

เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์: แนวทางใหม่เพื่อการผลิตพลังงาน Microbial Fuel Cells: Novel Approach for Energy Generation

ขนิษฐา หมูโสภัญญ์

ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40002

Email: khamoo@kku.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้จะกล่าวถึงความเป็นมา หลักการทำงาน กลไกการถ่ายโอนอิเล็กตรอน ประเภท และการประยุกต์ใช้เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานทางเลือกใหม่ในอนาคตที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก โดยเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้จากกระบวนการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุของจุลินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศโดยไม่ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ : เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ การถ่ายโอนอิเล็กตรอน เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องคู่ เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องเดี่ยว การประยุกต์ใช้เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์

Abstract

This article outlines the history, operational principles, electron transfer mechanisms, types, and applications of microbial fuel cells, a much-discussed form of renewable energy in the future. Microbial fuel cells are capable of producing electricity from organic materials catabolism of microorganisms under anaerobic condition without negative environmental impacts.

Keywords : Microbial Fuel Cells, Electron Transfer, Two-Chamber Microbial Fuel Cells, Single-Chamber Microbial Fuel Cells, Applications of Microbial Fuel Cells

1. บทนำ

พลังงานมีบทบาทสำคัญในโลกสมัยใหม่ สิ่งอำนวยความสะดวกทั้งหลายที่มนุษย์ประดิษฐ์ขึ้นมาล้วนแต่ต้องการพลังงานในรูปแบบต่างๆ ซึ่งพลังงานที่ใช้ส่วนใหญ่ได้มาจากเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น ถ่านหิน แก๊สธรรมชาติและน้ำมัน เป็นต้น ประกอบกับจำนวนประชากรโลกที่เพิ่มขึ้นทำให้ความต้องการบริโภคพลังงาน มีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามแหล่งเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นแหล่งเชื้อเพลิงที่มีอยู่อย่างจำกัด และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในหลายด้าน การแสวงหาแหล่งพลังงานทดแทนใหม่ที่มีศักยภาพสูงและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมจะสามารถช่วยแก้ปัญหาดังกล่าวได้ ซึ่งเซลล์เชื้อเพลิง (fuel cell) เป็นหนึ่งในทางเลือกหนึ่งที่กำลังได้รับความนิยมพัฒนา เนื่องจากสามารถเปลี่ยนพลังงานเคมีในเชื้อเพลิงไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้นานตรงตามเท่าที่มีเชื้อเพลิงป้อนเข้าสู่

เซลล์เชื้อเพลิง เซลล์เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้า แต่มีข้อเสีย คือ ต้องใช้ตัวเร่งที่มีราคาแพงทำงานที่อุณหภูมิสูง และอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้กักตรอนเซลล์เชื้อเพลิง นอกจากนี้การได้มาของเชื้อเพลิง ได้แก่ ไฮโดรเจนหรือสารไฮโดรคาร์บอน ต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงและสูญเสียพลังงานในกระบวนการผลิต จากสาเหตุดังกล่าวนำไปสู่การพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ (microbial fuel cell) เนื่องจากสามารถทำงานภายใต้สภาวะไม่รุนแรง คือ ที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ สามารถใช้อิเล็กโทรไลต์ที่เป็นกลางและตัวเร่งปฏิกิริยาราคาถูก เช่น แพลทินัม (platinum) ได้ [1] นอกจากนี้ยังสามารถใช้สารตั้งต้นได้หลากหลายชนิดนับตั้งแต่น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว เช่น กลูโคส จนถึงสารประกอบจำพวกของเสียที่มีคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบ เช่น น้ำเสีย เป็นต้น ข้อดีของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์สามารถสรุปได้ดังนี้

- ก) สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าจากสารตั้งต้นทางชีวภาพได้โดยตรง
- ข) พลังงานที่ผลิตได้เป็นพลังงานสะอาด
- ค) สามารถใช้สารตั้งต้นทางชีวภาพได้หลากหลายชนิด เช่น คาร์โบไฮเดรต [2] กรดไขมัน [3] โปรตีน [4] และน้ำเสีย [5]

2. ประวัติการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์

ในสมัยก่อนผู้คนคิดว่าปรากฏการณ์ที่จุลินทรีย์สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้เป็นแค่ปรากฏการณ์แปลกๆทางชีวภาพเท่านั้น แต่ในปัจจุบันนี้นักวิทยาศาสตร์ได้นำเอาความสามารถในการผลิตกระแสไฟฟ้าของจุลินทรีย์มาสร้างสิ่งประดิษฐ์ใหม่ๆ ได้แก่เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์เพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานในนาฬิกาและกล้องถ่ายภาพความเชื่อมโยงระหว่างกระแสไฟฟ้าและกระบวนการเมแทบอลิซึม (metabolism) ในสิ่งมีชีวิตถูกค้นพบเป็นครั้งแรกในคริสต์ศตวรรษที่ 18 โดย Galvani จากการทดลองเพื่อศึกษาผลของกระแสไฟฟ้าที่มีต่อสิ่งมีชีวิต และพบว่าหากเกิดการกระตุ้นเมื่อมีการผ่านกระแสไฟฟ้าลงไป และได้ตั้งทฤษฎีกระแสไฟฟ้าในสัตว์ (animal electricity) ขึ้นมา [6] ในปี ค.ศ. 1910 Potter คาสตราจารย์ทางพฤกษศาสตร์ ณ มหาวิทยาลัยเดอแฮม (Durham) ประเทศสหราชอาณาจักร เป็นบุคคลแรกที่มีแนวคิดในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเชื้อจุลินทรีย์ โดยสาธิตการผลิตกระแสไฟฟ้าจาก *Escherichia coli* และ *Saccharomyces* โดยใช้อิเล็กโทรดแพลทินัม [7] แต่ผลงานวิจัยของเขาไม่ได้รับการยอมรับมากนัก ต่อมา Cohen [8] ได้สานต่อแนวความคิดของ Potter โดยทำการสร้างเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์หลายๆ เซลล์มาต่อกัน และสามารถผลิตความต่างศักย์ไฟฟ้าได้มากกว่า 35 โวลต์ อย่างไรก็ตามเมื่อคิดเป็นค่ากระแสไฟฟ้า เซลล์ที่นำมาต่อกันสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้เพียง 2 มิลลิแอมแปร์ เท่านั้น เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์เริ่มได้รับความสนใจในปี 1960-1969 เมื่อองค์การนาซา (National Aeronautics and Space Administration, NASA) ได้ให้ความสนใจในการเปลี่ยนวัสดุเหลือทิ้งทางชีวภาพให้เป็นกระแสไฟฟ้าสำหรับใช้ในกระสวยอวกาศ โดยสารร้ายและแบคทีเรียเป็นจุลินทรีย์ชนิดแรกๆ ที่ถูกนำมาใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ ในปี ค.ศ. 1963 เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ได้ถูกนำออกจำหน่ายในท้องตลาดเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานในวิทยุ สัญญาณไฟ และอุปกรณ์อื่นๆ ที่ใช้ในทางทะเล อย่างไรก็ตามเซลล์

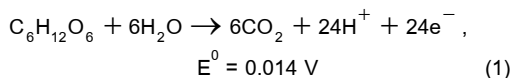
เชื้อเพลิงจุลินทรีย์เหล่านี้ไม่ประสบความสำเร็จในเชิงพาณิชย์และหายไปจากท้องตลาดอย่างรวดเร็ว ซึ่งมีสาเหตุมาจากความสำเร็จในการพัฒนาเทคโนโลยีทางเลือกอื่นๆ เช่น เซลล์โฟโตโวลตาอิกแสงอาทิตย์ (solar photovoltaic) ที่ใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานบนยานอวกาศ ดังนั้นเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์จึงได้รับความสนใจลดลง ต่อมาเกิดวิกฤตการณ์น้ำมันระหว่างปี 1970-1989 ทำให้ความสนใจในการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์กลับมาได้รับความสนใจอีกครั้ง Yao และคณะ [9] พบว่าน้ำตาลกลูโคสสามารถใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ เมื่อใช้แพลทินัมทำเป็นอิเล็กโทรด Bennetto และคณะ [10] ได้พัฒนาและปรับปรุงเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์โดยใช้จุลินทรีย์หลายชนิดและใช้ระบบตัวพาอิเล็กตรอน คือ เมดิเอเตอร์ (mediator) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายโอนอิเล็กตรอนให้สูงขึ้น ต่อมา Karube และคณะ [11] รายงานว่าสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าโดยเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ได้ประมาณ 300 มิลลิแอมแปร์ จาก *Anabaena* spp. โดยใช้กรดฟอสฟอริก (phosphoric acid) เป็นอิเล็กโทรไลต์ เมื่อไม่นานมานี้ Chaudhuri และ Lovely [12] รายงานว่าจุลินทรีย์ *Rhodospira rubra* สามารถสร้างไบโอฟิล์ม (biofilm) บนพื้นผิวขั้วแอโนด และสามารถถ่ายโอนอิเล็กตรอนจากกระบวนการย่อยสลายกลูโคสในที่มี Fe^{3+} ได้ประสิทธิภาพสูงถึงร้อยละ 83 โดยไม่จำเป็นต้องใช้เมดิเอเตอร์ ปัจจุบันนี้มีความพยายามที่จะปรับปรุงเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบไร้เมดิเอเตอร์ และใช้เส้นลวดนาโนของจุลินทรีย์เชื่อมต่อกับอิเล็กโทรด เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายโอนอิเล็กตรอน

3. หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์

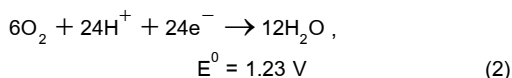
เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์คือเครื่องมือที่เปลี่ยนพลังงานทางเคมีที่มีอยู่ในสารตั้งต้นทางชีวภาพไปเป็นกระแสไฟฟ้าผ่านปฏิกิริยาแคทาไลติก (catalytic) ของจุลินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ [7] โดยที่เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์จะประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว ได้แก่ ขั้วแอโนด (anode) และขั้วแคโทด (cathode) ประกบติดกับสารอิเล็กโทรไลต์ ดังแสดงในรูปที่ 1 เมื่อทำการป้อนสารอินทรีย์ตั้งต้น เช่น กลูโคส เข้าไปในเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ สารอินทรีย์เหล่านี้จะถูกจุลินทรีย์ที่อยู่รอบๆ ขั้วแอโนดย่อยสลายได้ผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) โปรตอน (H^+) และอิเล็กตรอน (e^-) ดังสมการที่ (1) โปรตอนเคลื่อนที่ผ่านสารอิเล็กโทรไลต์ ส่วนอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากขั้วแอโนด

ไปตามวงจรไฟฟ้าด้านนอกไปยังขั้วแคโทดเพื่อรวมตัวกับโปรตอนและตัวรับอิเล็กตรอน เช่น ออกซิเจน ได้ผลิตภัณฑ์คือ น้ำและเกิดกระแสไฟฟ้า ดังสมการที่ (2) โดยที่ความต่างศักย์ระหว่างขั้วแอโนดและขั้วแคโทดผลักดันให้เกิดการไหลของอิเล็กตรอน

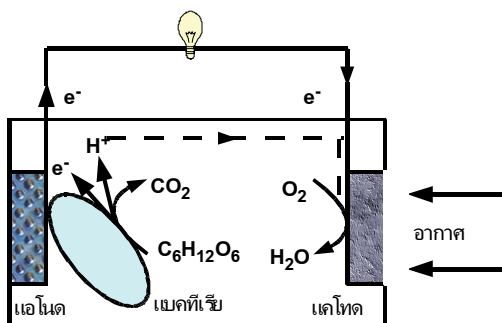
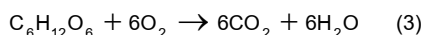
ขั้วแอโนด:



ขั้วแคโทด:



ปฏิกิริยารวมที่เกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ แสดงดังต่อไปนี้



รูปที่ 1 องค์ประกอบพื้นฐานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ (ดัดแปลงจาก Khanal [13])

4. กลไกการถ่ายโอนอิเล็กตรอน

การถ่ายโอนอิเล็กตรอนจากจุลินทรีย์ไปยังขั้วแอโนดแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้

4.1 การถ่ายโอนอิเล็กตรอนไปยังขั้วแอโนดโดยตรงผ่านไซโตโครม (cytochrome) ที่ผนังเซลล์ชั้นนอก (รูปที่ 2ก)

จุลินทรีย์ส่วนใหญ่จะไม่ใช่สื่อนำไฟฟ้า (non-conductive) เนื่องจากเยื่อหุ้มผนังเซลล์ชั้นนอกของจุลินทรีย์ส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยไขมัน ได้แก่ เปปทิโดไกลเคน (peptididoglycan) และไลโปพอลิแซคคาไรด์ (lipopolysaccharide) ซึ่งขัดขวางไม่ให้จุลินทรีย์ถ่ายโอนอิเล็กตรอนไปยังขั้วแอโนดได้โดยตรง [7] แต่มีจุลินทรีย์บางชนิด เช่น *Geobacter sulfurreducens* [14] และ

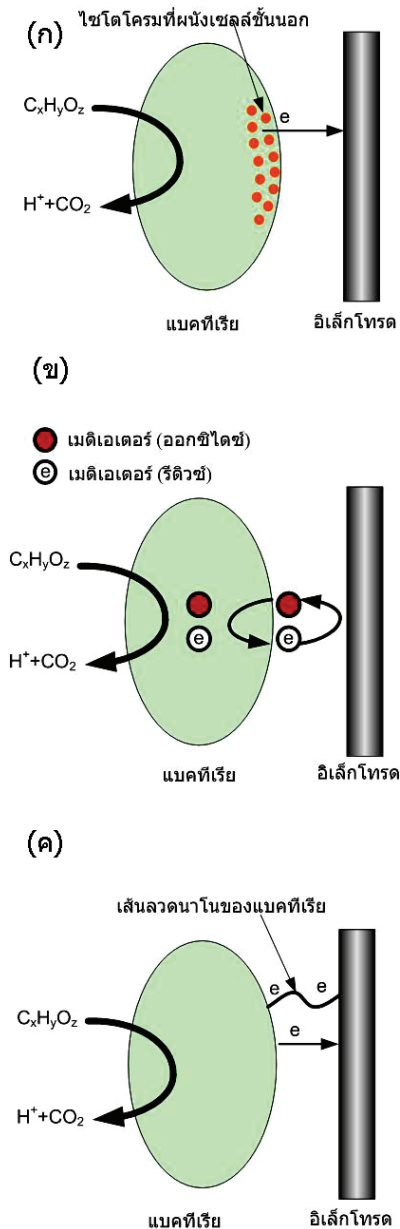
Shewanella putrefaciens [15] สามารถถ่ายโอนอิเล็กตรอนได้ด้วยตัวเอง ซึ่งจุลินทรีย์เหล่านี้จะมีไซโตโครมอยู่ที่ผนังเซลล์ชั้นนอกเป็นจำนวนมาก ทำหน้าที่ช่วยให้เกิดการถ่ายโอนอิเล็กตรอนจากเซลล์จุลินทรีย์ไปยังขั้วแอโนด

4.2 การถ่ายโอนอิเล็กตรอนด้วยเมดิเอเตอร์ (mediator) (รูปที่ 2ข)

การเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายโอนอิเล็กตรอนจากภายในเซลล์จุลินทรีย์ไปยังขั้วแอโนดสามารถทำได้โดยใช้เมดิเอเตอร์ เช่น นิวทรอลเรด (neutral red) และเมธิลีนบลู (methyleneblue) เป็นต้น โดยเมดิเอเตอร์จะแทรกผ่านเยื่อหุ้มเซลล์เข้าไปภายในเซลล์จุลินทรีย์และนำเอาอิเล็กตรอนออกมานอกเซลล์ในรูปของรีดิวซ์เมดิเอเตอร์ และปลดปล่อยอิเล็กตรอนไปยังขั้วแอโนด Park และ Zeikus [16] ใช้นิวทรอลเรดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายโอนอิเล็กตรอนจาก *Escherichia coli* ไปยังขั้วแอโนด นอกจากนี้แบคทีเรียบางสายพันธุ์ยังสามารถผลิตเมดิเอเตอร์ให้แบคทีเรียสายพันธุ์อื่นนำไปใช้ได้ เช่น *Pseudomonas aeruginosa* สามารถผลิตฟีนาซีน (phenazine) เพื่อกระตุ้นการถ่ายโอนอิเล็กตรอนสำหรับแบคทีเรียหลายสายพันธุ์ [17] อย่างไรก็ตาม เมดิเอเตอร์มีข้อเสียคือมีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์และเพิ่มต้นทุนในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า

4.3 การถ่ายโอนอิเล็กตรอนผ่านเส้นลวดนาโน (nanowire) ของแบคทีเรีย (รูปที่ 2ค)

มีการค้นพบว่าเส้นลวดนาโนของแบคทีเรียซึ่งมีโครงสร้างคล้ายเส้นผม (pilus-like) พบอยู่ที่ผนังเซลล์ชั้นนอกของจุลินทรีย์ มีคุณสมบัตินำไฟฟ้า และอาจเกี่ยวข้องโดยตรงต่อการถ่ายโอนอิเล็กตรอน โดยมีการพบเส้นลวดนาโนใน *Geobacter sulfurreducens* PCA, *Shewanella oneidensis* MR-1, สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน *Synechocystis* sp. PCC6803 และแบคทีเรีย *Pelotomaculum thermopropionicum* [18], [19]



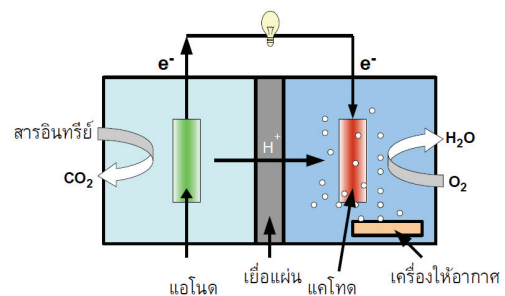
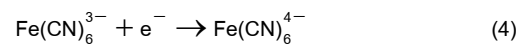
รูปที่ 2 กลไกการถ่ายโอนอิเล็กตรอนไปยังขั้วแอโนด (ก) การถ่ายโอนอิเล็กตรอนโดยตรงผ่านไซโตโครมที่ผนังเซลล์ชั้นนอก (ข) การถ่ายโอนอิเล็กตรอนด้วยเมดิเอเตอร์ (ค) การถ่ายโอนอิเล็กตรอนผ่านเส้นลวดนาโนของแบคทีเรีย (ดัดแปลงจาก Khanal [13])

5. ประเภทของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์

เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบ่งตามลักษณะโครงสร้างได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

5.1. เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องคู่ (Two-chamber microbial fuel cell)

เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องคู่สามารถทำงานได้ทั้งแบบกะ (batch) และแบบต่อเนื่อง และนิยมใช้ในระดับห้องปฏิบัติการ [7] โดยเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ประกอบด้วยห้องแอโนดและห้องแคโทดที่กั้นกลางด้วยเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน (proton exchange membrane) ดังแสดงในรูปที่ 3 หรือในเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์บางชนิดอาจใช้สะพานเกลือ (salt bridge) ที่ยอมให้โปรตอนเคลื่อนที่ผ่านเป็นตัวเชื่อมระหว่างห้องแอโนดและห้องแคโทด โปรตอนจะสามารถเคลื่อนที่ผ่านเยื่อแผ่นไปยังห้องแคโทดได้ แต่ออกซิเจนในห้องแคโทดไม่สามารถผ่านเยื่อแผ่นไปยังห้องแอโนดได้ เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์บางชนิดจะใช้น้ำเป็นสารอิเล็กโทรไลต์ในห้องแคโทด หรือแคโทดไลต์ (catholyte) โดยจะพ่นอากาศผ่านน้ำเพื่อให้ได้ออกซิเจนละลายในน้ำส่งไปที่ขั้วแคโทด วิธีนี้สิ้นเปลืองพลังงานและมีประสิทธิภาพต่ำ การใช้เฟอร์ริไซยาไนด์ (ferricyanide) เป็นแคโทดไลต์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ได้อย่างมาก [20] แต่กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ไม่ยั่งยืน เพราะเฟอร์ริไซยาไนด์ถูกใช้ในปฏิกิริยาในห้องแคโทด ดังสมการที่ (4) จึงจำเป็นต้องมีการเติมเฟอร์ริไซยาไนด์ในระหว่างการผลิตกระแสไฟฟ้า

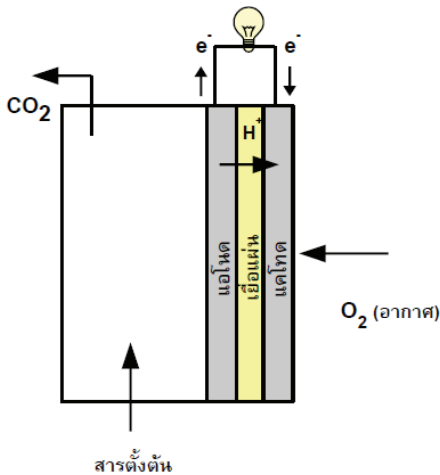


รูปที่ 3 เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องคู่

5.2. เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องเดี่ยว (Single-chamber microbial fuel cell)

เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องคู่มีความซับซ้อนในการออกแบบเพื่อขยายขนาด นอกจากนี้เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องคู่ ยังไม่เหมาะที่จะใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสีย เนื่องจากความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่าต่ำ เมื่อใช้ออกซิเจนเป็นตัวรับ

อิเล็กตรอน หรือจำเป็นต้องเติมสารแคโทไลต์ เช่น เฟอร์ริไซยาไนด์ จึงมีการออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องเดี่ยวมาใช้งาน ซึ่งเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องเดี่ยวมีการออกแบบได้ง่าย และประหยัดกว่าเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องคู่ เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องเดี่ยวโดยทั่วไปจะประกอบด้วยห้องแอโนด และในส่วนห้องแคโทด จะไม่มีการให้อากาศ เนื่องจากขั้วแคโทดสัมผัสกับอากาศโดยตรง โปรตอนจะถูกส่งถ่ายจากสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในห้องแอโนดไปยังขั้วแคโทดซึ่งถูกติดตั้งไว้ที่ด้านบนของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องเดี่ยว แสดงดังรูปที่ 4 โดยที่เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องเดี่ยวนี้จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องคู่ เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายโอนมวลของออกซิเจนในอากาศมีค่าสูงกว่าในน้ำ [13] เยื่อแผ่นเลือกผ่านโปรตอนในเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องเดี่ยว จะทำหน้าที่ป้องกันการแพร่ของออกซิเจนเข้าไปยังห้องแอโนด แต่เนื่องจากเยื่อแผ่นนี้มีราคาแพง จึงได้มีการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องเดี่ยวไร้เยื่อแผ่นขึ้นมา โดยการทำให้เกิดไบโอฟิล์มของแบคทีเรียพวกใช้อากาศบนพื้นผิวขั้วแคโทด ทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้า เนื่องจากการลดความต้านทานภายในเนื่องจากเยื่อแผ่น [2]



รูปที่ 4 เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องเดี่ยว

6. การประยุกต์ใช้เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์

6.1 การขนส่งและการผลิตพลังงาน

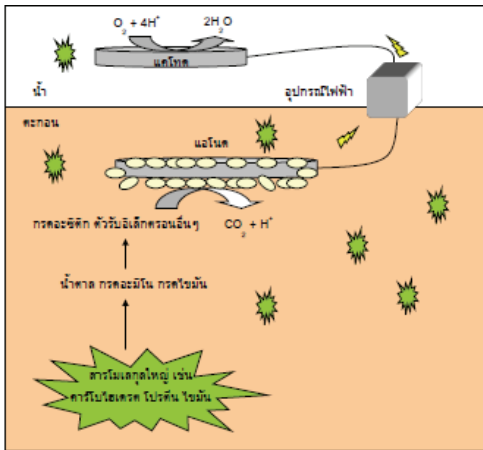
แหล่งพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล โดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำมันปิโตรเลียมเป็นแหล่งพลังงานหลักที่มนุษย์ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน การเผาไหม้เชื้อเพลิงเหล่านี้ก่อให้เกิดสภาวะโลกร้อนเนื่องจากการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจก

ออกมานอกจากนี้เชื้อเพลิงฟอสซิลเหล่านี้ มีอยู่ในปริมาณจำกัดและคาดว่าจะหมดไปในระยะเวลาอีกไม่นานนัก คาดกันว่าในอีก 200 ปีข้างหน้า ยานพาหนะอาจจะไม่มีการติดตั้งถังน้ำมันเชื้อเพลิงอีกต่อไป เพราะแหล่งพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลจะหมดไปจากโลก พลังงานทางเลือกหนึ่งซึ่งเป็นพลังงานสะอาด ที่สามารถใช้ทดแทนแหล่งพลังงานดั้งเดิมคือเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ โดยจะมีการติดตั้งเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ ที่สามารถผลิตพลังงานได้โดยตรงจากสารตั้งต้นคาร์โบไฮเดรตในยานพาหนะ [1] พลังงานที่ปลดปล่อยระหว่างการการออกซิเดชันอย่างสมบูรณ์ ของสารตั้งต้นคาร์โบไฮเดรตจำพวกน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว เช่น กลูโคส หรือน้ำตาลโมเลกุลคู่ เช่น ซูโครส มีค่าประมาณ 16×10^6 จูลต่อกิโลกรัม ซึ่งมีค่าเทียบเท่ากับกระแสไฟฟ้าประมาณ 5 กิโลวัตต์-ชั่วโมง

จากการคำนวณพบว่าเมื่อใช้สารละลายเข้มข้นของคาร์โบไฮเดรต 1 กิโลกรัม จะสามารถทำให้อรถยนต์ขนาดกลางที่ต้องการพลังงานประมาณ 200 วัตต์-ชั่วโมงต่อกิโลเมตร วิ่งได้เป็นระยะทาง 25-30 กิโลเมตร [21] ดังนั้นถ้าใช้สารละลายน้ำตาลเข้มข้น 50 ลิตร จะสามารถทำให้อรถยนต์วิ่งได้เป็นระยะทางมากกว่า 1,000 กิโลเมตร โดยไม่ต้องเติมเชื้อเพลิงระหว่างทาง การผลิตพลังงานโดยเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์นอกจากจะไม่สร้างมลภาวะแล้ว ยังเป็นการลดความเสี่ยงจากการติดตั้งถังบรรจุเชื้อเพลิงฟอสซิลที่ติดไฟง่ายเมื่อเกิดอุบัติเหตุอีกด้วย

จากงานวิจัยของ Reimer และคณะ [22] ได้ทำการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ จากสารประกอบอินทรีย์ได้ทั้งหมด ระบบนี้ต่อมาถูกเรียกว่า BUGs (Benthic Unattended Generators) BUGs ถูกออกแบบเพื่อใช้เป็นเครื่องส่งกำลังไฟฟ้าไปยังที่ห่างไกล เช่น ก้นมหาสมุทร ซึ่งการเปลี่ยนแบตเตอรี่แบบดั้งเดิมมีค่าใช้จ่ายสูง และต้องใช้เทคนิคที่ยุ่งยาก BUGs ประกอบด้วยขั้วแอโนดที่ฝังในส่วนตะกอนไร้อากาศใต้ทะเล (anoxic marine sediments) ต่อกับขั้วแคโทดที่ผิวของน้ำทะเล (overlying aerobic water) ดังรูปที่ 5 สารประกอบอินทรีย์ในตะกอน ถูกย่อยสลายเป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กลงด้วยเอนไซม์ไฮโดรไลติก (hydrolytic enzyme) หลายชนิด และจุลินทรีย์จะทำการหมักสารอินทรีย์เหล่านี้เป็นอะซิเตต และตัวให้อิเล็กตรอน (electron donor) อื่นๆ เช่น ซัลไฟด์ (sulfide) Fe(II) และสารรีดิวซ์จำพวกฮิวมิก (reduced humic substances) แบคทีเรีย *Geobacteraceae* จะออกซิไดซ์สารเหล่านี้ให้

เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ โปรตอน และอิเล็กตรอน จากนั้นอิเล็กตรอนจะถูกถ่ายโอนไปที่ขั้วแอโนดและเคลื่อนที่ผ่านวงจรไฟฟ้าได้เป็นพลังงานไฟฟ้าในที่สุด



รูปที่ 5 แบบจำลองการผลิตกระแสไฟฟ้าในตะกอนโดยเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ (ดัดแปลงจาก Lovely [23])

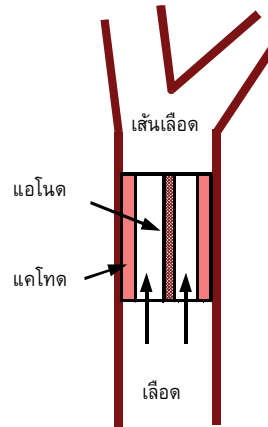
6.2 เป็นแหล่งพลังงานในเครื่องมือทางการแพทย์ที่ฝังในร่างกาย

มีการออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ขนาดเล็กแค่ 0.07 ตารางเซนติเมตร เพื่อใช้ในระบบการขนส่งยาระดับไมโคร (microscopic drug-delivery system) โดยเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์สามารถสร้างศักย์ไฟฟ้าได้ 300 ไมโครโวลต์ ได้เป็นเวลานานถึง 2 ชั่วโมง เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์สามารถใช้เป็นแหล่งพลังงานให้แก่เครื่องมือทางการแพทย์ที่ต้องฝังในร่างกายได้ และสามารถช่วยในการขนส่งยาให้กับผู้ป่วยที่ต้องการยาในปริมาณสม่ำเสมอ เช่น ผู้ป่วยโรคเอดส์ นอกจากนี้เรื่องขนาดของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีขนาดเล็กแล้ว ระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ยังมีลักษณะเฉพาะตัวคือสามารถใช้น้ำตาลกลูโคส ซึ่งคือน้ำตาลที่มีอยู่ในกระแสเลือดเป็นเชื้อเพลิงได้ [24] ดังแสดงในรูปที่ 6

เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์สามารถใช้ในการขับเคลื่อนให้เครื่องมือต่าง ๆ ทำงานภายในร่างกาย เช่น เครื่องควบคุมจังหวะการเต้นของหัวใจ (pacemaker) เครื่องวัดระดับน้ำตาล รวมถึงเครื่องฉีดอินซูลินขนาดเล็กที่ฝังไว้ในร่างกายของผู้ป่วยโรคเบาหวาน

เป็นที่ทราบกันว่า เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ให้ความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าต่ำแต่เสถียร จึงเหมาะที่จะใช้ขับเคลื่อนเครื่องมือที่สร้างโดยใช้เทคโนโลยี MEMS (Micro

electromechanical systems) นักวิจัยจากมหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนีย ใช้เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ขนาดเล็กร่วมกับเทคโนโลยี MEMS ในการขับเคลื่อนเครื่องมือทางการแพทย์ เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้รีเซมแบตเตอรี่เป็นแหล่งกำลัง พบว่า เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์มีขนาดเล็กกว่า ราคาถูกกว่าและอายุการใช้งานยาวนานกว่า [1]



รูปที่ 6 เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แปะติดโดยตรงกับเส้นเลือด (ดัดแปลงจาก Shukla et al. [1])

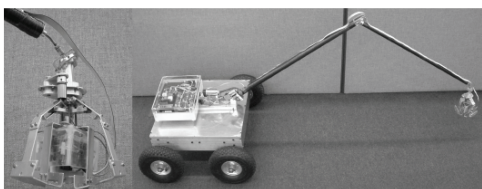
จะเห็นได้ว่าการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ระดับไมโครกุลมีประโยชน์อย่างมาก อาจประยุกต์ใช้เพื่อส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าเพื่อกำจัดเนื้องอกและเซลล์มะเร็งในอนาคต

6.3 หุ่นยนต์

มีการสร้างหุ่นยนต์ที่ขับเคลื่อนโดยใช้กำลังจากการย่อยอาหาร (digestion) ในถึงปฏิกรณ์ชีวภาพ หุ่นยนต์นี้เรียกว่า Gastrobot เมื่อหมักยีสต์ในสารละลายที่อุดมด้วยคาร์โบไฮเดรตในถึงปฏิกรณ์ชีวภาพ จะมีการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา และนำเอาแรงดันจากคาร์บอนไดออกไซด์ไปใช้ในการขับเคลื่อนหุ่นยนต์ [25]

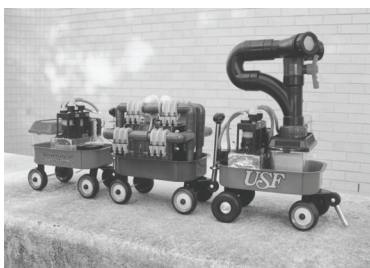
Kelly [26] นักวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีแคลิฟอร์เนีย ประเทศสหรัฐอเมริกา ได้พัฒนาหุ่นยนต์ SlugBot (รูปที่ 7) ซึ่งเป็นหุ่นยนต์ที่ใช้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากทาก (slug) เช่น *Deroceras reticulatum* ซึ่งทากเป็นสัตว์ที่เคลื่อนที่ได้ช้า มีขนาดค่อนข้างใหญ่ และเป็นศัตรูพืชที่พบทั่วไปในพื้นที่เกษตรกรรมในสหรัฐอเมริกา เกษตรกรต้องใช้เงินปีละประมาณ 20 ล้านดอลลาร์เพื่อซื้อและยากำจัด ทากพวกนี้มีศักยภาพที่จะใช้เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการหมักเพราะไม่มีเปลือกหุ้มแข็งและมีความชื้นสูง หุ่นยนต์ SlugBot ได้รับกำลังจากถังหมักทากโดยใช้

แบตเตอรี่แบบอัดประจุ หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปในบริเวณที่มี ทาก เมื่อตรวจเจอทาก จะใช้นิ้วจับทากซึ่งมีจำนวน 3 นิ้ว จับทากใส่ลงในภาชนะบรรจุ เมื่อภาชนะบรรจุทากเต็ม หุ่นยนต์จะเดินทางกลับไปที่ถังหมักทากและป้อนทากที่จับ ได้ลงไปถังหมัก หรือเมื่อหุ่นยนต์ต้องการกำลัง ก็จะ เดินทางกลับไปที่ถังหมักเพื่อทำการอัดประจุแบตเตอรี่ใหม่



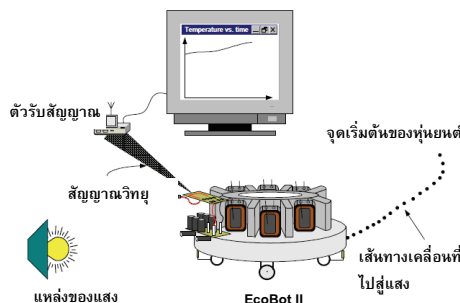
รูปที่ 7 หุ่นยนต์ SlugBot ภาพซ้ายแสดงนิ้วจับของหุ่นยนต์ ภาพขวาแสดงแขนของหุ่นยนต์ที่เชื่อมต่อกับตัว หุ่นยนต์ [26]

Wilkinson [25] นักวิจัยจากมหาวิทยาลัยเซาท์ ฟลอริดา (South Florida) ประเทศสหรัฐอเมริกา เป็นผู้ซึ่ง สนใจทางด้านการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพไฮบริด ได้ พัฒนาหุ่นยนต์ Gastronome (Chew Chew) ซึ่งได้รับกำลัง จากเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ หุ่นยนต์นี้ประกอบด้วยรถ 3 คัน เชื่อมต่อกันคล้ายรถไฟ ดังแสดงในรูปที่ 8 รถคันหน้า บรรทุกถังแอมโมเนีย (กระเพาะอาหาร) บั๊มกระเพาะอาหาร (gastric pump) ระบบป้อนและระบายใจ (venting) มอเตอร์ ขับเคลื่อน และวงจรควบคุมทางอิเล็กทรอนิกส์ รถคันกลาง ประกอบด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ที่มี *E. coli* เป็นตัวเร่ง ปฏิริยาทางชีวภาพ จำนวน 6 เซลล์ ส่วนรถคันหลัง บรรทุกถังออกซิเจน (ปอด) บั๊มหัวใจ และแบตเตอรี่ชนิด นิกเกิล-แคดเมียม มีการป้อนน้ำตาลก้อนลงในถังกระเพาะ อาหาร เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 8 หุ่นยนต์ต้นแบบพลังงานเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ Chew Chew [25]

นักวิจัยจากมหาวิทยาลัยเวสต์ออฟอิงแลนด์ (West of England) ประเทศอังกฤษ ได้พัฒนาหุ่นยนต์ EcoBot II [27] ในตัวหุ่นยนต์ประกอบด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุ ลินทรีย์ที่มีขั้วแคโทดแบบออกซิเจน จำนวน 8 เซลล์ จุลินท รีย์ที่ใช้คือกลุ่มจุลินทรีย์จากกากตะกอนเร่งของเสีย (activated sewage sludge) สารตั้งต้นที่ใช้ได้แก่แมลงวัน แบคที่เรียกที่อยู่ภายในกากตะกอนเร่งของเสียจะทำหน้าที่ ย่อยสลายเปลือกหุ้มตัวแมลงวันที่ประกอบไปด้วยสารไค ดิน (chitin) ในสภาวะไร้อากาศ และจะมีการปลดปล่อย อิเล็กตรอนออกมา อิเล็กตรอนที่ได้จะนำไปผลิตกระแส ไฟฟ้าให้แก่หุ่นยนต์ โดยที่หุ่นยนต์กินแมลงวัน 8 ตัว สามารถเดินเครื่องทำงานได้ 12 วัน ในตัวหุ่นยนต์ มีการติดตั้งอุปกรณ์บันทึกข้อมูลและตัวรับรู้ (sensor) สิ่งแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ระดับสารพิษ หรือ ความชื้น ไว้ ภายในหุ่นยนต์ เมื่อหุ่นยนต์ตอบสนองต่อสิ่งเร้าจะมีการ ประมวลผลและสามารถสื่อสารได้ด้วยการส่งข้อมูลด้วย สัญญาณไร้สายกลับมาที่สถานีฐาน รูปที่ 9 แสดงการ ทดลองใช้หุ่นยนต์ตรวจวัดอุณหภูมิ โดยหุ่นยนต์จะเคลื่อนที่ เข้าหาแหล่งของแสง และส่งสัญญาณไร้สายกลับมายัง สถานี เป้าหมายของงานวิจัยนี้คือการมุ่งพัฒนาหุ่นยนต์ที่ สามารถเคลื่อนที่และทำงานได้ด้วยตัวเองอย่างสมบูรณ์ เพื่อให้สามารถนำไปใช้ในพื้นที่เสี่ยงภัย เช่น ในสถานที่ซึ่ง เต็มไปด้วยแก๊สพิษหรือหุ่นระเบิด เป็นต้น



รูปที่ 9 หุ่นยนต์ EcoBot II เคลื่อนที่ไปสู่แหล่งของแสงและ ส่งสัญญาณอุณหภูมิไปยังสถานีฐาน (ดัดแปลง จาก Ieropoulos et al., [28])

6.4 การกำจัดน้ำเสีย

การประยุกต์ใช้เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ที่สำคัญ อีกด้านหนึ่ง คือการใช้งานในด้านวิศวกรรมน้ำเสีย จุลินท รีย์สามารถใช้สารประกอบอินทรีย์ในน้ำเสียเพื่อผลิต กระแสไฟฟ้าได้ โดยจุลินทรีย์จะออกซิไดซ์สารประกอบ

อินทรีย์ในน้ำเสีย และปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมา เพื่อใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า Liu และคณะ [29] รายงานว่าสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ 26 มิลลิวัตต์ต่อตารางเมตร พร้อมกับลดค่าซีโอดี (chemical oxygen demand, COD) ของน้ำเสียได้ถึงร้อยละ 80 โดยการใช้เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องเดี่ยว ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์มีศักยภาพในการใช้เพื่อกำจัดน้ำเสีย

7. บทสรุป

เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์เป็นแหล่งพลังงานทดแทนใหม่ที่น่าสนใจที่สามารถนำมาใช้ทดแทนพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลที่มีราคาสูงและเหลือน้อยในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถผลิตพลังงานจากวัตถุดิบหลากหลายประเภท อีกทั้งยังเป็นพลังงานสะอาด แม้ว่าในปัจจุบันเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์จะยังอยู่ในระหว่างขั้นตอนของการพัฒนา แต่ด้วยจุดเด่นที่กล่าวมาทั้งหมด เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ จึงน่าจะเข้ามามีบทบาทในการปฏิวัติวงการพลังงานในอนาคตอันใกล้

8. บรรณานุกรม

- [1] Shukla, A.K. and et al. 2004. **Biological fuel cells and their applications**. Current Science 87(4): 455-468.
- [2] Liu, Hong 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 & Technology** 38:4040-4046.
- [3] Liu, H. and et al. 2005. "Production of electricity from acetate or butyrate in a single chamber microbial fuel cell". **Environmental Science & Technology** 39:658-662.
- [4] Heilmann, J. and Logan, B E. 2006. **Production of electricity from proteins using a single chamber microbial fuel cell**. Water Environment Research 78:531-537.
- [5] Min, B. and et al. 2005. "Electricity generation from animal wastewater using microbial fuel cells". **Water Research** 39:4961-4968.
- [6] Piccolina, M. 1998. **Animal electricity and the birth of electrophysiology: The legacy of the Luigi Galvani**. Brain Research Bulletin 46:381-403.
- [7] Du, Z., Li, H., and Gu, T. 2007. "A State of the art review on microbial fuel cells: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy". **Biotechnology Advances** 25:464-482.
- [8] Cohen, B. 1931. "The bacterial culture as an electrical half-cell". **Journal of Bacteriology** 21:18-19.
- [10] Bennetto, H.P. and et al. 1981. "Rates of reduction of phenothiazine redox dyes by *E. coli*". **Chemistry and Industry** 776-778.
- [11] Karube, I. and et al. 1986. "Photochemical energy conversion using immobilized blue-green algae". **Journal of Biotechnology** 4:73-80.
- [12] Chaudhuri, S.K. and Lovely, D.R. 2003. "Electricity generation by direct oxidation of glucose in mediator-less microbial fuel cells". **Nature Biotechnology** 21:1229-1232.
- [13] Khanal, S.K. 2008. **Anaerobic Biotechnology for Bioenergy Production Principles and Applications**. Singapore: Fabulous Printers Pte Ltd.
- [14] Magnuson, T.S. and et al. 2001. "Isolation, characterization and gene sequence analysis of a membrane-associated 89 kDa Fe(III) reducing cytochrome c from *Geobacter sulfurreducens*". **Biochemical Journal** 359:147-152.
- [15] Myers, C.R. and Myers, J.M. 1992. "Localization of cytochromes to the outer membrane of anaerobically grown *Shewanella putrefaciens* MR-1". **Journal of Bacteriology** 174:3429-3438.

- [16] Park, D.H. and Zeikus, J.G. 2003. **Improved fuel cell and electrode designs for producing electricity from microbial degradation.** *Biotechnology and Bioengineering* 81:348-355.
- [17] Rabaey, K. and et al. 2004. **Biofuel cells select for microbial consortia that self-mediate electron transfer.** *Applied and Environmental Microbiology* 70:5373-5382.
- [18] Gorby, Y.A. and et al. 2006. "Electricity conductive bacterial nanowires produced by *Shewanella oneidensis* strain MR-1 and other microorganisms". **Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America** 103(30):11358-11363.
- [19] Reguera, G. and et al. 2005. **Extracellular electron transfer via microbial nanowires.** *Nature* 435:1098-1101.
- [20] Oh, S.E. and Logan, B.E. 2006. "Proton exchange membrane and electrode surface areas as factors that affect power generation in microbial fuel cells". **Applied Microbiology and Biotechnology** 70:162-169.
- [21] Shukla, A.K., Avery, N.R. and Muddle, B.C. 1999. **Future cars: The electric option.** *Current Science* 77:1141-1146.
- [22] Reimer, C.E. and et al. 2001. **Harvesting energy from the marine sediment-water interface.** *Environmental Science & Biotechnology* 35:192-195.
- [23] Lovely, D.R. 2006. "Microbial fuel cells: Novel microbial physiologies and engineering approaches". **Current Opinion in Biotechnology** 17:327-332.
- [24] Haselkorn, A. 2002. **Microbial fuel cells to power future.** *Daily Californian*, Berkeley, California, 28 August 2002.
- [25] Wilkinson, S. 2000. **Gastrobots-benefits and challenges of microbial fuel cells in food powered robot applications.** *Autonomous Robots* 9:99-111.
- [26] Kelly, L. 2003. "The Design of a robotic predator: The SlugBot". **Robotica** 21:399-406.
- [27] Melhuish, C. and et al. 2006. "Energetically autonomous robots: Food for thought". **Auton Robot** 21:187-198.
- [28] Ieropoulos, L. and et al. 2004. "Energy autonomy in robots through microbial fuel cells". <http://biro-net.aber.ac.uk/newsletters/ecobotnl32004.pdf>. 10 April.
- [29] Liu, H., Ramnarayanan, R. and Logan, B.E. 2004. "Production of electricity during waste water treatment using a single chamber microbial fuel cell". **Environmental Science & Technology** 38:2281-2285.