

เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ : เทคโนโลยีนวัตกรรม “แปลงน้ำเสียเป็นไฟฟ้า”

ชลธิศา สุขเกษม*

บทคัดย่อ

เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ (Microbial Fuel Cell: MFC) เป็นเทคโนโลยีใหม่ที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสูง สามารถเปลี่ยนพลังงานที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีไปเป็นกระแสไฟฟ้า โดยไม่ผ่านกระบวนการเผาไหม้ แต่อาศัยกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์กลุ่มเคมีไฟฟ้าแปลงเป็นไฟฟ้าได้โดยตรง จุลินทรีย์กลุ่มนี้สามารถใช้สารตั้งต้นได้หลากหลายชนิด เช่น อะซิเตท แลคเตท กลูโคส ซูโครส และสารประกอบเชิงซ้อนที่อยู่ในน้ำเสีย ซึ่งเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพมีประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียสูงกว่าร้อยละ 90 และผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงถึง 1,000 วัตต์ต่อลูกบาศก์เมตรน้ำเสีย ประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพเกี่ยวข้องกับปัจจัยต่างๆ ได้แก่ แรงดันไฮโดรเจน การสูญเสียความต่างศักย์ไฟฟ้า ขั้วไฟฟ้า (ระยะห่าง พื้นที่ผิว และชนิดของวัสดุ) สารสื่อกลาง คะตะลิสต์ เมมเบรน สารตั้งต้น การเกิดมีเทน ความแรงของไอออน อุณหภูมิ พีเอช อัตราการให้อากาศ และสารประกอบซัลเฟตและไนเตรท เป็นต้น แต่จากรายงานการวิจัยที่ผ่านมา เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพมีข้อจำกัดในด้านราคาของวัสดุ โดยเฉพาะโลหะคะตะลิสต์ ทำให้ไม่สามารถพัฒนาสู่ระดับปฏิบัติการได้ ดังนั้นการคิดค้นออกแบบสิ่งประดิษฐ์เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพใหม่โดยใช้วัสดุทางชีวภาพต้นทุนต่ำ จึงเป็นแนวทางที่ทำการศึกษารวบรวมและพบว่าต้นทุนต่ำลงมากและประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียได้ดี ความเป็นไปได้ในการขยายขนาดเพื่อประยุกต์ใช้ในระดับปฏิบัติการ

คำสำคัญ: เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ กระแสไฟฟ้า บำบัดน้ำเสีย ประสิทธิภาพสูง ต้นทุนต่ำ

*อาจารย์ คณะเทคโนโลยีและการพัฒนาชุมชน มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง อ.ป่าพะยอม จ.พัทลุง 93110

นักวิจัยทุนหลังปริญญาเอก ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ

114 อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย ต.คลองหนึ่ง อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120

นักวิจัย ศูนย์วิจัยพลังงานและสิ่งแวดล้อมยั่งยืน มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง อ.ป่าพะยอม จ.พัทลุง 93110

โทร. 084-2121788 อีเมล: chontisa.s@gmail.com

Microbial Fuel Cell: Novel Technology “Convert Wastewater to Electricity”

Chontisa Sukkasem*

Abstract

Microbial fuel cell (MFC), a novel technology which has high efficiency to treat wastewater is able to convert electrochemical energy to electricity without combustion. It uses biodegradation of exoelectrogen to convert organic matter to electricity directly. This microorganism group can utilize various substrates such as acetate lactate glucose sucrose and complex compound in wastewater. MFC has tremendous power to treat organic waste in water over 90% and create power up to 1,000 W/m³ of wastewater. The factors that affect the MFC performance are hydrogen partial pressure, over potential, electrode (distance, area and material), mediator, catalyst, membrane, substrate, methanogen, ionic strength, temperature, pH, aeration, sulfate and nitrate. However, the expensive cost of MFC materials is a limiting factor that has to be concenter to use the low cost biomaterial instead. Therefore, the new configuration was designed and investigated the performance. It was found that this invention has low cost and high efficiency to treat wastewater which is possible to scale-up for practical application.

Keywords: Microbial fuel cell, Power generation, Wastewater treatment, High efficiency, Low cost

*Lecturer, Faculty of Technology and Community Development, Thaksin University,
Phattalung Campus, Phapayom, Phattalung, 93110.

Post Doctoral Fellowship researcher, National Metal and Materials Technology Center,
114 Thailand Science Park, Phahonyothin Rd, Klong 1, Klong Luong, Pathumthani 12120

Researcher, Sustainable Energy and Environment Research Center, Thaksin University, Phattalung Campus,
Phapayom, Phattalung, 93110.

Phone: 66842121788 Email: chontisa.s@gmail.com

1. บทนำ

ในปัจจุบันแหล่งน้ำมันดิบตามธรรมชาติมีปริมาณลดลงจนไม่เพียงพอต่อความต้องการของมนุษย์ ทำให้มีการคิดค้นหาแหล่งพลังงานใหม่ๆ เพื่อทดแทนน้ำมันดิบ แหล่งพลังงานที่น่าสนใจมากเป็นพิเศษคือของเสีย ซึ่งก่อมลพิษรุนแรงตามอัตราการเพิ่มขึ้นของประชากรโลก และการเติบโตของภาคอุตสาหกรรม สนองความต้องการบริโภคที่มีอย่างไม่จำกัด ทำให้ของเสียเหล่านี้เป็นปัญหาเรื้อรัง เพราะนอกจากจะไม่มีราคาแล้วยังมีต้นทุนในการจัดการอีกด้วย ซึ่งต้นทุนการบำบัดน้ำเสียเพื่อให้ได้น้ำที่มีคุณภาพตามที่กฎหมายกำหนด เป็นสิ่งที่เป็นการระต่อผู้ประกอบการธุรกิจโรงงานแปรรูปผลิตภัณฑ์ต่างๆ เนื่องจากมีการลงทุนสูงและไม่ได้ผลตอบแทนจากการลงทุนในเชิงธุรกิจ ส่งผลให้มีการลักลอบปล่อยน้ำเสียที่ไม่ได้มาตรฐานลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำเสียจากการแปรรูปไบโอดีเซล น้ำมันปาล์ม ยางพารา และอาหารทะเล ซึ่งจัดเป็นน้ำเสียชนิดรุนแรง บำบัดได้ยาก มีความเป็นพิษสูง

ถึงแม้ว่าเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศที่ได้ก๊าซชีวภาพเป็นผลพลอยได้จะเป็นที่นิยมมากก็ตาม แต่ก็ยังมีข้อจำกัดหลายปัจจัย เช่น สภาวะความเป็นกรดต่าง ความเข้มข้นของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ล้วนมีผลต่อการเจริญเติบโต ความแข็งแรง และการอยู่รอดของเชื้อ ซึ่งควบคุมได้ยากและมีความเสี่ยงต่อการล้มเหลวของระบบได้ง่าย นอกจากนี้การปลดปล่อยก๊าซมีเทนสู่บรรยากาศ ยังส่งผลต่อสภาวะโลกร้อนอีกด้วย

เทคโนโลยีใหม่เกี่ยวกับการแปลงของเสียเป็นพลังงานที่กำลังได้รับความสนใจอย่างแพร่หลายคือ “เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ” ซึ่งเป็นถึงปฏิกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีในของเสียไปเป็นกระแสไฟฟ้า โดยไม่ผ่านกระบวนการเผาไหม้ แต่อาศัยกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์กลุ่มเคมีไฟฟ้าแปลงเป็นไฟฟ้าได้โดยตรง จุลินทรีย์กลุ่มนี้สามารถใช้สารตั้งต้นได้หลากหลายชนิด เช่น อะซิเตท แลคเตท กลูโคส ซูโครส และสารประกอบเชิงซ้อนที่อยู่ในน้ำเสียซึ่งเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพมีประสิทธิภาพการย่อย

สารอินทรีย์ในน้ำเสียสูงกว่าร้อยละ 90 (Charity, 2008) ทำให้เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ สามารถผลิตบำบัดน้ำเสียไปพร้อมๆ กับการผลิตกระแสไฟฟ้า

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของระบบบำบัดแบบใช้อากาศ ไม่ใช้อากาศและแบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ

ระบบบำบัดน้ำเสีย	ข้อดี	ข้อเสีย
ใช้อากาศ	ใช้เวลาในการบำบัดสั้น	<ul style="list-style-type: none"> เกิดตะกอนจุลินทรีย์จำนวนมาก เสียค่าใช้จ่ายสูงในการให้อากาศ ใช้ได้เฉพาะน้ำเสียความเข้มข้นต่ำ
ไม่ใช้อากาศ	ได้ก๊าซชีวภาพ	<ul style="list-style-type: none"> ใช้เวลาในการบำบัดนาน อ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม เกิดก๊าซพิษพวกไฮโดรเจนซัลไฟด์
เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ	<ul style="list-style-type: none"> ใช้เวลาในการบำบัดสั้น ได้กระแสไฟฟ้า เกิดตะกอนจุลินทรีย์ต่ำ ใช้ได้กับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูง บำบัดสารพิษได้ดี มีความเสถียรสูง การบำรุงรักษาต่ำ 	<ul style="list-style-type: none"> เงินลงทุนสร้างระบบครั้งแรกสูง เสียค่าใช้จ่ายสูงในการให้อากาศ

ที่ผ่านมานักวิจัยหันมาสนใจปรับปรุงรูปแบบและการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ โดยไม่อาศัยสารช่วยรับส่งอิเล็กตรอน สารเร่งปฏิกิริยาหรือ เนื้อเยื่อเลือกผ่าน เพื่อลดต้นทุนค่าวัสดุ และเพิ่มกำลังการผลิตกระแสไฟฟ้าควบคู่กันไป (Behera et al., 2010; Cheng, 2006; Cheng, 2007; Deng, 2010; Du, 2008; He, 2005; Hu et al., 2008; Jang, 2004; Kim, 2002; Lee, 2007; Liu, 2005; Liu and Logan, 2004; Moon, 2006; Rabaey, 2005b; Sukkasem, 2009; Sun, 2009; Zeikus, 2007) ทำให้เกิดแนวความคิดในการพัฒนาและประดิษฐ์เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพโดยใช้วัสดุทางชีวภาพที่หาได้ในประเทศและมีราคาถูกกว่าต่างประเทศมากมาทดแทนวัสดุตั้งที่กล่าวไปแล้วข้างต้น

2. เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ

ข้อดีของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่เหนือกว่าเทคโนโลยีอื่นในปัจจุบัน (ตารางที่ 1) ใช้ในการผลิตพลังงานจากสารอินทรีย์ คือ มีประสิทธิภาพสูงในการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นกระแสไฟฟ้า สามารถทำงานได้ในช่วงอุณหภูมิกว้าง ไม่ต้องอาศัยการบำบัดก๊าซเพราะก๊าซที่ปลดปล่อยมีองค์ประกอบหลักคือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่านั้น และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในพื้นที่ที่ขาดแคลนไฟฟ้าได้

อย่างไรก็ตามการประยุกต์ใช้เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพมีข้อจำกัดที่สำคัญ คือส่วนประกอบที่จำเป็นต่อการผลิตกระแสไฟฟ้ามีราคาสูงมากจนไม่สามารถพัฒนาสู่ภาคอุตสาหกรรมได้ ได้แก่ วัสดุกราไฟต์ที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้า สารเร่งปฏิกิริยา สารสื่อกลาง รวมถึงเนื้อเยื่อเลือกผ่าน

Jang (2004) รายงานว่า เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพชนิดไม่ใช้เยื่อเลือกผ่านและสารสื่อกลางนั้นได้ค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากระบบยังป้องกันการแพร่ผ่านของออกซิเจนจากขั้วบวกมายังขั้วลบได้ไม่ดีนัก และยังต้องการสารสื่อกลาง หรือสารเร่งปฏิกิริยา เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ ดังนั้นการลดพื้นที่การแพร่ผ่านของออกซิเจนโดยไม่ใช้เนื้อเยื่อเลือกผ่าน และเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพโดยการตรึงจุลินทรีย์บนขั้วไฟฟ้าเพื่อทำหน้าที่เป็นสารเร่งปฏิกิริยาชีวภาพ จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ เพราะนอกจากจะสามารถลดต้นทุนค่าวัสดุแล้ว ยังไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

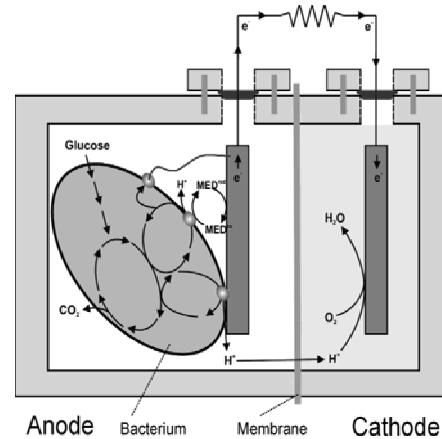
โปรตอนและอิเล็กตรอนจะถูกส่งไปในส่วนของขั้วบวก โดยที่โปรตอนจะเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรน และอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากขั้วลบไปตามวงจรไฟฟ้า (External circuit) ไปยังส่วนของขั้วบวกที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงกว่า ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น (รูปที่ 1) ซึ่งในส่วนของขั้วบวกจะมีตัวรับอิเล็กตรอน (electron acceptor) เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ขึ้น โดยทั่วไปจะใช้ ออกซิเจนเป็นตัวรีดิวส์ ดังสมการที่ (1) โปรตอนที่เคลื่อนมาพบกับอิเล็กตรอนและออกซิเจนที่ขั้วบวก จะเกิด ปฏิกิริยาต่อกัน

กลายเป็นน้ำในที่สุด (Oh, 2005) ซึ่งเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม



2.1 จุลินทรีย์กลุ่มไฟฟ้าเคมีที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ

เป็นที่ทราบกันดีว่าจุลินทรีย์ที่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้มาเกือบร้อยปีแล้ว แต่เพิ่งไม่นานมานี้ที่มีการศึกษาเกี่ยวกับแหล่งพลังงานในใหม่นี้อย่างจริงจัง มีการค้นพบเกี่ยวกับสรีรวิทยาของจุลินทรีย์กลุ่มนี้ว่าสามารถส่งอิเล็กตรอนออกมาภายนอกเซลล์ได้เองโดยไม่ต้องใช้สารที่เป็นสื่อ เช่น *Shewanella* และ *Geobacter* จุลินทรีย์ทั้งสองชนิดนี้มี nanowires เป็นจำนวนมาก ดังนั้นเซลล์ที่ไม่ได้สัมผัสขั้วไฟฟ้าก็สามารถถ่ายโอนอิเล็กตรอนผ่านทาง nanowires ได้ โดยที่ nanowires ของ *Geobacter sulfurreducens* มีลักษณะเป็นเส้นบางและยาว ในขณะที่ *Shewanella onedensis* MR-1 จะมีลักษณะเป็นเส้นใหญ่คล้ายสายเคเบิล ซึ่งมีการรวมตัวกันของ pilus สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้รวดเร็วและเป็นจำนวนมาก แล้วส่งผ่าน nanowires ที่สัมผัสพื้นผิวขั้วไฟฟ้าและเซลล์อื่นๆ



รูปที่ 1 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ

ที่มา : Logan และคณะ (Logan, 2006)

2.2 การสร้างอิเล็กตรอนโดยจุลินทรีย์

จุลินทรีย์มีกระบวนการสร้างสารตั้งต้นของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพสองตัวหลักที่สำคัญคือ อิเล็กตรอนและโปรตอนผ่านขั้นตอนการถ่ายทอดอิเล็กตรอนในกระบวนการหายใจระดับเซลล์

การถ่ายทอดอิเล็กตรอน หรือถูกใช้การหายใจเกิดขึ้นที่เยื่อหุ้มเซลล์หรือเซลล์เมมเบรน จะเกิดควบคู่กันไปทุกชั้นตอน โดยมีไฮโดรเจนเกิดขึ้นในทุกกระบวนการ ไฮโดรเจนจะถูกส่งเข้าสู่กระบวนการถ่ายทอดอิเล็กตรอนทันที อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากสารที่มีศักย์ไฟฟ้า (E^0) ต่ำไปยังสารที่มีศักย์ไฟฟ้าสูง ในการสังเคราะห์ ATP อิเล็กตรอนที่หลุดออกจากโมเลกุลของสารอาหารจะมีความรับอิเล็กตรอน เรียกว่า ตัวนำอิเล็กตรอน แล้วถ่ายทอดไปยังตัวนำอิเล็กตรอนตัวอื่นขณะที่มีการถ่ายทอดอิเล็กตรอน จะมีพลังงานปล่อยออกมาจากอิเล็กตรอน (ตารางที่ 2) พลังงานเหล่านั้นนำไปสังเคราะห์ ATP กระบวนการนี้จึงเกี่ยวข้องกับสาร 2 ประเภท คือ สารที่เป็นตัวนำอิเล็กตรอน (mediator) และสารที่เป็นตัวรับพลังงานจากการถ่ายทอดอิเล็กตรอน

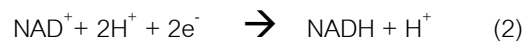
ตารางที่ 2 มาตรฐานศักย์ไฟฟ้ารีดอกซ์ของครึ่งปฏิกิริยา

ปฏิกิริยาที่	ครึ่งปฏิกิริยา	E^0 (mV)
1	Acetate+CO ₂ +2H ⁺ +2e ⁻ →pyruvate	-700
2	Acetate+2H ⁺ +2e ⁻ →acetaldehyde	-600
3	Ferredoxin-Fe ³⁺ +1e ⁻ → Ferredoxin-Fe ²⁺	-432
4	2H ⁺ +2e ⁻ →H ₂	-420
5	NAD ⁺ +2H ⁺ +2e ⁻ →NADH+H ⁺	-320
6	NADP ⁺ +2H ⁺ +2e ⁻ →NADPH+H ⁺	-320
7	S+2H ⁺ +2e ⁻ →H ₂ S	-274
8	SO ₄ ²⁻ +10H ⁺ +8e ⁻ → H ₂ S+4H ₂ O	-220
9	Pyruvate+2H ⁺ +2e ⁻ →lactate	-190
10	FAD+2H ⁺ +2e ⁻ →FADH ₂	-180
11	Oxaloacetate+2H ⁺ +2e ⁻ →malate	-175
12	Acetaldehyde+2H ⁺ +2e ⁻ →ethanol	-163
13	Fumarate+2H ⁺ +2e ⁻ →succinate	30
14	Cytochrome b-Fe ³⁺ +1e ⁻ →cytochrome b-Fe ²⁺	75
15	Ubiquinone+2H ⁺ +2e ⁻ → Ubiquinone-H ₂	100
16	Cytochrome c-Fe ³⁺ +1e ⁻ →cytochrome c-Fe ²⁺	254
17	NO ₃ ⁻ +2H ⁺ +2e ⁻ →NO ₂ ⁻ +H ₂ O	421
18	NO ₂ ⁻ +8H ⁺ +6e ⁻ → NH ₄ ⁺ +2H ₂ O	440
19	Cytochrome a ₃ -Fe ³⁺ +1e ⁻ →cytochrome a ₃ -Fe ²⁺	550
20	Fe ³⁺ +e ⁻ → Fe ²⁺	771
21	O ₂ +4H ⁺ +4e ⁻ →2H ₂ O	840

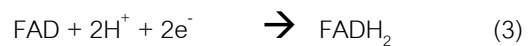
สภาวะมาตรฐาน: 25°C และ pH 7.0

ที่มา: ดัดแปลงจาก (Rabaey, 2005b) และ (Erickson, 1988)

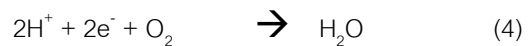
ในการสลายโมเลกุลของสารอินทรีย์ อิเล็กตรอนจะหลุดออกมาจากโมเลกุลของสารพร้อมด้วยโปรตอนในรูปอะตอมของไฮโดรเจน สารตัวนำอิเล็กตรอนบางชนิดสามารถรับอิเล็กตรอนพร้อมด้วยโปรตอน แต่ตัวนำอิเล็กตรอนบางชนิดรับเฉพาะอิเล็กตรอน ไม่ว่าจะเป็นการรับในรูปของอะตอมไฮโดรเจนหรือรับเฉพาะอิเล็กตรอนก็ตาม การรับอิเล็กตรอนทำให้ตัวอิเล็กตรอนถูกรีดิวซ์ เช่น สารที่เป็นตัวนำอิเล็กตรอน คือ นิโคตินาไมด์ อะดีนีน ไดนิวคลีโอไทด์ (NAD⁺) สามารถรับได้ทั้งโปรตอนและอิเล็กตรอน ดังสมการที่ (2)



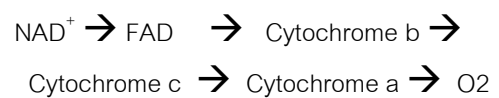
ฟลาวิ น อะดีนีน ไดนิวคลีโอไทด์ (FAD) รับได้ทั้งโปรตอนและอิเล็กตรอน ดังสมการที่ (3)



ระบบไซโตโครม (Cytochrome) ทั้งหมดรับได้เฉพาะอิเล็กตรอน โดยเฉพาะออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายแล้วเกิดเป็นน้ำขึ้น ดังสมการที่ (4)



ตัวกลางรับและถ่ายทอดอิเล็กตรอนในกระบวนการถ่ายทอดอิเล็กตรอน เรียงตามลำดับ คือ



3. การคำนวณกำลังไฟฟ้า

โดยทั่วไปกำลังไฟฟ้าที่ได้จะแสดงในหน่วยกำลังไฟฟ้าต่อพื้นที่ผิวของขั้วแอโนด และกำลังไฟฟ้าต่อหน่วยปริมาตรของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ นอกจากนี้ยังต้องแสดงค่า coulombic efficiency ประสิทธิภาพการผลิตพลังงานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ ค่า coulombic efficiency บ่งบอกถึงประสิทธิภาพในการถ่ายทอดอิเล็กตรอนที่ได้จากสารตั้งต้นสู่ขั้วไฟฟ้าแล้วได้เป็นพลังงานออกมา เป็นการอธิบายถึงอัตราการเปลี่ยนอิเล็กตรอนทั้งหมดในสารอินทรีย์ตั้งต้นเป็นไฟฟ้านั่นเอง ค่า coulombic efficiency คำนวณจากจำนวนอิเล็กตรอนที่ถ่ายทอดไปยังอิเล็กโทรดและผลิตกำลังไฟฟ้าสัมพันธ์กับจำนวนอิเล็กตรอนทั้งหมดใน

สารอินทรีย์ตั้งต้นที่ได้จากการคำนวณ ประสิทธิภาพของการผลิตกระแสไฟฟ้าจะแสดงในรูปของความต่างศักย์ไฟฟ้าและ (Rabaey, 2005b) กำลังไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพเกิดจากทั้งกระบวนการทางชีวเคมีและเคมีไฟฟ้า ค่าของพลังงาน (จูล) คำนวณได้จากกระบวนการไฟฟ้าเคมีดังสมการที่ (5)

$$E = P \cdot t, \quad (5)$$

เมื่อ P คือ กำลังไฟฟ้า (Watts) และ t คือ เวลา (s)

กำลังไฟฟ้าขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า

ดังสมการที่ (6) และ (7) ตามลำดับ

$$P = V \cdot I \quad (6)$$

$$V = I \cdot R \quad (7)$$

เมื่อ R คือ ความต้านทาน (Ohms)

ดังนั้นถ้าค่าความต้านทานที่วัดได้สูง ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพจะต่ำกว่าค่าที่ควรจะเป็น ในทางปฏิบัติ ค่าศักย์ไฟฟ้าเมื่อไม่ต่อวงจรไฟฟ้า (วัดศักย์ไฟฟ้าเมื่อไม่มีกระแสไหลผ่านวงจรไฟฟ้า)จะอยู่ที่ 750–800 mV การแปลงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า Pd (W/m²) คำนวณได้ดังสมการ (8)

$$Pd = IV/A \quad (8)$$

เมื่อ I (A) คือกระแสไฟฟ้า

V (V) คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า

และ A (m²) คือ พื้นที่หน้าตัดของขั้วแอโนด

สำหรับค่า Coulombic efficiency คำนวณดังสมการ (9)

$$CE = Cp/CTi \cdot 100\%, \quad (9)$$

เมื่อ Cp (C) คือ ค่า total Coulombs คำนวณโดยการรวมสะสมของค่าของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นตลอดเวลา

CTi (C) คือ ค่าของ Coulombs ที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎี ที่เกิดจากการผลิตจากน้ำเสีย

(i = w) หรือกลูโคส (i = g) คำนวณโดยใช้สูตร ดังสมการที่ (10)

$$C_{Ti} = Fb_i S_i v / M_i \quad (10)$$

เมื่อ F คือ ค่าคงที่ของ Faraday (96,485 C/mol ของอิเล็กตรอน),

bi คือ จำนวนของโมลอิเล็กตรอนที่ผลิตได้ต่อโมลของสารตั้งต้น ($b_w = 4, b_g = 24$),

S_i (g/L) คือความเข้มข้นของสารตั้งต้น

v (L) คือ ปริมาตรของสารละลาย

M_i คือ น้ำหนักโมเลกุลของสารตั้งต้น ($M_w = 32, COD \text{ basis}; M_g = 180$)

4. ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ

4.1 แรงดันของไฮโดรเจน (Hydrogen partial pressure)

แรงดันไฮโดรเจนในของเหลวเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญที่ส่งผลต่อการผลิตไฮโดรเจน ที่แรงดันไฮโดรเจนต่ำ ($P_{H_2} < 60 \text{ Pa}$), ทิศทางการเกิดปฏิกิริยาเป็นการออกซิเดชันของ NADH ได้เป็นไฮโดรเจน สารไพรูเวทสามารถเกิดจากหลายกระบวนการ ส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับกระบวนการ Embden- Meyerhoff-Parnas (หรือ glycolysis) หรือ Entner-Doudoroff pathways ทั้งสองกระบวนการจะเปลี่ยนเฮกโซสให้เป็น ไพรูเวท 2 โมล และ NADH 2 โมล ดังนั้นหลังแบคทีเรียใช้เอนไซม์ pyruvate:ferredoxin oxidoreductase ย่อยเฮกโซส จะได้ไฮโดรเจน 2 โมลต่อโมลเฮกโซส หากยังคงรักษาแรงดันไฮโดรเจนได้ต่ำเพียงพอ NADH จะถูกเปลี่ยนไปเป็นไฮโดรเจนเท่านั้น (ที่สภาวะที่ดีที่สุดจะได้ 2 โมลไฮโดรเจนต่อโมลเฮกโซส) สำหรับที่แรงดันไฮโดรเจนสูง ($P_{H_2} > 60 \text{ Pa}$), NADH อาจจะถูกออกซิไดส์ผ่านกระบวนการอื่นๆ เช่น การสร้างบิวทีเรท ดังนั้นที่แรงดันไฮโดรเจนสูงจะมีการสร้างไฮโดรเจนต่ำ (Angenent, 2004)

4.2 การสูญเสียความต่างศักย์ไฟฟ้า

การสูญเสียความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของกระแส ไฟฟ้าที่ไหลผ่านขั้วลบ คุณสมบัติทางเคมีไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้า การมีอยู่ของสารที่ส่อกลางและอุณหภูมิต่ำ (Rabaey, 2005b) ความต่างศักย์ไฟฟ้าอาจมีการสูญเสียในระหว่างการขนส่งอิเล็กตรอนผ่านตัวต้านทานภายนอกและภายใน ซึ่งความต้านทานภายในมักเกิดจากกระบวนการถ่ายเทอิเล็กตรอนจากตัวจุลินทรีย์สู่ขั้วไฟฟ้า การสูญเสียอิเล็กตรอนที่เกิด ขึ้นในกระบวนการขนส่งอิเล็กตรอนในเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ โดยที่มีการ

สูญเสียในขั้นตอนต่างๆ คือ (1) การถ่ายทอดอิเล็กตรอน จากตัวจุลินทรีย์ (2) ความต้านทานของสารอิเล็กโทรไลต์ (3) ขั้วลบ (4) เมมเบรน (5) ขั้วบวก และ (6) การรับอิเล็กตรอนโดยออกซิเจน ซึ่งต้องพิจารณาให้เหมาะสมจึงจะทำให้ได้พลังงานไฟฟ้าที่มากเพียงพอต่อการใช้งาน เช่น การปรับให้ขั้วลบและขั้วบวกเข้าใกล้กันที่สุดเท่าที่จะทำได้ อย่างไรก็ตามการสูญเสียค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นอยู่กับความต้านทานภายนอกเป็นหลัก ซึ่งถือเป็นข้อจำกัดที่ต้องพิจารณาให้เหมาะสม

4.3 ขั้วไฟฟ้า

4.3.1 ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า

การลดความต้านทานภายในของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพสามารถทำได้โดยการลดระยะห่างระหว่างขั้วลบและขั้วบวก และการเลือกวัสดุที่เหมาะสม (Liu, 2005) (Rabaey, 2005a) พบว่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าสูงสุดเพิ่มขึ้นจาก 720 เป็น 1,210 มิลลิวัตต์ต่อตารางเมตร เมื่อระยะห่างระหว่างขั้วลบและขั้วบวกลดลงจาก 4 เป็น 2 ซม. ที่ความแรงไอออนต่ำ (100 mM) ซึ่งการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นของพลังงานนี้สอดคล้องกับการลดลงของความต้านทานภายใน

4.3.2 พื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้า

Oh และคณะ (2004) รายงานว่าพลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นร้อยละ 24 เมื่อพื้นที่ผิวขั้วบวกเพิ่มขึ้นจาก 22.5 เป็น 67.5 ตารางเซนติเมตร และลดลงร้อยละ 56 เมื่อพื้นที่ผิวขั้วบวกลดลงเหลือ 5.8 ตารางเซนติเมตร นอกจากนี้ (Logan, 2006) พบว่าอัตราส่วนของพื้นที่ผิวขั้วลบต่อขั้วบวกของถังปฏิกรณ์อยู่ในช่วง 2:1-10:1 อัตราส่วนพื้นที่ผิวทั้งหมดของขั้วลบต่อปริมาณรวมของถังปฏิกรณ์สามารถอยู่ในช่วง 500:1-50:1 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร อย่างไรก็ตามการลดข้อจำกัดของพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้าทำให้ได้พลังงานมากขึ้น เช่นเดียวกับการเติมสารสื่ออิเล็กตรอนหรือ เพิ่มออกซิเจนละลายน้ำในช่องขั้วบวก

4.3.3 วัสดุขั้วไฟฟ้า

การใช้วัสดุขั้วไฟฟ้าที่ทำงานได้ดีสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพให้ดีขึ้น (Kumwachara K., 2010) เพราะวัสดุขั้วลบที่แตกต่างกัน

มีผลกระตุ้นให้เกิดโพลาริเซชันที่แตกต่างกัน มีวัสดุหลายชนิดที่ถูกนำมาใช้เป็นขั้วลบ เช่น แท่งกราไฟท์ ผ้าย่านคาร์บอน กระดาษคาร์บอน และแผ่น กราไฟท์ (Oh, 2004) นอกจากนี้ Liu (2005) ทำการศึกษาผลของวัสดุที่ใช้เป็นขั้วบวกโดยใช้ผ้าย่านคาร์บอนเป็นขั้วไฟฟ้าแทนกระดาษคาร์บอน ผลการศึกษาพบว่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าสูงสุดเพิ่มขึ้นจาก 660 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร (0.22 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร) เป็น 1,114 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร (0.33 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร) หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 69 ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

มีรายงานการใช้ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) เป็นขั้วไฟฟ้า (Jiang, 2011; Jiang, 2010; Jiang, 2009; Li, 2010) เนื่องจากถ่านกัมมันต์ หรือ Activated carbon เป็นธาตุคาร์บอนบริสุทธิ์ ซึ่งมีการจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอมแตกต่างจากรูปแบบอื่นๆ เช่น เพชร หรือกราไฟต์ คุณสมบัติหลักๆ ของ Activated carbon คือนำไฟฟ้าได้ มีรูพรุนสูงและมีคุณสมบัติในการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ต่างๆ ที่มีอยู่ในของเหลว หรือก๊าซเอาไว้ได้ในปริมาณสูง จึงนำไปใช้ประโยชน์ได้มากมาย การผลิต Activated carbon จะใช้วัตถุดิบจากอินทรีย์วัตถุต่างๆ กัน เช่น ถ่านไม้ เปลือกถั่วเมล็ดแข็ง กะลามะพร้าว หรือกระดูกสัตว์ ที่เอามาเผาเป็นถ่าน และทำการ Activate ภายใต้อุณหภูมิสูงและไอน้ำในสภาวะปราศจากออกซิเจน เพื่อเป็นการกำจัดสารประกอบต่างๆ ที่ยังหลงเหลืออยู่ให้มีเพียงคาร์บอนบริสุทธิ์อย่างเดียว และเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดซับให้มากที่สุด ในหนึ่งกรัมของ Activated carbon มีพื้นที่ผิวถึง 400-1200 ตารางเมตร (คอร์เทนนีสมีขนาดประมาณ 260 ตารางเมตร)

นอกจากนี้ยังมีรายงานการใช้แปรงคาร์บอน (carbon fiber brush) เป็นขั้วไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ การใช้แปรงคาร์บอนเป็นขั้วไฟฟ้าทำให้จุลินทรีย์สามารถยึดเกาะขั้วไฟฟ้าได้มากขึ้น เนื่องจากแปรงคาร์บอนมีพื้นที่ผิวในการยึดเกาะมากถึง 300-1,500 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับกระดาษคาร์บอน และให้พลังงานมากกว่าถึงสองเท่า เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ขั้วไฟฟ้ารูปแบบอื่นๆ ทำให้มีความ

เป็นไปได้ที่จะทำให้เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ในอัตราที่สูง นอกจากนี้การใช้แปรงคาร์บอนเป็นขั้วไฟฟ้าสามารถเพิ่มพื้นที่การไหลเวียนในระบบและถ่ายเทได้มากขึ้น ทำให้ระบบไม่อุดตัน สามารถใช้งานได้นานขึ้น และประสิทธิภาพในการทำงานไม่ลดลง (Cheng et al., 2010; Feng, 2010; Feng, 2011) ล่าสุด Feng และคณะ (Feng, 2011) รายงานว่า การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องเดียว ซึ่งใช้สารละลายฟอสเฟตบัพเฟอร์เป็นอิเล็กโทรไลต์ ให้ค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจาก 778 ± 67 เป็น $1,310 \pm 15$ มิลลิวัตต์ต่อตารางเมตร เมื่อใช้ผ้าคาร์บอน (มีพื้นที่ผิว 0.35 มิลลิกรัมต่อตารางเมตร) เป็นขั้วคาโทด และแปรงคาร์บอนเป็นขั้วขั้วแอโนดตามลำดับ

4.4 สารสื่อกลาง (mediator)

เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่ใช้จุลินทรีย์ทั่วไปจะต้องการสารสื่อกลางในการถ่ายโอนอิเล็กตรอนจากระบบการถ่ายโอนอิเล็กตรอนของเชื้อจุลินทรีย์ไปยังขั้วไฟฟ้า (Kim et al., 2005; Tanaka, 1983) Tanaka และคณะ (1983) พบว่าประจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในเซลล์เชื้อเพลิงชีวรูปที่มีสารสื่อกลางผสมระหว่างสารประกอบเฟอร์ริกกับไทโอนินเมื่อเปรียบเทียบกับเซลล์เชื้อเพลิงที่มีสารสื่อกลางชนิดเดียว Mn^{4+} ที่อยู่ในขั้วลบทำให้เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่ใช้ anodophilic *Shewanella putrefaciens* มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น (Park, 2002)

4.5 ค่ะตะลิสต์

แพลทตินัม (Platinum : Pt) เป็นโลหะค่ะตะลิสต์เร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันที่มีประสิทธิภาพดีกว่ากราฟไฟท์ แผ่นกราฟไฟท์ และผ้าคาร์บอน นำมาทำเป็นขั้วขั้วลบและขั้วบวก แต่มีค่าใช้จ่ายสูง เซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่ใช้วัสดุเคลือบแพลทตินัมเป็นขั้วไฟฟ้าจะมีความหนาแน่นไฟฟ้าสูงกว่าเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ หากไม่ได้ใช้แพลทตินัมเป็นขั้วบวกพลังงานจะลดลงร้อยละ 78 (Rabaey, 2005a) นอกจากนี้ยังมีค่ะตะลิสต์อื่นๆ เช่น CoTMPP, Mn (IV)

และ Fe (III) เดิมในขั้วบวกทำให้กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น (Cheng, 2006)

4.6 เมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton exchange membrane: PEM)

โดยปกติแล้วขั้วไฟฟ้าลบและบวกจะถูกแยกออกจากกันโดยเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน ซึ่งจะยอมให้มีการถ่ายโอนของโปรตอนจากขั้วลบไปยังขั้วบวก และช่วยป้องกันการแพร่ของออกซิเจนเข้าไปในช่องขั้วลบ อย่างไรก็ตามเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน เช่น Nafion มีราคาแพง Liu และ Logan (2004) ได้ทำการออกแบบและสร้างเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ผ้าคาร์บอนและมืออากาศในขั้วบวก ทำให้ความหนาแน่นของพลังงานเพิ่มขึ้นได้โดยไม่ต้องใช้เมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน ผลการศึกษาพบว่าเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่ไม่ใช้เมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนมีกำลังไฟฟ้าสูงสุดถึง 494 มิลลิวัตต์ต่อตารางเมตร และกระแสไฟฟ้า 0.86 มิลลิแอมแปร์ (465 โอห์ม) เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่มีเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนมีกำลังไฟฟ้า 262 มิลลิวัตต์ต่อตารางเมตร และกระแสไฟฟ้า 0.92 มิลลิแอมแปร์ (218 โอห์ม)

4.7 อัตราการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของสารตั้งต้น

อัตราการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของสารตั้งต้นก็มีผลต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ ซึ่งขึ้นกับชนิดของสารตั้งต้น ปริมาณของจุลินทรีย์ภายในเซลล์ จลนพลศาสตร์ของ จุลินทรีย์ ปริมาณออกซิเจน รวมถึงอัตราการบรรจุทุก (Organic Loading Rate : OLR) และระยะเวลาเก็บกักน้ำเสียในระบบ (Hydraulic Retention Time : HRT) (Rabaey et al., 2003) ที่เหมาะสมต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ จะช่วยให้สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าและบำบัดสารอินทรีย์ได้ดี

4.8 การเกิดก๊าซมีเทน

การผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากน้ำเสียเกิดจากการบำบัดแบบไม่ใช้แสง (Logan, 2002; Zhang, 2003) การสร้างก๊าซไฮโดรเจนด้วยกระบวนการทางชีวภาพต้องใช้ทรัพยากรร่วมจากการผลิตก๊าซมีเทนในระบบหมักแบบไร้อากาศ ซึ่งเป็นการทำงานแบบผสมผสานของจุลินทรีย์

สองกลุ่มในสองกระบวนการทางชีวเคมี ดังนั้นการยับยั้งการใช้ทรัพยากรร่วมจึงมีความสำคัญ การสร้างไฮโดรเจนต้องยับยั้งกลุ่มที่ใช้ไฮโดรเจน เช่น กลุ่ม homoacetogens และกลุ่ม methanogens

Methanogenesis เป็นปัจจัยหนึ่งในการพิจารณาประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ ในระบบไร้อากาศไฮโดรเจนถูกใช้ในการผลิตก๊าซมีเทนโดย hydrogenotrophic methanogens (Angenent, 2004; Rabaey, 2005a) หากในเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพมีความเข้มข้นของอะซิเตทสูงและสภาพไร้อากาศจะส่งเสริมการผลิตก๊าซมีเทนในช่องขั้วลบ เกิดการสูญเสียสารตั้งต้นจาก methanogenesis methanogens มีการเจริญเติบโตและผลิตก๊าซมีเทนในสภาพแวดล้อมที่มีศักย์ไฟฟ้าน้อยกว่า -330 มิลลิโวลต์ (He, 2005) เราสามารถขัดขวาง methanogen ได้โดยควบคุมปัจจัยด้านสภาพแวดล้อม เช่น pH และอุณหภูมิ

4.9 ความแรงของไอออน

Liu และคณะ (2005) ทำการศึกษาผลของความแรงไอออน (IS) โดยการเพิ่มโซเดียมคลอไรด์ในการผลิตกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องเดียว ที่ความแรงไอออน 100, 200, 300 และ 400 มิลลิโมลาร์ ผลการศึกษาพบว่ากำลังสูงสุด 720 มิลลิวัตต์ต่อตารางเมตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0.26 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ใช้สารละลายที่มีความแรงไอออน 100 มิลลิโมลาร์ นอกจากนี้ผลของความแรงไอออนต่อประสิทธิภาพการทำงานของขั้วลบและขั้วบวกถูกตรวจสอบโดยการวางขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเข้าไปในช่องขั้วลบ พบว่าขั้วลบมีประสิทธิภาพการทำงานลดลง ในขณะที่ขั้วบวกมีประสิทธิภาพการทำงานเพิ่มขึ้น ทำให้ความต้านทานภายในมีการปรับตัวลดลงเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความแรงไอออน

4.10 อุณหภูมิ

เป็นที่ทราบกันดีว่าอุณหภูมิมิมีผลต่อกิจกรรมของแบคทีเรีย (Liu, 2005) ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิที่ 20 และ 32 องศาเซลเซียส ในการผลิตกระแสไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องเดียว พบว่าความหนาแน่น

กำลังไฟฟ้าสูงสุดลดลงเหลือ 660 มิลลิวัตต์ต่อตารางเมตร (ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0.22 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร, 200 โอห์ม) เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพทำงานที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ซึ่งน้อยกว่าที่อุณหภูมิ 32 องศาเซลเซียส เพียงร้อยละ 9 เท่านั้น (720 มิลลิวัตต์ต่อตารางเมตร) อย่างไรก็ตามที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูง (มากกว่า 0.24 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร) ทำให้ศักย์ไฟฟ้าของขั้วบวกที่ 20 องศาเซลเซียส มีค่าต่ำกว่าที่ 32 องศาเซลเซียส

Shin และคณะ (2004) รายงานว่าการผลิตไฮโดรเจนจากเศษอาหารโดยการเพาะเลี้ยง mesophilic และ thermophilic acidogenic เป็นเวลา 5 วัน ก๊าซชีวรูปที่ผลิตได้จาก thermophilic acidogenic เป็นก๊าซมีเทนอิสระ ทุกความเข้มข้นของ VS และพีเอชที่ใช้ทดสอบ ปริมาณการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจาก thermophilic acidogenic จะสูงกว่า mesophilic ทุกพีเอชที่ทำการทดสอบ

4.11 พีเอช

Gil และคณะ (Tayhas, 1999) ทำการศึกษาผลของพีเอชต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ พบว่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่พีเอช 7-8 และมีค่าลดลงที่พีเอช 9 และต่ำกว่า 6 อย่างไรก็ตาม Ginkel และ Logan [54] รายงานว่าค่าพีเอชที่เหมาะสมในการผลิต H_2 คือพีเอช 5.5 จะมีผลต่อรูปแบบของกรดที่ผลิตในระหว่างการผลิตไฮโดรเจน ความเข้มข้นของกรดอะซิติก หรือกรดบิวทิริกในรูปที่ไม่แตกตัวจะเกิดที่พีเอช 4.5 มากกว่าที่พีเอช 5.5 ดังนั้นกรดรูปแบบที่ไม่แตกตัวที่มีมากที่พีเอชต่ำจะทำให้เกิดการยับยั้งการผลิตไฮโดรเจน

4.12 อัตราการให้อากาศ

Gil และคณะ (Tayhas, 1999) ทำการศึกษาผลของอัตราการให้อากาศที่ 100-200 มิลลิลิตรต่อนาที ต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่ไม่มีสารสื่อกลาง พบว่าค่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นที่อัตราการให้อากาศ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ในขณะที่อัตราการให้อากาศ 200 มิลลิลิตรต่อนาที มีค่ากระแสและประจุไฟฟ้าน้อยกว่าที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที อาจเนื่องมาจาก

อัตราการให้อากาศที่มากเกินไปจะไปรบกวนการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ

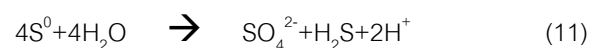
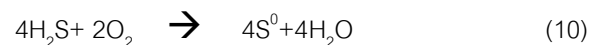
4.13 สารประกอบซัลเฟตและไนเตรท

ในกรณีในชีวอนินทรีย์ที่มีศักย์ไฟฟ้าสูง เช่น ซัลเฟต หรือไนเตรตในน้ำเสีย ศักย์ไฟฟ้าในชีวอนินทรีย์จะสูงขึ้น ทำให้อาโนดเปลี่ยนเป็นหน้าที่เป็นรับอิเล็กตรอนแทน (Rabaey, 2005b) ทำให้ประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าลดลง โดย Ecke and Lagerkvist (2000) พบว่าเชื้อจุลินทรีย์กลุ่มที่ไม่ใช้อากาศจะสร้าง ATP จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารอินทรีย์ในขณะที่บางส่วนของสารประกอบอินทรีย์จะถูกใช้เป็นตัวรับอิเล็กตรอน (substrate-level phosphorylation) ถ้าตัวรับอิเล็กตรอนเป็นสารอนินทรีย์หรือไอออน เช่น ไนเตรท ซัลเฟต ซัลเฟอร์คาร์บอเนต ฟิวมาเลท หรือ ไอออนของเหล็ก การสร้าง ATP จะผ่านกระบวนการ electron transport phosphorylation การหายใจโดยใช้ไนเตรทมักพบในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้อากาศ การหมักแบบมีอากาศบางส่วน ไนเตรทจะถูกเปลี่ยนเป็นไนไตรท์ ก๊าซไนไตรด์ ออกไซด์ และ ก๊าซไนโตรเจน จุลินทรีย์กลุ่ม Nitrate-reducing bacteria จะใช้ไฮโดรเจนในการเปลี่ยนไนเตรทเป็นก๊าซไนโตรเจน

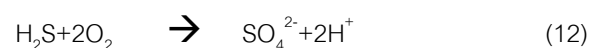


Clauwaert และคณะ (Clauwaert, 2007) ศึกษาผลของไนเตรทต่อการผลิตไฟฟ้าจากสารอินทรีย์และกิจกรรมของปฏิกิริยา denitrification ในเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบสองห้องโดยใช้ชีวอนินทรีย์สภาพและใช้สารละลายไนเตรทที่ปราศจากสารอินทรีย์ในชีวคาพบว่าเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพมีศักย์ไฟฟ้า (0.214V) ต่ำกว่าการใช้ออกซิเจนในชีวคาโอด เมื่อไนเตรทถูกใช้หมดทิศทางของปฏิกิริยาจะเปลี่ยนไปรีดิวซ์ซัลเฟตเป็นซัลไฟด์แทน ปฏิกิริยานี้จะถูกเร่งโดยจุลินทรีย์กลุ่ม obligate anaerobic sulfate-reducing bacteria Lovley (2006) รายงานว่าปฏิกิริยาทั้งหมดของ sulfate reduction รวมถึงการออกซิเดชันของอะซิเตทโดยซัลเฟต จะให้พลังงานหรือให้อิเล็กตรอนมากกว่าการกระบวนการผลิตก๊าซมีเทน

จากอะซิเตท ส่วนการย่อยสารอินทรีย์อื่นๆ ในของเสียที่มีส่วนเกี่ยวข้องอีกเล็กน้อย ได้แก่ กระบวนการหายใจโดยใช้ซัลเฟอร์ (S/S^{2-}), ฟิวมาเลท (fumarate/succinate) และ เหล็ก ($\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$) เป็นตัวรับอิเล็กตรอน Kosaric and Velikonja (Kosaric, 1995) อธิบายถึงพลังงานที่ได้จากโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่เกิดจาก sulfate reduction ได้เป็นซัลไฟด์ซึ่งเป็นสารให้พลังงานระดับสามที่ทำหน้าที่เป็นสารถ่ายเทอิเล็กตรอนของปฏิกิริยารีดอกซ์ในชีวอนินทรีย์ เมื่อเร็วๆ นี้ Rabaey และคณะ (Rabaey, 2005a) ทดสอบการผลิตกระแสไฟฟ้าจากซัลไฟด์ในเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบสองห้องและกล่าวถึงศักยภาพในการประยุกต์ใช้เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพในการกำจัดซัลเฟตในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้อากาศ ผลจากการศึกษาพบว่าซัลไฟด์ถูกกำจัดโดยปฏิกิริยาออกซิเดชันกลายเป็นซัลเฟอร์ และจากการศึกษาของนักวิจัยหลายท่าน (Holmes, 2004; Reimers, 2001; Tender, 2002) พบว่าซัลเฟอร์จะยึดเกาะอยู่ที่ชีวอนินทรีย์ที่จมลงในตะกอนดินใต้ทะเลที่มีความเข้มข้นของซัลเฟตในสิ่งแวดล้อมสูง ทั้งนี้ Cypionka และคณะ (1998) รายงานว่าแบคทีเรียกลุ่ม sulfate oxidizing bacteria (SOB) หลายชนิดสามารถออกซิไดซ์สารประกอบซัลเฟอร์ในสารอินทรีย์โดยใช้ออกซิเจนหรือไนเตรทเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ปฏิกิริยาออกซิเดชันของซัลไฟด์ที่สมบูรณ์ ซัลไฟด์จะถูกเปลี่ยนเป็นซัลเฟอร์ ดังสมการที่ (10) และ (11);



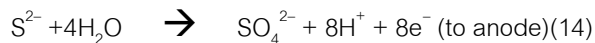
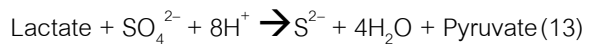
ผลรวมสมการ:



Whitmire และคณะ (2005) ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างซัลเฟตและไนเตรตในตะกอนจากบึงน้ำจืด พบว่ากระบวนการบำบัดไนเตรทและซัลเฟตเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยไนเตรทจะถูกบำบัดเป็นอันดับแรก Zhang และคณะ (2008) รายงานการทบทวนบทความว่า การควบคุมการปลดปล่อยซัลไฟด์ทำได้โดยการเติมไนเตรท เนื่องจากการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่ม NRSOB

(nitrate reduction sulfate oxidation bacteria) ออกซิไดซ์ H_2S ที่สร้างจาก SRB (sulfate reducing bacteria) จากการศึกษาแบบการทำงานของ NRSOB ในบ่อดักไขมันพบประเด็นสำคัญของจุลินทรีย์กลุ่มนี้ว่า สามารถยับยั้งการเกิดซัลไฟด์ได้โดยการเติมไนเตรท มีรายงานว่า จุลินทรีย์ที่สำคัญในกลุ่มนี้ได้แก่ *Thiomicrospira denitrificans* และ *Thiobacillus denitrificans* ซึ่งสามารถออกซิไดซ์ซัลไฟด์เมื่อมีไนเตรทเป็นตัวช่วยในการเกิดการออกซิเดชันของซัลไฟด์ และพบปรากฏการณ์นี้ในอาหารเลี้ยงเชื้อ *Beggiatoa* ในสภาวะที่ปราศจากออกซิเจนและใช้ในเตรทเป็นตัวรับอิเล็กตรอน (Anja, 2006) นอกจากนี้ยังพบในกิจกรรมของเชื้อ *Desulfurovibrio desulfuricans* ด้วย (Moon, 2006).

นอกจากนี้สารให้พลังงานเช่น ไฮโดรเจน กรดฟอร์มิก กรดแลคติก และซัลไฟด์ สามารถสร้างพลังงานในระหว่างการหมักแลคเตทโดยเชื้อ *Desulfovibrio desulfuricans*, ที่อยู่ในกลุ่ม sulphate-reducing bacteria ดังสมการต่อไปนี้:



ซัลไฟด์ที่มีอยู่จะยับยั้งกระบวนการเติบโตของแบคทีเรีย โดยจะเข้าทำปฏิกิริยากับ iron-containing proteins เช่น cytochromes, ส่งผลให้เกิดการยับยั้งการถ่ายทอดอิเล็กตรอน ซัลไฟด์จะทำลายซัลโฟลหะเพราะมีความแรงและกัดกร่อน (Shukla, 2004)

จากปัจจัยที่กล่าวมาข้างต้นทำให้ได้แนวความคิดการวิจัย โดยทำการปรับเปลี่ยนวัสดุที่มีราคาแพงจำพวกแพลทตินัมด้วยวัสดุตรงจุลินทรีย์ที่มีพื้นที่ผิวสูงเพื่อใช้เป็นขั้วไฟฟ้า จุลินทรีย์จะทำหน้าที่สร้างสารอะตะลิสต์ชีวภาพทดแทนโลหะอะตะลิสต์ราคาสูง (แพลทตินัมหรือทองคำ) ซึ่งสามารถลดต้นทุนการสร้างเครื่องมือลดลงได้มากกว่า 3,000 เท่าจากต้นแบบเดิมในต่างประเทศ ด้วยต้นทุนการสร้างเซลล์ 76 บาทต่อลิตรถึงหมัก และใช้กำลังไฟฟ้าในการเดินระบบและให้อากาศ 45.0 และ 9.4 วัตต์ชั่วโมงต่อลิตรถึงหมัก การใช้เทคนิคพิเศษในการแยกส่วนของเซลล์เชื้อเพลิงทดแทนการใช้เมมเบรน สามารถลดปัญหาการบำรุงรักษาเนื่องจากการอุดตันของเมมเบรน จากผลการวิจัยพบว่าถึงแม้การผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงที่จุลชีพที่ออกแบบและสร้าง (Sukkasem, 2010a) จะยังไม่มากนักแต่มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา (ตารางที่ 3)

สรุป

สิ่งประดิษฐ์เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบใหม่โดยใช้วัสดุทางชีวภาพต้นทุนต่ำ เป็นแนวทางที่ให้ต้นทุนต่ำลงมากและสามารถประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียได้ดี และมีความเป็นไปได้ที่จะพัฒนาสู่ระดับปฏิบัติการและระดับอุตสาหกรรม

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบระบบการบำบัดน้ำเสียระหว่างระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์กับระบบบำบัดน้ำเสียในปัจจุบัน

ระบบบำบัดน้ำเสีย	ปริมาตรน้ำเสียในระบบ (ลิตร)	กลุ่มจุลินทรีย์ในขั้วลบ	เนื้อเยื่อเลือกผ่าน	สารคะตะลิสต์หรือสารรับส่งอิเล็กตรอน	สารตั้งต้น	ค่าซีไอดีในน้ำเสีย (กรัมต่อลิตร)	ภาวะบรรจุทุก (กรัมต่อลิตรต่อวัน)	ระยะเก็บกัก (วัน)	ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย (กรัมซีไอดีต่อลิตรต่อวัน)	อ้างอิง
ระบบหมักร่วมกับเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบที่ 1 (ต้นทุน 90 บาทต่อลิตร)	เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ 1.5	กลุ่มจุลินทรีย์บนถ่านกัมมันต์	ไม่มี	กลุ่มจุลินทรีย์	น้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล	216 ± 30.0	30.0	1.04	17.12	(Sukkasem, 2011; Sukkasem, 2010b)
ระบบหมักร่วมกับเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบที่ 2 (ต้นทุน 76 บาทต่อลิตร)	เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ 2.1	กลุ่มจุลินทรีย์บนแปรง	ไม่มี	กลุ่มจุลินทรีย์	น้ำเสียจากการแปรรูปน้ำมันปาล์ม	50.0-60.0	30.0	1.04	26.60	(Sukkasem, 2011)
ระบบหมักร่วมกับเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบที่ 2 (ต้นทุน 76 บาทต่อลิตร)	เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ 2.1	กลุ่มจุลินทรีย์บนแปรง	ไม่มี	กลุ่มจุลินทรีย์	น้ำเสียจากการแปรรูปอาหารทะเล	3.0-4.0	8.57	0.35	7.53	(Sukkasem, 2011)
ระบบหมักแบบไร้อากาศ	ND	กลุ่มจุลินทรีย์	ไม่มี	ไม่มี	น้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล	81.6-85.7	7.88-14.25	ND	7.88-14.25	(López, 2009)
เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ + UASB	เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ 2.36	กลุ่มจุลินทรีย์	ไม่มี	กลุ่มจุลินทรีย์	น้ำเสียจากการแปรรูปน้ำมันปาล์ม	50.0	4-5.25	2.0	>5.0	(Cheng et al., 2010)
เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบช่องเดี่ยว	0.028	กลุ่มจุลินทรีย์	ไม่มี	แพลทตินั่ม	น้ำเสียจากบ้านเรือน	182	54	0.009	13.93	(Ahn and Logan, 2010)
เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบช่องคู่	1.15	กลุ่มจุลินทรีย์	ไม่มี	โปแตสเซียมเปอร์มันганเนต	น้ำเสียสังเคราะห์	NA	6.0	0.5	2.42-3.71	(Behera and Ghangrekar, 2009)
เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบช่องเดี่ยว	0.25	จุลินทรีย์กลุ่มเคมีไฟฟ้า	ไม่มี	แพลทตินั่ม	น้ำเสียจากการหมัก	25.9	3.84	1.04	>3.57	(Nam et al., 2010)
เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบช่องเดี่ยว	0.25	กลุ่มจุลินทรีย์	มี	แพลทตินั่ม	น้ำเสียจากบ้านเรือน	0.2	12.0-18.0	3.0	0.89-1.34	(Jiang and Li, 2009)

หมายเหตุ: ข้อมูลตัวเลขได้จากการคำนวณหรือตัดแปลงจากตัวเลขในเอกสารต้นฉบับ, NA หมายถึง ไม่มีข้อมูลในเอกสารต้นฉบับ

5. 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**, 469-475.
- Angenent, L. T., Karim, K., Al-Dahhan, M.H., Wrenn, B.A. and R. Domínguez-Espinosa. (2004) Production of Bioenergy and Biochemicals from Industrial and Agricultural Wastewater. *TRENDS in Biotechnology* **22**, 477-484.
- Anja, K., Peter, S. and Heide, N. . (2006) Anaerobic sulfide oxidation with nitrate by a freshwater *Beggiatoa* enrichment culture. . *Appl Environ Microbio.* **72**, 4755-4760.
- Behera, M. and Ghangrekar, M. M. (2009) Performance of microbial fuel cell in response to change in sludge loading rate at different anodic feed pH. *Bioresource Technology* **100**, 5114-5121.
- Behera, M., Jana, P. S. and Ghangrekar, M. M. (2010) Performance evaluation of low cost microbial fuel cell fabricated using earthen pot with biotic and abiotic cathode. *Bioresource Technology* **101**, 1183-9.
- Charity, E. a. E. (2008) Wastewater treatment processes.
- Cheng, J., Zhu, X., Ni, J. and Borthwick, A. (2010) Palm oil mill effluent treatment using a two-stage microbial fuel cells system integrated with immobilized biological aerated filters. *Bioresour Technol* **101**, 2729-34.
- Cheng, S., Liu, H. and Logan, B.E. (2006) Increased performance of single-chamber microbial fuel cells using an improved cathode structure. *Electrochemistry Communications* **8**, 489-494.
- Cheng, S. a. L., B.E. (2007) Amonia treatment of carbon cloth anodes to enhance power generation of microbial fuel cells. *Electrochemistry Communications* **9**, 492-496.
- Clauwaert, P., Rabaey, K., Aelterman, P., Schampelaire, L.D., Pham, T.H., Boeckx, P., Boon, N. and Verstraete, W. (2007) Biological denitrification in microbial fuel cells *Environmental Science and Technology* **41**, 3354-3360.
- Cypionka, H., Smock, A.M. and Bottcher M.E. . (1998) A combined pathway of sulfur compound disproportionation in *Desulfovibrio desulfuricans*. . *FEM Microbiology Letters.* **166**, 181-186.
- Deng, Q., Li, X., Zuo, J., Ling, A., and Logan, B.E. (2010) Power generation using an activated carbon fiber felt cathode in an upflow microbial fuel cell. *J Power Sources* **195** 1130-1135.
- Du, Z., Li, Q., Tong, M., Li, S. and Li, H (2008) Electricity generation using membrane-less microbial fuel cell during wastewater treatment. *Chinese Journal of Chemical Engineering* **16**, 772-777.
- Ecke, H. a. A. L. (2000) Anaerobic treatment of prestiscible refuse (ATPR). . In *Division of Waste Science and Technology, Department of Environmental Engineering*, , pp. 1-47, LTU. .
- Erickson, L. E. a. F., D.Y.C., . (1988) Handbook on anaerobic fermentation, Marcel Dekker, Inc., New York.
- Feng, Y., Yang, Q., Wang, X. and Logan, B. E. . (2010) Treatment of graphite fiber brush anodes for improving power generation in air-cathode microbial fuel cells. . *J. Power Sources.* **195**, 1841-1844.
- Feng, Y., Yang, Q., Wang, X., Lui, Y., Lee, H. and Ran, N. (2011) Treatment of biodiesel production

- wastes with simultaneous electricity generation using a single-chamber microbial fuel cell. *Bioresource Technol.* **102**, 411-415.
- He, Z., Minteer, S.D. and Angenent, L.T (2005) Electricity generation from artificial wastewater using an upflow microbial fuel cell. *Environmental Science Technology* **39**, 5262-5267.
- Holmes, D. E., Bond, D.R. and Lovley, D.R. . (2004) Electron transfer by *desulfobulbus propionicus* to Fe(III) and graphite electrodes. *Appl Environ Microbio.* **70**, 1234-1237.
- Hu, Y. S., Demir-Cakan, R., Titirici, M. M., Muller, J. O., Schlogl, R., Antonietti, M. and Maier, J. (2008) Superior storage performance of a Si@SiO_x/C nanocomposite as anode material for lithium-ion batteries. *Angew Chem Int Ed Engl* **47**, 1645-9.
- Jang, J. K., Pham, T.H, Chang I.S., Kang, K.H., Moon H., Cho, K.S. and Kim. B.H. (2004) Construction and Operation of a Novel Mediator and membrane-less Microbial Fuel cell. *Process Biochemistry* **39**, 1007-1012.
- Jiang, D., Curis, M., Troop, E., Scheible, K., McGrath, J., Hu, B., Suib, S., Raymond, D. and Li, B. (2011) A pilot-scale study on utilizing multi-anode/cathode microbial fuel cells (MAC MFCs) to enhance the power production in wastewater treatment. *Int J Hydrogen Energ.* **36**, 876-884.
- Jiang, D. and Li, B. (2009) Granular activated carbon single-chamber microbial fuel cells (GAC-SCMFCs): A design suitable for large-scale wastewater treatment processes. *Biochemical Engineering Journal* **47**, 31-37.
- Jiang, D., Li, X., Raymond, D., Mooradian, J. and Li, B. (2010) Power recovery with multi-anode/cathode microbial fuel cells suitable for future large-scale applications. *Int J Hydrogen Energ.* **35**, 8683-8689.
- Jiang, D. a. L., B. (2009) Granular activated carbon single-chamber microbial fuel cells (GAC-SCMFCs): A design suitable for large-scale wastewater treatment processes. *Biochem Eng.* **47**, 31-37.
- Kim, H. J., H.S. Park, M.S. Hyun, I.S. Chang, M. Kim and B.H. Kim. (2002) A mediatorless microbial fuel cell using a metal reducing bacterium, *Shewanella putrefaciens*. *Enzyme Microb Tech.* **30**, 145-152.
- Kim, J. R., Min, B. and Logan, B. E. (2005) Evaluation of procedures to acclimate a microbial fuel cell for electricity production. *Appl Microbiol Biotechnol* **68**, 23-30.
- Kosaric, N. a. V., J. . (1995) Liquid and gaseous fuels from biotechnology: challenge and opportunities. *FEMS Microbiology Reviews.* **16**, 11-142.
- Kumwachara K., W. P. a. H. K. (2010) Electricity generation by reverse electrodialysis. *KKU Engineering Journal* **37**, 219-227.
- Lee, S., Maken, S., Jang J-W., Park, K. and Park, J-W. (2007) Development of physicochemical nitrogen removal process for high strength industrial wastewater *Water research* **40**, 975-980.
- Li, X., Hu, B., Suib, S., Lei, Y. and Li, B. (2010) Manganese dioxide as a new cathode catalyst in microbial fuel cells. *J Power Sources* **195**, 2586-2591.
- Liu, H., Cheng, S. and Logan, B.E. (2005) Power generation in fed-batch microbial fuel cells as a function of ionic strength, temperature and reactor configuration. *Environmental Science and Technology* **39**, 5488-5493.

- Liu, H. and Logan, B. E. (2004) Electricity generation using an air-cathode single chamber microbial fuel cell in the presence and absence of a proton exchange membrane. *Environmental Science and Technology* **38**, 4040-6.
- Logan, B. E., Aelterman, P., Hamelers, B., Rozendal, R., Schröder, U., Keller, J., Freguiac, S. et al. (2006) Microbial fuel cells: methodology and technology. *Environmental Science and Technology* **40**, 5181-5192.
- Logan, B. E., Oh, S.-E., Kim, I.S. and Ginkel, S. Van. (2002) Biological hydrogen production measured in batch anaerobic respirometers. *Environmental Science and Technology* **36**, 2530-2535.
- López, J. A. S. S., M.A.M.; Pérez, A.F.C. (2009) Anaerobic digestion of glycerol derived from biodiesel manufacturing. *Bioresource Technol* **100**, 5609-5615.
- Lovley, D. R. (2006) Bug juice: harvesting electricity with micro-organisms nature *Review Microbiology* **4** 497-508.
- Moon, H., Chang, I.S. and Kim, B.H. (2006) Continuous electricity production from artificial wastewater using a mediator-less microbial fuel cell. *Bioresource Technol.* **97**, 621-627.
- Nam, J. Y., Kim, H. W., Lim, K. H. and Shin, H. S. (2010) Effects of organic loading rates on the continuous electricity generation from fermented wastewater using a single-chamber microbial fuel cell. *Bioresource Technology* **101 Suppl 1**, S33-7.
- Oh, S.-E. a. L., B.E. . (2005) Hydrogen and electricity production from a food processing wastewater using fermentation and microbial fuel cell technologies. *Water Research* **39**, 4673-4682.
- Oh, S.-E. M., B. and Logan, B.E. (2004) Cathode performance as a factor in electricity generation in microbial fuel cells. *Environmental Science and Technology* **38** 4900-4904.
- Park, D. H. a. Z., J.G. (2002) Impact of electrode composition on electricity generation in a single-compartment fuel cell using *Shewanella putrefaciens*. *Applied Microbiology and Biotechnology* **59**, 58-61.
- Rabaey, K., Clauwaert, P., Aelterman, P. and Verstraete, W. (2005a) Tubular microbial fuel cell for efficient electricity generation. *Environmental Science and Technology* **39**, 8077-8082.
- Rabaey, K., Lissens, G., Siciliano, S. D. and Verstraete, W. (2003) A microbial fuel cell capable of converting glucose to electricity at high rate and efficiency. *Biotechnol Lett* **25**, 1531-5.
- Rabaey, K. a. V., W. (2005b) Microbial fuel cells: novel biotechnology for energy generation. *TRENDS Biotechnol.* **23**, 291-298.
- Reimers, C. E., Tender, L.M., Fertig, S. and Wang, W. . (2001) Harvesting energy from the marine sediment-water interface. *Environ Sci Technol.* **35**, 192-195.
- Shin, H.-S., J.-H. Yom, S.-H. Kim, H.-S. Shin, J.-H. Youn and S.-H. Kim. (2004) Hydrogen Production from Food Waste in Anaerobic Mesophilic and Thermophilic Acidogenesis. *International Journal of Hydrogen Energy* **29**, 1355-1363.
- Shukla, A. K., Suresh, P., Berchmans, S. and Rajendran, A. . (2004) Biological fuel cells and their applications. *Current Sci.* **87**, 455-468.
- Sukkasem, C. (2009) Electricity generation from industrial wastewater using single chamber microbial fuel cell and biocatalyst-immobilized-

- cathode-upflow microbial fuel cell, *Vol. Ph.D* Prince of Songkla University.
- Sukkasem, C. (2010a) Turbo Bio-Treatment for Severe Wastewater, *Vol. Thai Petty Application No.1003000913*, (ed. NRCT), Thailand.
- Sukkasem, C. (2011) Development of Thai Microbial Fuel Cell to Generate Electricity from Industrial Wastewaters, National Research Council of Thailand.
- Sukkasem, C., Boonsawang, P. (2010b) Enhance potential of membrane-less biocathode upflow microbial fuel cell for biodiesel wastewater treatment. In *239th ACS National Meeting and Exposition*, Moscone Center, San Francisco, CA, USA.
- Sun, J., Hu, Y., Bi, Z., and Cao, Y. . (2009) Improved performance of air-cathode single-chamber microbial fuel cell for wastewater treatment using microfiltration membranes and multiple sludge inoculation, . *J Power Sources*. **187** 471-479.
- Tanaka, Y., Fukumori, Y. and Yamanaka, T. (1983) Purification of cytochrome a1c1 from *Nitrobacter agilis* and characterization of nitrite oxidation system of the bacterium. *Archives of Microbiology* **135** 265-271.
- Tayhas, G., Palmore, R. and Kim, H.H. . (1999) Electro-enzymatic reduction of dioxygen to water in the cathode compartment of a biofuel cell. . *J Electroanal Chem*. **464**, 110-117.
- Tender, L. M., Reimer, C.E., Stecher, H.A., Holmes, L.M., Bond, D.R., Lowy, D.A., Pilobello, K., Fertig, S.J. and Lovley, D.R. . (2002) Harnessing microbially generated power on the seafloor. . *Natural Biotechnology*. **20**, 821-825.
- Whitmire, S. L. a. H., S. . (2005) Rapid removal of nitrate and sulfate in freshwater wetland sediments. . *J Environ Quality*. **34**, 2062-2071.
- Zeikus, J. G. (2007) Electrode compositions and configurations for electrochemical bioreactor systems, *Vol. US7250288*.
- Zhang, L., Schryver, P.D., Gussemme, B.D., Muynck, W.D., Boon, N. and Verstraete, W. (2008) Chemical and biological technologies for hydrogen sulfide emission control in sewer systems: A review. *Water Research* **42**, 1-12.
- Zhang, T. (2003) Biohydrogen Production from Strach in Wasterwater under Thermophilic Condition. *Journal of Environmental Management* **69**, 149-156.