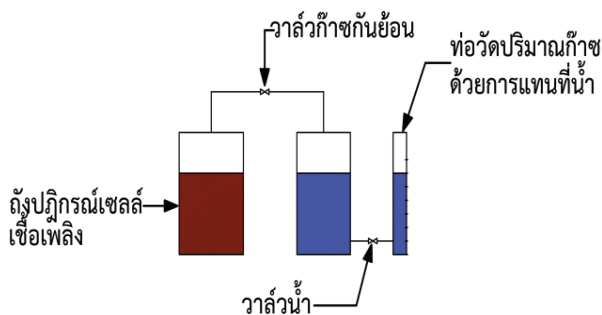


Figure 2 Configuration of water replacement biogas holder

วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล

ปริมาณกำลังไฟฟ้าของถังปฏิกรณ์เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ได้จากการตรวจวัดพารามิเตอร์ต่างๆขณะที่ถังปฏิกรณ์เซลล์เชื้อเพลิงเข้าสู่ภาวะเสถียรภาพ (Steady state) ของการย่อยสลายสารอินทรีย์ ปริมาณกระแสไฟฟ้าประเมินจากการตรวจวัดค่าความต่างศักย์วงจรมืด (Open Circuit Voltage, OCV) จนมีค่าคงที่แล้วจึงนำตัวต้านทานภายนอก 500 โอห์ม มาต่อเพื่อวัดค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าแล้วนำมาคำนวณเป็นปริมาณกำลังไฟฟ้าตามลำดับ

การประเมินปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ปลดปล่อยจากถังปฏิกรณ์เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ใช้ข้อมูลพารามิเตอร์ต่างๆขณะที่ถังปฏิกรณ์เข้าสู่ภาวะเสถียรภาพของการย่อยสลายสารอินทรีย์ โดยประเมินได้จากสูตร ดังนี้ (UNFCCC, 2019)

$$BE_y = MEP_{ww,treatment,y} \times GWP_{CH_4}$$

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

โดยที่

BE_y คือ ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าที่ปลดปล่อยออกจากระบบบำบัดน้ำเสีย (ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า/ปี)

GWP_{CH_4} คือ ค่าศักยภาพการก่อให้เกิดโลกร้อนของก๊าซมีเทนเทียบกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (เท่ากับ 25)

$MEP_{ww,treatment,y}$ 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./)

$\eta_{COD,BL,i}$ 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)

ดัชนีชี้วัดในการวิเคราะห์ความคุ้มค่าของการลงทุนเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ได้แก่ 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 ; นิชานันท์ 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 ศิริประที, 2560) เมื่อเปรียบเทียบกับผลงานวิจัยของ สุจิตรา สุกรณ์นิมา (2553) พบว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาเก็บกักของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์จาก 12 เป็น 24 และ 36 ชั่วโมง จะทำให้ค่าความต่างศักย์มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 34 มิลลิโวลต์ เป็น 81-106 มิลลิโวลต์ ที่ความต้านทาน 300 กิโลโอห์ม ซึ่งมีความสัมพันธ์สอดคล้องกับงานของผู้วิจัย ส่วนค่าความต่างศักย์ที่แตกต่างกันอาจเป็นเพราะองค์ประกอบระบบเซลล์เชื้อเพลิงและน้ำเสียที่ใช้ไม่เหมือนกัน ทั้งนี้ผู้วิจัยจึงได้ใช้พารามิเตอร์ประสิทธิภาพและปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของระบบตนเองที่ทราบต้นทุนมาประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ต่อไป

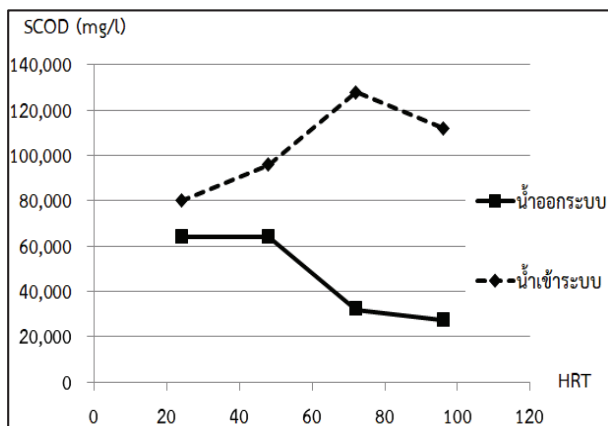


Figure 3 Profile of Soluble Chemical Oxygen Demand (SCOD) in influent and effluent from microbial fuel cell for different hydraulic retention time (HRT)

จากการประเมินผลตอบแทนการลงทุนถึงปฏิกรณ์เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์พบว่าในระยะเวลาการลงทุน 10 ปี จากเงินลงทุนการก่อสร้างและเดินระบบทั้งหมด 35,000 บาท โดยมีรายละเอียดดังที่แสดงใน Table 2 ปรากฏว่าถึงปฏิกรณ์ที่อัตราการกรอง 16 ลิตร/วัน สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าวรวม

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 me-ters	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)

จากมูลค่าผลตอบแทนรวมเทียบกับต้นทุนทำให้ถึง
 ปฏิกรณ์ไม่คุ้มค่าต่อการลงทุนจากค่า NPV และ IRR เท่ากับ
 -27,106 และ -22% ตามลำดับ ดังรายละเอียดผลตอบแทนที่
 แสดงใน Figure 4 ทั้งนี้หากต้องการเพิ่มความคุ้มค่าต่อการ
 ลงทุนอาจพิจารณาลดต้นทุนโดยการเช่าแทนการซื้อเครื่อง
 มือตรวจวัดทางไฟฟ้าซึ่งมีราคาสูงเพื่อเพิ่มความคุ้มค่าทาง
 เศรษฐศาสตร์

ผู้วิจัยได้วิเคราะห์การประหยัดต่อขนาด (Economic
 of scale) โดยทำการประเมินแนวโน้มความคุ้มค่าของการ
 ลงทุนระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบถึงปฏิกรณ์ 10 ถัง
 ต่อขนาดกันหรืออัตราการกรองรวม 160 ลิตร/วัน ตามขนาด
 ชุดทดลองขนาดเล็ก (Bench-scale pilot plant) ที่ได้วางแผน
 ไว้โดยประเมินเงินลงทุนทั้งหมดเท่ากับ 41,404 บาท โดย
 มีต้นทุนเพิ่มจากชุดประกอบถึงปฏิกรณ์อีก 9 ชุดปรากฏว่า
 ระบบได้ผลตอบแทนจากการขายไฟฟ้ามูลค่ารวม 0.009 บาท
 และได้ผลตอบแทนสุทธิจากการขายคาร์บอนเครดิตมูลค่ารวม
 78,941 บาท

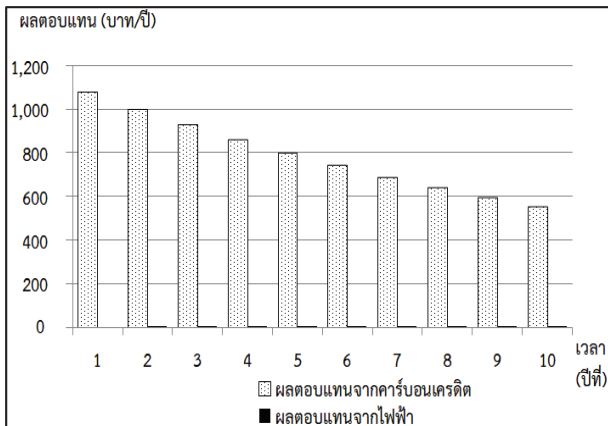


Figure 4 Financial returns of electricity and carbon credit sale from a microbial fuel cell with biogas holder

เมื่อเทียบมูลค่าผลตอบแทนรวมกับต้นทุน ปรากฏว่า
 ถึงปฏิกรณ์แบบ 10 ถัง มีความคุ้มค่าต่อการลงทุนสูงกว่าระบบ
 แบบถึงเดี่ยวโดยมีค่า NPV และ IRR เท่ากับ 37,537 และ 16%
 ตามลำดับ ดังแสดงใน Figure 5 เนื่องจากระบบมีต้นทุนเพิ่ม
 ขึ้นไม่มากจากต้นทุนถังพลาสติก ท่อพีวีซีและส่วนประกอบ
 ท่อพีวีซี โดยที่ไม่จำเป็นต้องลงทุนคอมพิวเตอร์และเครื่องมือ
 ตรวจวัดต่างๆ ซึ่งเป็นต้นทุนคงที่ (Fixed cost) เพิ่มเติม ทั้งนี้
 ค่า NPV และ IRR อาจไม่ตรงกับค่าที่ได้จากการคำนวณหาก
 จำนวนถัง อัตราการกรอง และองค์ประกอบของเซลล์เชื้อเพลิง
 จุลินทรีย์ที่ออกแบบเปลี่ยนแปลงไปจากงานวิจัยนี้

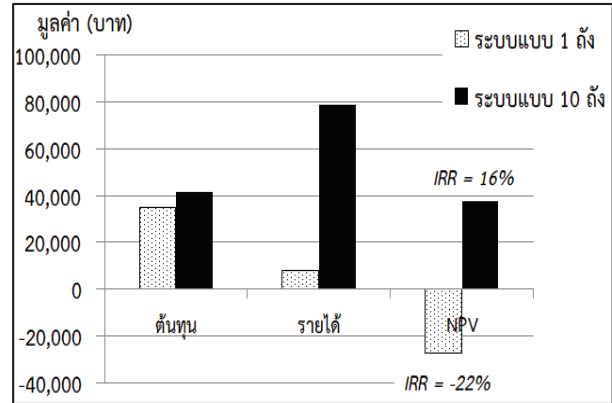


Figure 5 Comparison of investment cost, return and worthiness between 1 tank and 10 tanks microbial fuel cell system

จากผลการทดลองข้างต้นผลตอบแทนทั้งหมดของ
 การลงทุนมาจากการขายคาร์บอนเครดิตซึ่งปริมาณคาร์บอน
 เครดิตที่ผลิตได้จะขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของการบำบัดซี
 โอดี ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงศึกษาแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของ
 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของระบบที่มีผลต่อค่า IRR พบ
 ว่าการเปลี่ยนแปลงค่าประสิทธิภาพตั้งแต่ 76% ถึง 90% ซึ่ง
 สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบได้ เช่น การเดินระบบ
 ด้วยอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ที่เหมาะสม การเปลี่ยน
 วัสดุกรองที่มีพื้นที่ผิวมากขึ้น และอาจทำการเปลี่ยนขั้วไฟฟ้า
 เป็นแท่งแกรไฟต์กึ่งวงหรือผ้าคาร์บอนเคลือบแพลตตินัมเพื่อ
 เพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทอิเล็กตรอนจากสารอินทรีย์ให้ดียิ่ง
 ขึ้น (ภาคภูมิ อัดตสิริลักษณ์, 2554) ผลการประเมินของระบบ
 แบบ 1 ถึงปฏิกรณ์ พบว่าการเพิ่มประสิทธิภาพไม่มีผลทำให้
 เกิดความคุ้มค่าต่อการลงทุนโดยมีค่าระหว่าง IRR -22% ถึง
 -20% ตามความสัมพันธ์ $y = 0.39x - 0.14$ แต่การเปลี่ยนแปลง
 ค่าประสิทธิภาพของระบบแบบ 10 ถึงปฏิกรณ์ตั้งแต่ 76% ถึง
 90% ขึ้นไปทำให้มีความคุ้มค่าในการลงทุนเพิ่มขึ้นถึงค่า IRR
 สูงสุด 22% ตามความสัมพันธ์ $y = 0.14x - 0.33$ ดังที่แสดงใน
 Figure 6

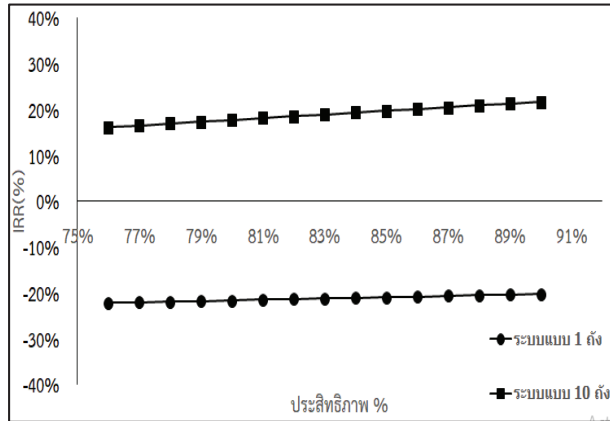


Figure 6 Relationship of Internal Rate of Return (IRR) and Soluble Chemical Oxygen Demand (sCOD) removal efficiency between 1 tank and 10 tanks microbial fuel cell system

จากผลการทดลองที่พบว่าผลตอบแทนจากการกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีมูลค่าน้อยซึ่งไม่มีนัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงความคุ้มค่า ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการประเมินกำลังไฟฟ้าที่ระบบแบบ 1 ถึงปฏิกรณ์ (อัตราการกรอง 16 ลิตร/วัน) ควรผลิตได้เพื่อให้ระบบมีความคุ้มค่าทั้งในกรณีที่รวมและไม่รวมผลตอบแทนจากการขายคาร์บอนเครดิต ดังที่แสดงใน Figure 7 และ 8

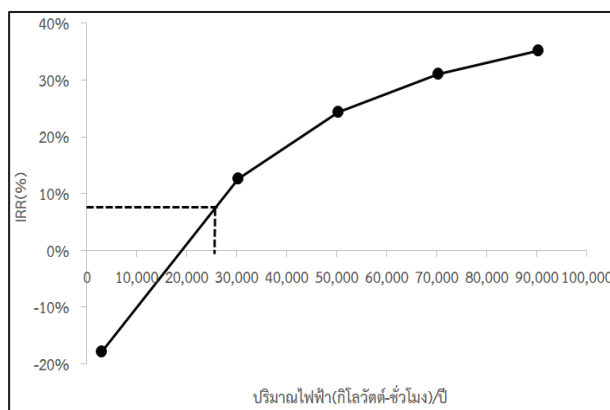


Figure 7 Relationship of Internal Rate of Return (IRR) and electricity production from a microbial fuel cell, not including carbon credit return

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

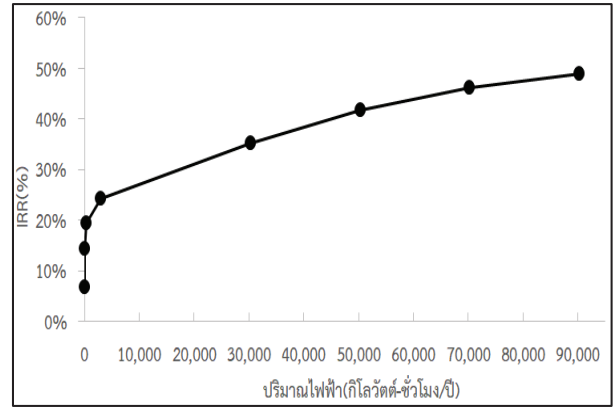


Figure 8 Relationship of Internal Rate of Return (IRR) and electricity production from a microbial fuel cell, including carbon credit return

สรุป

ระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ได้ถูกออกแบบเพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสียร่วมกับการผลิตไฟฟ้าซึ่งทำให้เกิดรายได้จากการขายไฟฟ้าและมีแนวโน้มที่จะใช้เป็นเชื้อเพลิงทางเลือกในอนาคต จึงทำให้เห็นถึงความสำคัญของความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในการลงทุนโดยพิจารณารายได้จากการขายคาร์บอนเครดิตจากการลงทุนระบบเก็บก๊าซชีวภาพเพื่อลดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมร่วมด้วย การประเมินรายได้จากถึงปฏิกรณ์ต้นแบบเพื่อบำบัดน้ำชะขยะพบว่า ถึงปฏิกรณ์ไม่สามารถสร้างรายได้จากการผลิตไฟฟ้าซึ่งได้กำลังไฟฟ้าเพียง 0.03 วัตต์-ชั่วโมง/ถึง/ปี แต่รายได้ทั้งหมดมาจากผลตอบแทนจากการขายคาร์บอนเครดิต โดยถึงปฏิกรณ์จะมีความคุ้มค่าต่อการลงทุนเมื่อเดินระบบที่อัตราการกรองที่สูงขึ้นตั้งแต่ 160 ลิตร/วัน ขึ้นไป ซึ่งจะทำให้ระบบมีมูลค่ากำไร 37,537 บาท และมีผลตอบแทนภายใน 16% ในระยะเวลาเดินระบบ 10 ปี ที่อัตราลด 7.73%

การพัฒนาารบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดเป็นปัจจัยที่ควรพิจารณาเพื่อเพิ่มรายได้จากการผลิตไฟฟ้าและคาร์บอนเครดิต หากประสิทธิภาพการบำบัดชีโอติของระบบเพิ่มขึ้นจะทำให้มีแนวโน้มค่า IRR เพิ่มขึ้น เมื่อเดินระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ที่อัตราการกรอง 160 ลิตร/วัน โดยเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ 90% จะทำให้ค่าผลตอบแทนภายในมีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 22% การพัฒนาเพื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ก็เป็นอีกแนวทางหนึ่งในการเพิ่มความคุ้มค่าต่อการลงทุน หากไม่พิจารณารายได้จากการขายคาร์บอนเครดิตร่วมด้วยพบว่า ระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ที่อัตราการกรอง 16 ลิตร/วัน ควรพัฒนาการผลิตกำลังไฟฟ้าให้ได้ถึง 25,000 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ปี แต่หากพิจารณารายได้จากการขายคาร์บอนเครดิตร่วมด้วยควรพัฒนาการผลิตกำลังไฟฟ้าให้ได้ถึง 3 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/

ปี จากผลการทดลองข้างต้นหากผู้ที่สนใจจะลงทุนระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ในปัจจุบันควรพิจารณาติดตั้งระบบเก็บก๊าซชีวภาพเพื่อเพิ่มรายได้จากการขายคาร์บอนเครดิต รวมถึงการเพิ่มขนาดหรืออัตราการกรองของระบบเพื่อให้ระบบมีความคุ้มค่าต่อการลงทุนมากยิ่งขึ้น แต่ทั้งนี้งานวิจัยที่มีวัตถุประสงค์ในการเพิ่มประสิทธิภาพและการผลิตไฟฟ้าเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อพัฒนาระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ให้เป็นระบบผลิตเชื้อเพลิงทดแทนเชิงพาณิชย์ในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ภายใต้โครงการทุนอุดหนุนงานวิจัยอาจารย์รุ่นใหม่ งบประมาณเงินรายได้ประจำปี 2562 และขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.เพชร เพ็งชัย นางสาวขวัญฤดา พลสมบัติ และ นาวาสงสุภาวดี ศิริประทุม เป็นอย่างสูงที่เอื้อเฟื้อข้อมูลประกอบการทำวิจัยฉบับนี้

เอกสารอ้างอิง

- กันยรัตน์ โหละสุต และคณะ. (2554). *เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ วิศวนาการ การผลิตไฟฟ้าจากน้ำเสีย*. มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ขนิษฐา หมูโสภัญ. (2554). *เซลล์เชื้อเพลิง: แนวทางใหม่เพื่อการผลิตพลังงาน*. มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.
- ขวัญฤดา พลสมบัติ และ สุภาวดี ศิริประทุม. (2560). *ผลของอัตราส่วนช่องว่างชั้นกรองที่มีต่อการบำบัดซีโอไซด์และบีโอดีในน้ำชะขยะด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ที่สร้างจากถังกรองชีวภาพไม่เต็มอากาศแบบไหลขึ้น*. วิทยานิพนธ์คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
- คณะทำงานเพื่อพิจารณากำหนดอายุการใช้งานสินทรัพย์ของ อผศ. (2562). *ปรับปรุงหลักเกณฑ์การคำนวณค่าเสื่อมราคาสินทรัพย์ถาวร*. พ.ศ.2562. จาก <http://www.wvo.thaigov.net/ตารางอายุการใช้งานสินทรัพย์ถาวรของ%20อผศ.pdf>.
- ณิชนันท์ ทองนาถ. (2540). *การศึกษาความเป็นไปได้ในทางเศรษฐศาสตร์ในการนำน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดกลับมาใช้ประโยชน์ในเขตพื้นที่เมืองพัทยา จังหวัดชลบุรี*. ฐานข้อมูลวิทยานิพนธ์ไทย.
- ณัฐวุฒิ คล้ายสงคราม และกันยรัตน์ โหละสุต. (2558). การผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์โดยใช้ต้นกกราชินี. *วิศวกรรมสารมหาวิทยาลัยขอนแก่น*, 42(1), 117-124.

- ณัฐสิริ แสงธรรมธร. (2552). *การผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียโดยใช้เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์*. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- บุญรอด เยาวพฤกษ์. (2562). *ราคาของคาร์บอนเครดิต*. พ.ศ. 2562. ; จาก <http://siamcarbonmarkets.blogspot.com>.
- ภาคภูมิ อัดตสิริลักษณ์. (2554). *ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องเดี่ยวในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียฟาร์มสุก*. วิทยานิพนธ์ 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.ฟป.
- สุจิตรา ศุภร์นิมิต. (2553). *การผลิตกระแสไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องคู่โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลไม่กระป๋อง*. วิทยานิพนธ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อินทอร เข็มมา และณัฐวรรณ รักษา. (2561). *ผลของอัตราส่วนช่องว่างชั้นกรองที่มีต่อการบำบัดฟอสเฟตและซิลิเฟตในน้ำชะขยะด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ที่สร้างจากถังกรองชีวภาพไม่เต็มอากาศแบบไหลขึ้น*. วิทยานิพนธ์คณะวิศวกรรมศาสตร์ 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.