



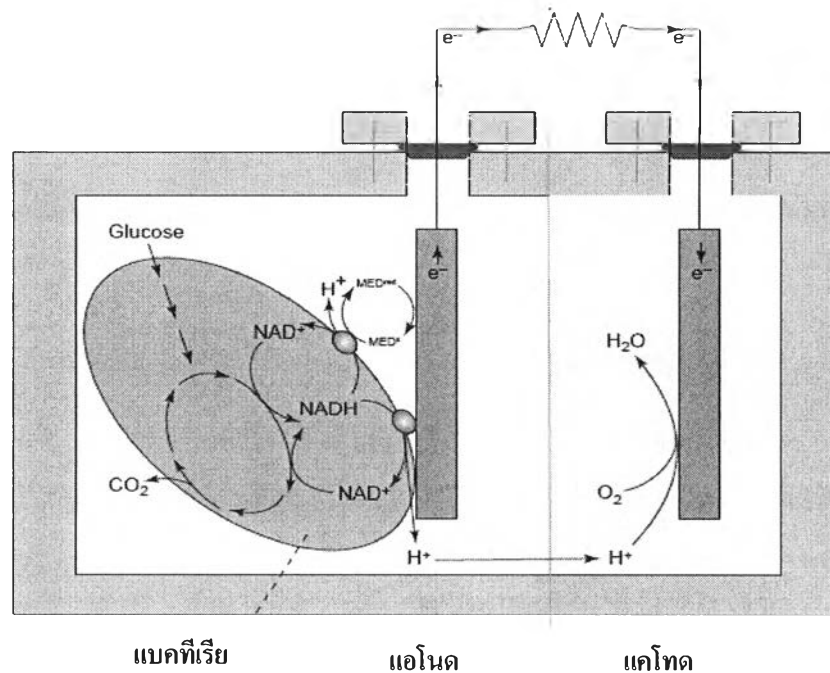
ปรีทรรศน์วรรณกรรม

2.1 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์

เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์เป็นวิทยาการที่ค้นพบครั้งแรกในปี 1911 โดย Potter ได้กล่าวไว้ว่า “การย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์นั้นจะดำเนินไปคู่กับการปล่อยพลังงานไฟฟ้าอย่างอิสระ” แต่ผลงานกลับไม่ได้รับความสนใจ จนกระทั่งในช่วงปี 1990 เป็นช่วงที่เซลล์เชื้อเพลิงได้รับความนิยมเป็นอย่างมากเนื่องจากวิกฤตพลังงาน เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์จึงได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นด้วย (Logan, 2007)

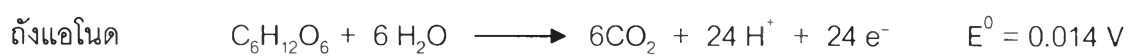
เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์เป็นการเปลี่ยนพลังงานเคมีในสารอินทรีย์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยมีจุลินทรีย์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Bond และคณะ, 2002) กระบวนการสร้างพลังงานของจุลินทรีย์เริ่มจากการย่อยสลายโมเลกุลสารอาหาร ปฏิกิริยาเอนไซม์ต่างๆ ในกระบวนการหายใจจะปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมาในเซลล์เพื่อสร้างพลังงาน ซึ่งจะถูกเก็บอยู่ในรูปสารตัวกลาง เช่น NADH FADH ไฮโดรเจน เป็นต้น เมื่อสารตัวกลางถูกออกซิไดซ์อิเล็กตรอนก็จะถูกส่งต่อเป็นทอดๆ ในกระบวนการขนส่งอิเล็กตรอน ซึ่งระหว่างนั้นก็จะให้พลังงานแก่จุลินทรีย์ โดยอิเล็กตรอนที่ถูกปล่อยออกมานั้นจะถูกส่งต่อให้แก่ตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายต่อไป เช่น ออกซิเจนรับอิเล็กตรอนแล้วรวมกับโปรตอนกลายเป็นน้ำ ตัวรับอิเล็กตรอนมีหลายตัวนอกจากออกซิเจนแล้วยังมี ไนเตรท ซัลเฟต คาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น ซึ่งพบว่ามีแบคทีเรียบางชนิดที่สามารถถ่ายเทอิเล็กตรอนออกนอกเซลล์ไปยังตัวรับอิเล็กตรอนภายนอกได้ จากหลักการนี้เองจึงเป็นแนวคิดให้ใช้ขั้วไฟฟ้าแอนโอดมาเป็นตัวรับอิเล็กตรอน (Logan, 2007)

หลักการทำงานของระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ทั่วไปสามารถอธิบายได้ คือ เมื่อจุลินทรีย์ย่อยสลายสารอาหารที่ให้ในห้องแอนโอด อิเล็กตรอนที่ถูกปล่อยออกมาจากการย่อยสลายสารอินทรีย์จะเคลื่อนที่เข้าสู่ขั้วไฟฟ้าแอนโอดไหลไปยังขั้วไฟฟ้าแคโทดผ่านวงจรภายนอก ขณะเดียวกันโปรตอนที่เกิดขึ้นจะแพร่ผ่านเยื่อเลือกผ่านประจุบวกไปยังขั้วไฟฟ้าแคโทดในห้องแคโทด (Bond และ Lovely, 2003) จากนั้น อิเล็กตรอน โปรตอน และออกซิเจน เกิดปฏิกิริยารวมกันกลายเป็นน้ำในห้องแคโทด (รูปที่ 2.1) (Bond และคณะ, 2002)



รูปที่ 2.1 ภาพแสดงปฏิกิริยาการทำงานของระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ (Rabaey และ Verstraete, 2005) แบคทีเรียย่อยสลายสารอินทรีย์ผลิตอิเล็กตรอนและโปรตอน อิเล็กตรอนไหลเข้าสู่ขั้วไฟฟ้าแอโนดเพื่อไปยังห้องแคโทดผ่านวงจรภายนอก ขณะที่โปรตอนไหลผ่านเยื่อเลือกผ่านประจุบวกไปยังห้องแคโทด จากนั้นอิเล็กตรอน โปรตอน และออกซิเจน เกิดปฏิกิริยารวมกันกลายเป็นน้ำ

ปฏิกิริยาในเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์จากการย่อยสลายกลูโคส (Shukla และคณะ, 2004) จะได้เป็น



2.2 กระบวนการหายใจของจุลินทรีย์

กระบวนการสร้างและสลายหรือเมตาบอลิซึม (Metabolism) เป็นปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นภายในเซลล์จะประกอบด้วย 2 กระบวนการ คือ กระบวนการสร้างหรือแอนาบอลิซึม (anabolism) เป็นการสร้างสารโมเลกุลใหญ่จากสารที่ได้จากการย่อยสลาย เป็นกระบวนการที่ต้องใช้พลังงานช่วย มีผลทำให้เกิดการสร้างส่วนต่างๆของเซลล์ ทำให้เซลล์มีการเจริญเติบโต และอีกกระบวนการคือ กระบวนการสลายหรือแคแทบอลิซึม (Catabolism) เป็นการย่อยสลายอาหารโมเลกุลใหญ่ให้เล็กลง เพื่อเป็นวัตถุดิบในการสร้างส่วนต่างๆ ของเซลล์ และสร้างพลังงานโดยกระบวนการหายใจ

การหายใจ (Respiration) เป็นการเปลี่ยนแปลงแบบออกซิเดชันรีดักชันภายในเซลล์เพื่อเปลี่ยนสารโมเลกุลใหญ่ให้เป็นสารโมเลกุลเล็ก และได้พลังงานออกมาระหว่างกระบวนการหายใจแบ่งออกเป็น 3 แบบ คือ

2.2.1 การหายใจแบบใช้ออกซิเจน (Aerobic respiration)

การหายใจแบบใช้ออกซิเจนเป็นการเปลี่ยนสารอาหารโดยเฉพาะกลูโคส ให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ โดยใช้ออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายในกระบวนการขนส่งอิเล็กตรอน ซึ่งจะให้พลังงานเกิดขึ้นมาก กระบวนการหายใจจะเกิดขึ้น 3 ขั้นตอน คือ

ไกลโคไลซิส (Glycolysis) เป็นกระบวนการที่เกิดโดยไม่ต้องใช้ออกซิเจนกระบวนการนี้มี 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการเปลี่ยนสารประกอบคาร์บอน 6 อะตอม (กลูโคส) ให้กลายเป็นสารประกอบคาร์บอน 3 อะตอม และขั้นตอนการเปลี่ยน สารประกอบคาร์บอน 3 อะตอม ให้เป็นกรดไพรูวิก และได้พลังงาน ATP 2 โมเลกุล กับ NADH_2 2 โมเลกุล

วัฏจักรเครบส์ (Krebs cycles) เป็นปฏิกิริยาต่อเนื่องกันเพื่อให้ได้พลังงาน ATP NADH_2 และ FADH_2 และได้สารตัวกลางหลายชนิด เช่น กรดออกซาลออะซิติก เพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์กรดอะมิโน พิวรีน พิริมิดีน เป็นต้น ก่อนเข้าสู่วัฏจักรเครบส์จะเกิดกระบวนการดีคาร์บอกซิเลชัน (decarboxylation) โดยกรดไพรูวิก 1 โมเลกุล จะรวมตัวกับโคเอนไซม์เอ (CoASH) ได้อะซิติลโคเอนไซม์เอ (acetyl coenzyme A) โดยมี NAD^+ มารับอิเล็กตรอนกลายเป็น NADH_2

กระบวนการขนส่งอิเล็กตรอน หรือ ลูกลูการหายใจเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันรีดักชันที่เกิดขึ้นเป็นลูกลูอย่างต่อเนื่อง โดยใช้เอนไซม์และโคเอนไซม์หลายชนิด ได้แก่ NAD (Nicotinamide Adenine Dinucleotide) NADP^+ (Nicotinamide Adenine Dinucleotide Phosphate) FAD (Flavin Adenine Dinucleotide) FMN (Flavin Mononucleotide) ยูบิควินโอน (Ubiquinone) ไซโตโครม (Cytochrome) นำอิเล็กตรอนจาก NADH_2 และ FADH_2 ไปให้อิเล็กตรอนตัวสุดท้าย ซึ่งก็คือ ออกซิเจน (นงลักษณ์ สุวรรณพินิจและปรีชา สุวรรณพินิจ, 2547)

2.2.2 การหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic respiration)

การหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจนเป็นการหายใจที่ใช้สารอินทรีย์อื่นๆ เช่น ซัลเฟต ไนเตรต คาร์บอนเนต เป็นตัวรับอิเล็กตรอนแทนออกซิเจน (นงลักษณ์ สุวรรณพินิจและปรีชา สุวรรณพินิจ, 2547) ดังนั้นในเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์จึงจัดเป็นการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน เพราะเป็นการใช้ตัวรับไฟฟ้าแอนโดมารับอิเล็กตรอนแทนออกซิเจน

2.2.3 กระบวนการหมัก (Fermentation)

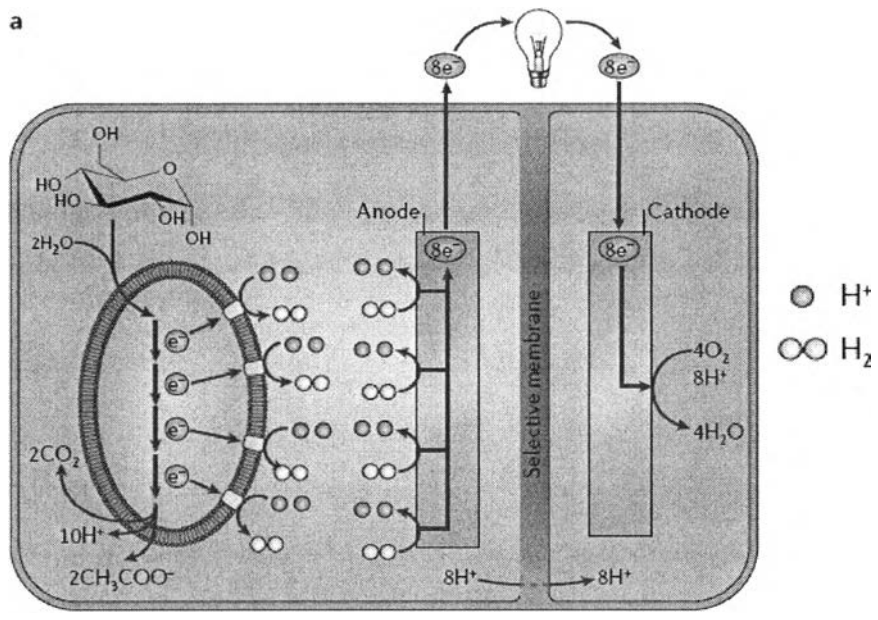
กระบวนการหมักเป็นการสร้างพลังงานที่เกิดขึ้นในไซโทพลาสซึม โดยใช้กรดไพรูวิกจากไกลโคไลซิสเป็นสารตั้งต้น มีสารอินทรีย์เป็นทั้งตัวรับและตัวให้อิเล็กตรอน ซึ่งต่างจากการหายใจแบบใช้ออกซิเจนที่ใช้ออกซิเจนซึ่งเป็นสารอินทรีย์เป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้าย กระบวนการนี้จะเกิดการออกซิเดชันเพียงบางส่วนของคาร์บอนอะตอมของสารอินทรีย์และเกิดพลังงานขึ้นเล็กน้อยเท่านั้น โดยจะได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายหลายชนิดขึ้นอยู่กับชนิดของจุลินทรีย์ ซึ่งโมเลกุลของผลผลิตนั้นๆ ยังมีพลังงานอยู่มาก (นงลักษณ์ สุวรรณพินิจและปรีชา สุวรรณพินิจ, 2547)

2.3 กลไกในการส่งถ่ายอิเล็กตรอนแก่ตัวรับไฟฟ้า

กระบวนการถ่ายเทอิเล็กตรอนที่ตัวรับไฟฟ้าต่างจากการถ่ายเทอิเล็กตรอนตามธรรมชาติที่ใช้เฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+} reduction) เป็นตัวรับอิเล็กตรอน ซึ่งจะทำให้เกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนให้แก่ตัวรับไฟฟ้ามากกว่าตัวรับอิเล็กตรอนตามธรรมชาติ (Bond และคณะ, 2002) กลไกการถ่ายเทอิเล็กตรอนแก่ตัวรับไฟฟ้า ล้วนมีพื้นฐานว่าดังนี้

2.3.1. การถ่ายเทอิเล็กตรอนผ่านปฏิกิริยารีดิวซ์สารที่ตัวแอนโด

การศึกษาการผลิตกระแสไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ช่วงแรก พบว่าการหมักของจุลินทรีย์จะเกิดการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ให้อิเล็กตรอนที่บริเวณผิวหน้าของตัวรับไฟฟ้าแอนโด โดยผลิตภัณฑ์สุดท้ายอาจได้เป็นไฮโดรเจน แอลกอฮอล์ แอมโมเนีย จากการศึกษาพบว่าการผลิตกระแสไฟฟ้าจากกลไกนี้ไม่ค่อยมีประสิทธิภาพนัก เนื่องจากในกระบวนการหมักจะเกิดผลิตภัณฑ์หลายชนิดโดยเฉพาะกรดอินทรีย์ซึ่งมีผลทำให้ปฏิกิริยาที่ตัวรับไฟฟ้าดำเนินไปอย่างช้ามาก แสดงภาพประกอบดังรูปที่ 2.

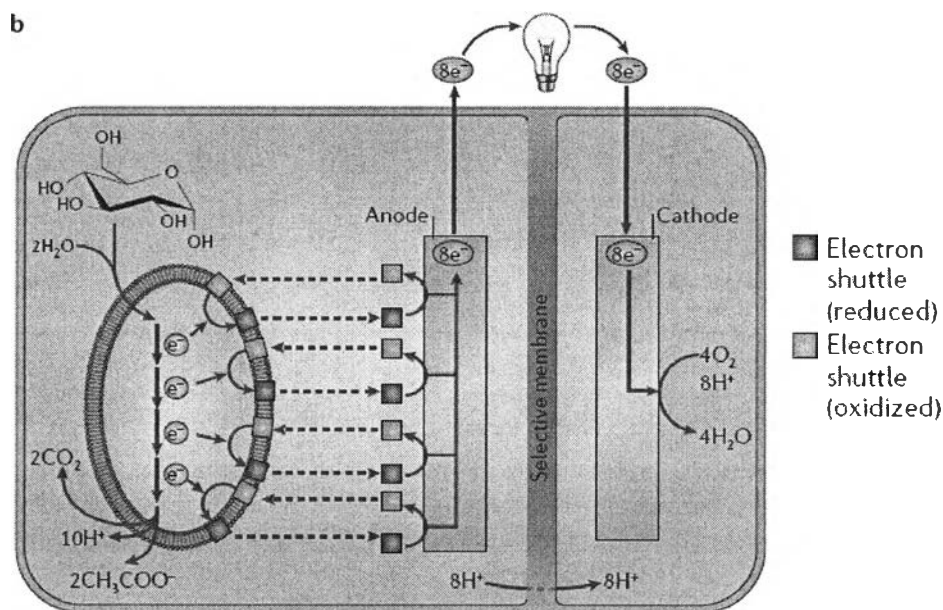


รูปที่ 2.2 ภาพแสดงการถ่ายทอดอิเล็กตรอนทางอ้อมผ่านปฏิกิริยาการรีดิวซ์สารแก่ขั้วไฟฟ้าแอโนด โดยไฮโดรเจนเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้จากกระบวนการหมักของจุลินทรีย์ ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าแอโนดผลิตอิเล็กตรอนและโปรตอน (Bond และคณะ, 2002)

2.3.2. ตัวกลางสังเคราะห์สำหรับช่วยในการขนส่งอิเล็กตรอน

มีการสังเคราะห์ตัวกลางนำพาอิเล็กตรอน (mediator) เพื่อขนส่งอิเล็กตรอนไปยังขั้วไฟฟ้าแอโนด ตัวกลางนี้มีความสามารถในการลอดผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ซึ่งเป็นบริเวณที่รับอิเล็กตรอนจากตัวขนส่งอิเล็กตรอนภายในเซลล์ และเป็นบริเวณที่อิเล็กตรอนจะออกจากเซลล์เพื่อถ่ายทอดให้ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าแอโนด โดยทั่วไปเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์นิยมใช้จุลินทรีย์ ได้แก่ *Escherichia coli* พวก *Pseudomonas* พวก *Proteus* และ พวก *Bacillus* ซึ่งเป็นพวกไม่มีประสิทธิภาพในการถ่ายทอดอิเล็กตรอนจากกระบวนการเมตาบอลิซึมออกนอกเซลล์ได้ ดังนั้นการใช้ตัวกลางสังเคราะห์ขนส่งอิเล็กตรอนจึงเป็นส่วนสำคัญที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าให้แก่เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ (Rabaey และ Verstraete, 2005) แสดงภาพประกอบดังรูปที่ 2.3

โดยทั่วไปตัวกลางนำพาอิเล็กตรอนสังเคราะห์ที่นิยมใช้ ได้แก่ neutral red thionine benzylviologen phenazines phenothiazines phenoxazines iron chelates 2,6-dichlorophenolindophenol และ 2-hydroxy-1,4-naphthoquinone



รูปที่ 2.3 ภาพแสดงตัวกลางนำพาจะรับอิเล็กตรอนจากเซลล์และถ่ายทอดให้แก่ขั้วไฟฟ้าแอโนด โดยสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ทั้งรีดักชันและออกซิเดชัน จึงสามารถใช้หมุนเวียนได้ (Bond และคณะ, 2002)

นอกจากข้อดีในการช่วยขนส่งอิเล็กตรอนให้แก่จุลินทรีย์แล้ว ตัวกลางนำพาอิเล็กตรอนยังสามารถช่วยในการเก็บพลังงานไว้สำหรับการเจริญของจุลินทรีย์ ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญเนื่องจากการสันดาปที่ไม่สมบูรณ์ของจุลินทรีย์ในเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ และการใช้ตัวกลางนำพาอิเล็กตรอนก็ยังสามารถประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมที่เป็นกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่องหรือกึ่งต่อเนื่องได้อีกด้วย แต่ก็พบว่าข้อเสียคือตัวกลางนำพาอิเล็กตรอนส่วนใหญ่เป็นพิษต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม

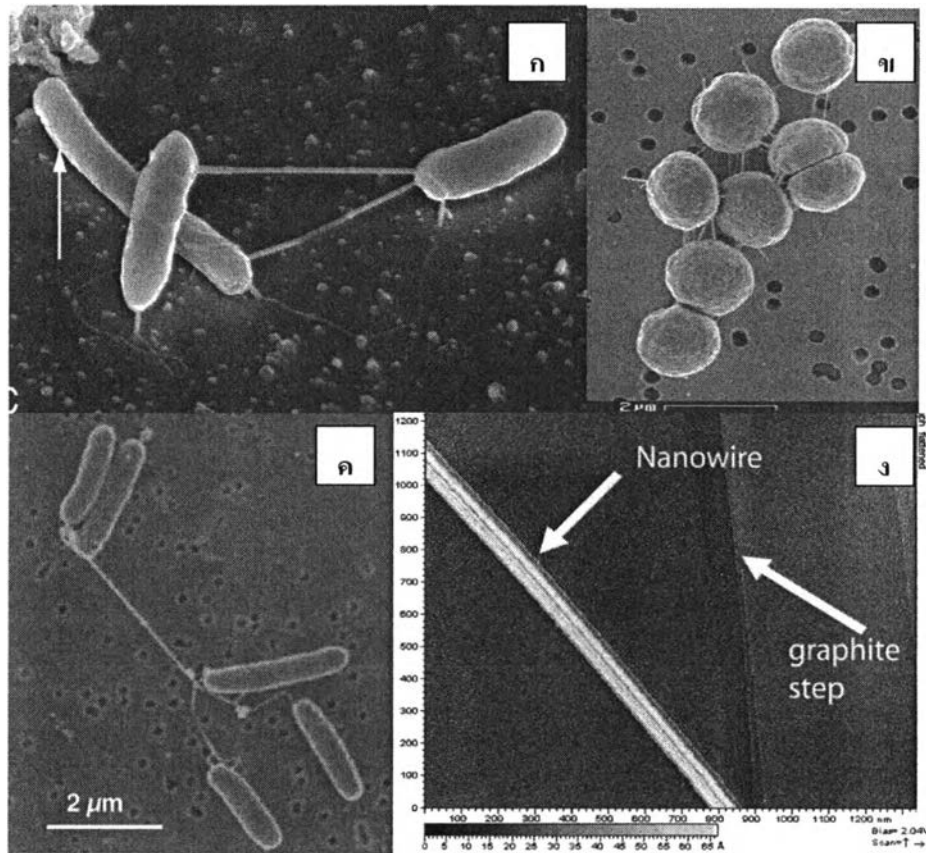
2.3.3. จุลินทรีย์ผลิตตัวกลางนำพาอิเล็กทรอนิกส์ตนเอง

จุลินทรีย์อาจจะสามารถผลิตตัวกลางนำพาอิเล็กทรอนิกส์ตนเองได้ เพื่อช่วยในการถ่ายโอนอิเล็กทรอนิกส์นอกเซลล์ เช่น ไพโคไซอะนิน (pycocyanin) ที่ผลิตจากจุลินทรีย์ *Pseudomonas aeruginosa* (Rabeay, 2005b) นอกจากนี้มีงานวิจัยที่ทำการศึกษากลุ่มจุลินทรีย์ที่สันนิษฐานว่าสามารถผลิตตัวกลางนำพาอิเล็กทรอนิกส์ตนเองได้ ได้แก่ จุลินทรีย์พวก *Shewanella oneidensis* และพวก *Geothrix fermentans* เป็นต้น (Bond และคณะ, 2002)

2.3.4. ถ่ายทอดอิเล็กทรอนิกส์โดยตรงที่ขั้วไฟฟ้า

จุลินทรีย์อาจจะสามารถถ่ายทอดอิเล็กทรอนิกส์ได้โดยตรงที่บริเวณผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า เช่น ในการศึกษาการผลิตกระแสไฟฟ้าของจุลินทรีย์สกุล *Shewanella* ที่เพาะเลี้ยงด้วยกรดแลคติก มีสมมุติฐานว่าอิเล็กทรอนิกส์จะถูกถ่ายทอดโดยตรงจากเซลล์ให้ขั้วไฟฟ้าโดยไซโตโครมซีที่เยื่อหุ้มเซลล์ชั้นนอกแต่ยังไม่พบข้อมูลสนับสนุน โดยเป็นที่ยอมรับว่าไซโตโครมซีที่เยื่อหุ้มเซลล์ชั้นนอกมีความสำคัญต่อการรับอิเล็กทรอนิกส์ของตัวขนส่งอิเล็กทรอนิกส์ในจุลินทรีย์สกุล *Shewanella* แต่ก็พบข้อโต้แย้งว่าความหนาแน่นของเซลล์ที่เพิ่มขึ้นบริเวณขั้วไฟฟ้าอาจเป็นเพียงการเจริญของเซลล์มากกว่าจะสัมผัสโดยตรงต่อขั้วไฟฟ้า เพราะมีเพียงแคบบางเซลล์เท่านั้นที่สัมผัสกับขั้วไฟฟ้า (Bond และคณะ, 2002) ยังมีการศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องการรีดักชันเฟอร์ริกและตัวพาอิเล็กทรอนิกส์ที่เยื่อหุ้มเซลล์ของจุลินทรีย์สกุล *Shewanella* แต่ก็ยังไม่สามารถอธิบายกลไกที่แบคทีเรียถ่ายทอดอิเล็กทรอนิกส์สู่ขั้วไฟฟ้าได้ (Logan, 2007)

นอกจากนี้มีการศึกษาพบ นาโนไวร์ (nanowire) หรือพิล (pili) คือส่วนรยางค์ที่ยื่นออกมานอกผนังเซลล์จุลินทรีย์ โดยในปี 2006 Gorby และคณะได้ทำการศึกษานำไฟฟ้าของรยางค์ที่ยื่นออกมาของแบคทีเรียบางชนิดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กทรอนิกส์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy หรือ SEM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กทรอนิกส์ (Scanning tunneling microscopy หรือ STM) พบว่านาโนไวร์ในจุลินทรีย์สกุล *Geobacter* และ *Shewanella* มีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ (Gorby และคณะ, 2005)



รูปที่ 2.4 ภาพแสดงนาโนไวร์ของจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน 2 ชนิด (Gorby และคณะ, 2005)

รูป ก. แสดงภาพนาโนไวร์ของจุลินทรีย์ *Pelotomaculum thermopropionicum* โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิด SEM

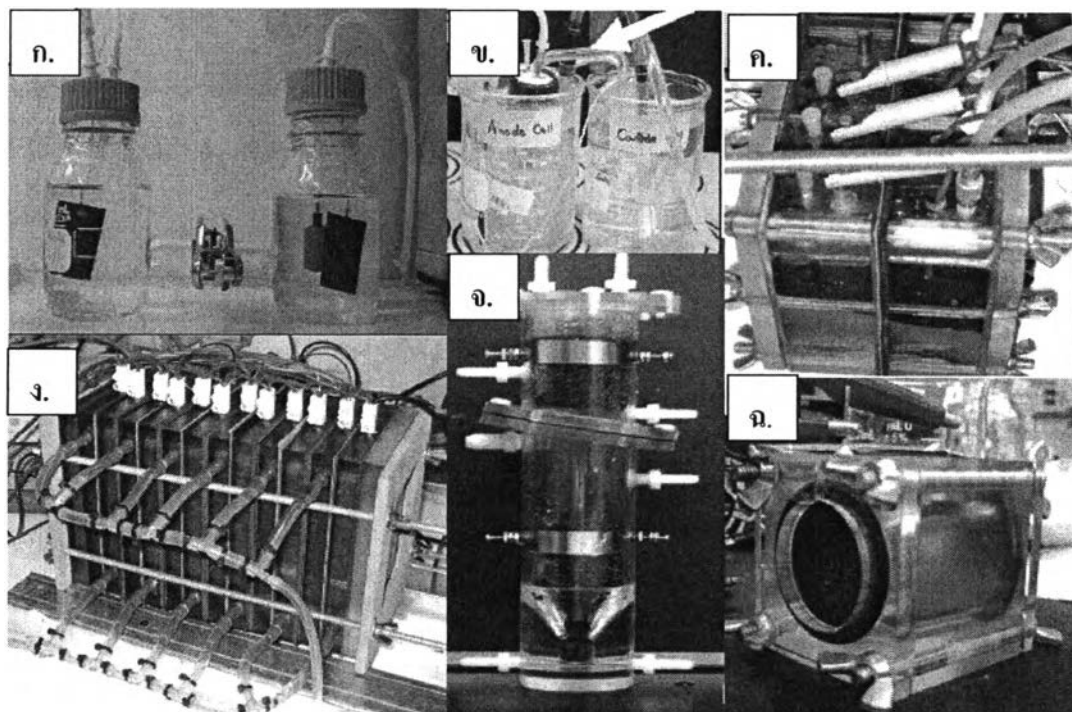
รูป ข. แสดงภาพนาโนไวร์ของจุลินทรีย์สกุล *Synechocystis* โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิด SEM

รูป ค. แสดงภาพนาโนไวร์ในจุลินทรีย์ *Shewanella oneidensis* MR-1 โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิด SEM

รูป ง. แสดงภาพนาโนไวร์ของ *Shewanella oneidensis* MR-1 โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิด STM

2.4 รูปแบบของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์

การศึกษาเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์เกิดขึ้นอย่างกว้างขวาง มีหลายงานวิจัยที่สนใจศึกษา รูปแบบและโครงสร้างของเซลล์เชื้อเพลิงแบบต่างๆ เพื่อปรับปรุงโครงสร้างให้มีประสิทธิภาพสูงสุด



รูปที่ 2.5 ภาพแสดงรูปร่างลักษณะของเซลล์เชื้อเพลิงประเภทต่างๆ (Logan และคณะ, 2006)

รูป ก. เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องคู่รูปทรงตัวเอช โดยใช้ขั้วแคโทดต่อยึดยื่นออกมา เชื่อมตรงส่วนกลาง มีเยื่อเลือกผ่านโปรตอนกั้นระหว่างห้องแอโนดและห้องแคโทด

รูป ข. เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องคู่รูปทรงตัวเอชอย่างง่าย ใช้ปีกเกอร์เป็นวัสดุ มีสะพานเกลือตรงส่วนที่ลูกศรสีขาวชี้แทนเยื่อเลือกผ่านโปรตอน

รูป ค. เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบกล่อง มีเซลล์เชื้อเพลิง 4 เซลล์ ทำงานพร้อมกัน

รูป ง. เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบชุด พัฒนาให้สามารถทำงานได้หลายเซลล์พร้อมกัน เพื่อเพิ่มกำลังการผลิตกระแสไฟฟ้า

รูป จ. เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบไหลขึ้น เป็นรูปแบบที่ให้แอโนดอยู่ด้านล่างและแคโทด อยู่ด้านบน และเยื่อเลือกผ่านโปรตอนอยู่ในแนวเฉียงระหว่างทั้งสองส่วน

รูป ฉ. เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องเดี่ยว

จากรูปที่ 2.5 เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องคู่รูปทรงตัวเอช (H-shape) เป็นโครงสร้างที่นิยมอย่างกว้างขวางเพราะเป็นโครงสร้างอย่างง่ายที่ไม่ซับซ้อนและไม่แพง รูปทรงตัวเอชนั้นมีส่วนประกอบ คือห้องแอโนดและห้องแคโทดแยกกันซึ่งอาจจะใช้เป็นขวดหรือถัง (รูป ก.) หรือบีกเกอร์ (รูป ข.) มาเชื่อมต่อกันโดยมีเยื่อเลือกผ่านโปรตอนกั้นกลางระหว่างทั้งสองส่วน ซึ่งเยื่อเลือกผ่านโปรตอนนี้เป็นส่วนสำคัญมากของเซลล์เชื้อเพลิงรูปทรงตัวเอช เนื่องจากเป็นส่วนที่ยอมให้เฉพาะโปรตอนผ่านระหว่างห้องทั้งสอง เพื่อให้โปรตอนจากห้องแอโนดไหลไปทำปฏิกิริยาที่ห้องแคโทดทำให้ระบบสมบูรณ์ หรืออาจใช้สะพานเกลือแทนเยื่อเลือกผ่านโปรตอนในเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องคู่รูปทรงตัวเอชอย่างง่ายที่ใช้บีกเกอร์เป็นวัสดุ (รูป ข.) ต่อมามีการศึกษาพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์รูปทรงตัวเอชให้มีรูปร่างที่สวยงามดูทันสมัยและเป็นระบบมากขึ้น เช่นเป็นทรงกล่องสี่เหลี่ยม (รูป ค.) อีกทั้งยังออกแบบเพิ่มปริมาณเซลล์เชื้อเพลิงให้สามารถทำงานพร้อมกันได้เพื่อเพิ่มกำลังการผลิตไฟฟ้า

นอกจากเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ซึ่งเป็นเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพแล้วยังมีเซลล์เชื้อเพลิงเคมีซึ่งก็มีการศึกษาอย่างแพร่หลายและมีประสิทธิภาพมากกว่า จึงมีการศึกษาวิจัยเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ที่มีระบบที่คล้ายคลึงกับเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนซึ่งเป็นเซลล์เชื้อเพลิงเคมี มีเยื่อเลือกผ่านโปรตอนอยู่ตรงกลางของเซลล์แล้วประกบด้วยแอโนดและแคโทด เพื่อเป็นการเพิ่มกำลังการผลิตจึงออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ให้สามารถมีหลายๆ เซลล์ทำงานพร้อมกันโดยออกแบบรูปทรงแต่ละเซลล์เป็นทรงแบนต่อกัน (รูป ง.)

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบ upflow fixed-bed biofilm เป็นระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนที่มีการบรรจุตัวกลางในคอลัมน์หรือถังเพื่อให้เป็นที่ยึดเกาะของจุลินทรีย์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อรักษาปริมาณตะกอนจุลินทรีย์เนื่องจากตัวกลางทำหน้าที่ช่วยเก็บกักจุลินทรีย์ไว้ไม่ให้ถูกล้างออกจากระบบและเพื่อช่วยให้จุลินทรีย์แผ่เป็นแผ่นฟิล์ม ช่วยให้จุลินทรีย์มีอายุมากขึ้นในระบบนี้จะมีการปล่อยน้ำเสียเข้าทางด้านล่างของถัง น้ำเสียจะไหลผ่านตัวกลางที่มีจุลินทรีย์เกาะอยู่กับผิวของตัวกลางและอาศัยอยู่ในช่องว่างของตัวกลางทำให้ระบบนี้ไม่ต้องมีการกวนน้ำในถัง จุลินทรีย์เหล่านั้นจะทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย และปล่อยน้ำเสียที่บำบัดแล้วไหลออกด้านบน (สุภณชาติ นิรมรัตน์, 2548) จึงมีการศึกษาออกแบบรูปทรงของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ให้มีความซับซ้อนขึ้นโดยเลียนแบบคล้ายระบบบำบัดน้ำเสียแบบ upflow fixed-bed biofilm โดยออกแบบให้ห้องแอโนดอยู่ด้านล่างและห้องแคโทดอยู่ด้านบน ให้เยื่อเลือกผ่านโปรตอนอยู่ในแนวเอียงกั้นระหว่างทั้งสองส่วน (รูป จ.)

มีการศึกษาออกแบบพัฒนารูปแบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ให้มีความซับซ้อนขึ้นไปอีก โดยเซลล์เชื้อเพลิงทั่วไปนิยมใช้เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องคู่ แต่มีการศึกษาวิจัยพบว่า บางครั้งก็ไม่จำเป็นที่ห้องแคโทดจะต้องมีน้ำบรรจุอยู่ภายในและไม่จำเป็นที่ห้องแคโทดจะต้องเป็นส่วนที่แยกออกมาอย่างชัดเจน โดยอาจให้ขั้วแคโทดเป็นเพียงส่วนที่สัมผัสโดยตรงกับอากาศ จาก ระบบของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่ขั้วแคโทดจะเชื่อมโดยตรงกับเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอนและอีก ด้านหนึ่งของขั้วแคโทดจะสัมผัสโดยตรงกับอากาศซึ่งออกซิเจนจากอากาศสามารถทำปฏิกิริยาได้ โดยตรงกับขั้วไฟฟ้าแคโทด (รูป จ.) (Logan และคณะ, 2006)

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์เชื้อเพลิงประเภทต่างๆ โดยใช้แหล่งคาร์บอนชนิดต่างๆ แก่เชื้อจุลินทรีย์ผสม (Kim และคณะ ,2007)

Reactor type	Fuel used	Power density (mW/m ²)	Reference
H-type Single chamber	Landfill leachate		You et al. 2006a
H-type Bushing	Glucose	115.6	You et al. 2006b ^a
Single chamber	Glucose	3,987	Cheng et al. 2006a
Single chamber	Glucose	766	Cheng et al. 2006b
Single chamber	Domestic wastewater	1,540	Cheng et al. 2006b
Single chamber	Glucose	464	Cheng et al. 2006c
Two-chamber with bipolar membrane, Fe ³⁺ /Fe ²⁺ cathode	Acetate	480 ^b	ter Heijne et al. 2006 ^c
Two-chamber	Glucose	860	Rosenbaum et al. 2006 ^d
Two-chamber	Acetate	5,850	Jong et al. 2006 ^e
Two-chamber	Glucose, glutamate	1,030	Moon et al. 2006
Upflow	Sucrose	560	He et al. 2006

2.5 ชนิดของขั้วไฟฟ้า

Logan และคณะ (2007) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ที่ใช้วัสดุขั้วไฟฟ้า แอโนดเป็นแปรงเส้นใยคาร์บอน 2 ขนาด คือขนาดกว้าง 2.5 และยาว 2.5 เซนติเมตร และขนาด กว้าง 5 และยาว 7 เซนติเมตร พบว่าแปรงเส้นใยคาร์บอนขนาดเล็กให้ค่าความหนาแน่น กำลังไฟฟ้าสูงสุดถึง 2400 มิลลิวัตต์ต่อตารางเมตร แปรงเส้นใยคาร์บอนขนาดใหญ่ให้ค่าความ หนาแน่นกำลังไฟฟ้า 1430 มิลลิวัตต์ต่อตารางเมตร เมื่อเทียบกับกระดาษคาร์บอนเรียบที่ให้ค่า ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเพียง 600 มิลลิวัตต์ต่อตารางเมตร ซึ่งยังมีงานวิจัยที่สนับสนุนว่าเส้นใย คาร์บอนเป็นวัสดุที่ดีที่จะนำมาเป็นขั้วไฟฟ้าแอโนด

Sarinee และคณะ (2007) ได้ศึกษาค่าอิมพีแดนซ์ของวัสดุขั้วไฟฟ้าแอโนด 5 ชนิด เพื่อวิเคราะห์ค่าอิมพีแดนซ์ซึ่งเป็นค่าความต้านทานระหว่างรอยต่อของขั้วไฟฟ้ากับสารละลาย ค่าอิมพีแดนซ์มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ โดยพบว่านิกเกิล อลูมิเนียม และสแตนเลส มีค่าอิมพีแดนซ์สูงทำให้จำกัดการถ่ายโอนอิเล็กตรอนในระบบเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ ขณะที่ผ้าเส้นใยคาร์บอนและเงินมีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำกว่าทำให้ถ่ายโอนอิเล็กตรอนได้สะดวกส่งผลให้มีประสิทธิภาพการทำงานสูงกว่ายืนยันได้จากค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าของผ้าเส้นใยคาร์บอนและเงินซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.8 และ 0.8 มิลลิวัตต์ต่อตารางเมตรตามลำดับ ขณะที่ นิกเกิล สแตนเลส และอลูมิเนียมมีค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเพียง 0.2 0.1 และ 0.004 มิลลิวัตต์ต่อตารางเมตรตามลำดับ แม้ว่าจะให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่สูงกว่าผ้าเส้นใยคาร์บอนและเงินก็ตาม จึงได้เสนอว่าผ้าเส้นใยคาร์บอนเป็นวัสดุขั้วไฟฟ้าที่ช่วยถ่ายโอนอิเล็กตรอนได้ดีและให้กำลังไฟฟ้าสูงในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ

2.6 การเพิ่มประสิทธิภาพในห้องแคโทด

ห้องแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์โดยทั่วไปจะมีการให้ก๊าซออกซิเจน เพื่อให้ทำปฏิกิริยากับอิเล็กตรอนรวมกับโปรตอนกลายเป็นน้ำ แต่ปฏิกิริยาการรวมดังกล่าวเกิดขึ้นได้ไม่ดีนัก มีค่าศักย์ไฟฟ้าตามทฤษฎีไม่เกิน 1 โวลต์ (You และคณะ, 2006) จึงมีการศึกษาการเติมสารบางชนิดที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่ดีในห้องแคโทด

การพัฒนาประสิทธิภาพในฝั่งแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องคู่ที่มีเยื่อเลือกผ่านโปรตอน พบว่าการเติมเฟอร์ริกไซยาไนด์ในสารละลายที่ห้องแคโทดสามารถเพิ่มความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าได้เมื่อเทียบกับการใช้แพลทินัมเป็นตัวกระตุ้น โดยใช้ขั้วไฟฟ้าคาร์บอนเคลือบแพลทินัมเป็นขั้วไฟฟ้าแคโทดร่วมกับการให้ออกซิเจนละลายในสารละลายในฝั่งแคโทด การเติมเฟอร์ริกไซยาไนด์ลงในห้องแคโทดสามารถช่วยเพิ่มความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าได้ เนื่องจากเฟอร์ริกไซยาไนด์เป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่ดี (Oh, 2006) จึงช่วยดึงอิเล็กตรอนที่ไหลมาจากห้องแอโนดทำให้อิเล็กตรอนไหลได้สะดวกไม่ถูกจำกัดปฏิกิริยาไว้ที่ห้องแคโทด

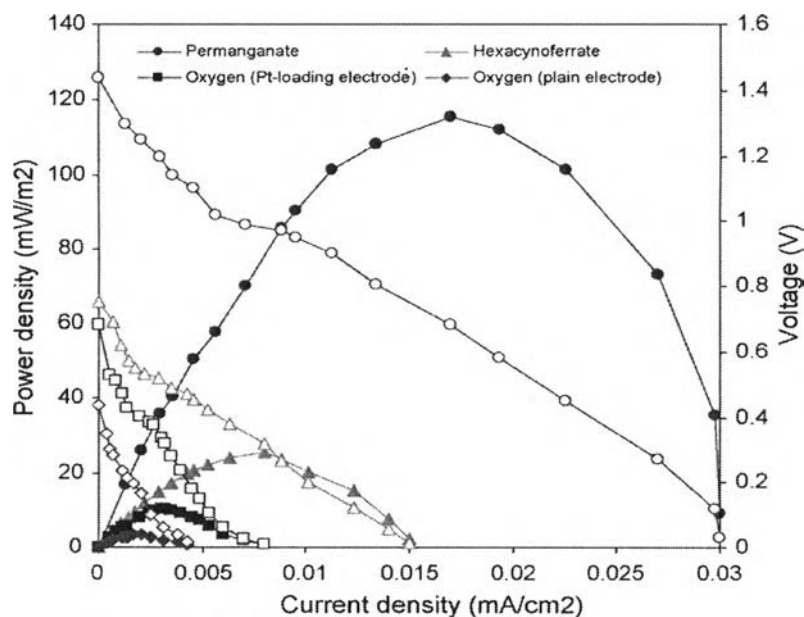
ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ที่ให้อาหารต่างชนิดกัน โดยมีการเติมเฮกซะไซยาโนเฟอไรต์ในห้องแคโทด (Aelterman, 2006)

Substrate	Power density (W/m ³) ^a	% COD captured as power	Substrate removal (kg COD per m ³ per day) ^a	CE (%)	Reference
Acetate	90	25	> 1.12**	98	Rabaey <i>et al.</i> (2005b)
Acetate	258	25	> 4.72**	72	Aelterman <i>et al.</i> (submitted)
Glucose	68	25	> 0.92**	74	Rabaey <i>et al.</i> (2005b)
Sucrose	1.87	-	1.2	2	He <i>et al.</i> (2005)
Sucrose	49	-	0.7	54	Rabaey <i>et al.</i> (2005c)

ตารางที่ 2.3 ตารางแสดงความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ที่ให้อาหารต่างชนิดกัน โดยมีการใช้ขั้วไฟฟ้าคาร์บอนเคลือบแพลทินัมที่ขั้วแคโทด (Aelterman, 2006)

Substrate	Power density (W/m ³) ^a	% COD captured as power	Substrate removal (kg COD per m ³ per day) ^a	CE (%)	Reference
Acetate	12.7	7.2	-	31	Liu <i>et al.</i> (2005a)
Butyrate	7.6	5	-	15	Liu <i>et al.</i> (2005a)
Glucose	12.5 ± 0.5	-	-	9–12	Liu and Logan (2004)
Artificial wastewater	102	-	8.9	34	Moon <i>et al.</i> (2006)

ในปี 2006 You และคณะ ทำการศึกษาพบว่า การเติมเปอร์เมกานาตในถังแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องคู่โดยใช้ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร จะให้ค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุดถึง 115.60 มิลลิวัตต์ต่อตารางเมตร ซึ่งมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับการเติมสารตัวอื่นได้แก่ เฮกซะไซยาโนเฟอไรต์ที่ให้ค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 25.62 มิลลิวัตต์ต่อตารางเมตร และออกซิเจนที่เสริมการเกิดปฏิกิริยาด้วยการเคลือบแพลทินัมที่ขั้วไฟฟ้าแคโทดจะให้ค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเพียง 10.2 มิลลิวัตต์ต่อตารางเมตร (You และคณะ, 2006) ดังแสดงในกราฟรูปที่ 2.6

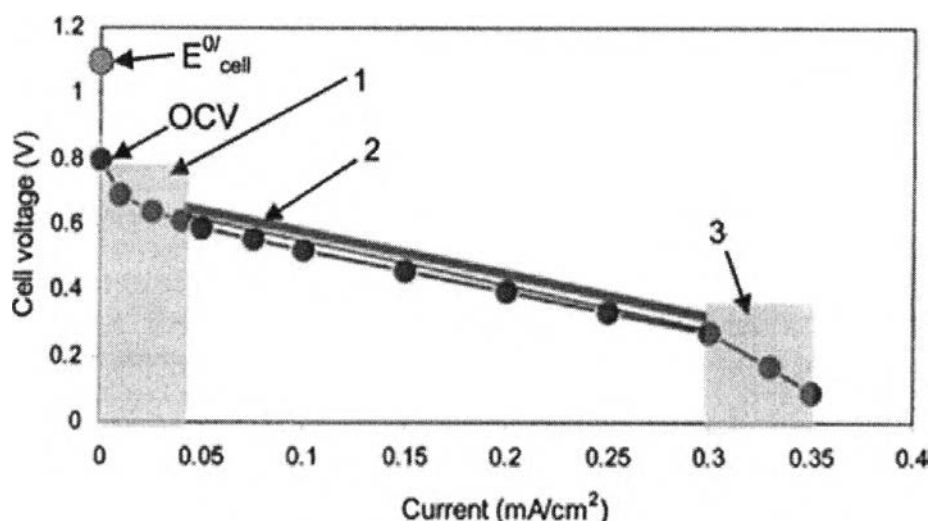


รูปที่ 2.6 รูปแสดงกราฟความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อความหนาแน่นกระแสของการเติมเปอแมงกานีส เฮกซะไซยาไนด์ ออกซิเจนที่เสริมการเกิดปฏิกิริยาโดยใช้ขั้วไฟฟ้าคาร์บอนเคลือบแพลทินัม และออกซิเจน ในห้องแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ (You และคณะ, 2006)

2.7 ปัจจัยที่มีผลต่อความต่างศักย์ไฟฟ้าของระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์

เมื่อมีการตั้งกระแสจากระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์จะมีผลต่อค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของระบบ ดังแสดงในกราฟรูปที่ 2.7 การสูญเสียความต่างศักย์ (Voltage losses) เกิดจากเมตาบอลิซึมของจุลินทรีย์ซึ่งเป็นการสูญเสียพลังงานที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ การสูญเสียพลังงานเหล่านี้เป็นผลมาจากการใช้พลังงานของจุลินทรีย์จากการออกซิเดชัน โดยปกติจุลินทรีย์ต้องการพลังงานในกระบวนการเมตาบอลิซึมอย่างเพียงพอ ส่วนใหญ่จุลินทรีย์จะใช้พลังงานจากวัฏจักรเครบส์ กระบวนการฟอสฟอริเลชัน (Phosphorylation)

การสูญเสียจากการกระตุ้น (Activation loss) เป็นการสูญเสียพลังงานจากความช้าของอัตราการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีในการเริ่มต้นปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือรีดักชันของเซลล์ และปฏิกิริยาการถ่ายเทอิเล็กตรอนจากเซลล์สู่ขั้วไฟฟ้าผ่านเอนไซม์หรือโปรตีนของเซลล์ เช่น นาโนไวร์ (nanowire) ตัวกลางนำพาอิเล็กตรอน ไฮโดรเจน เป็นต้น การสูญเสียพลังงานนี้จะพบที่ช่วงความหนาแน่นกระแสต่ำๆ ดังแสดงในกราฟรูปที่ 2.7 ในบริเวณช่วงที่ 1 ของเส้นกราฟ ปรับปรุงการถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างจุลินทรีย์และขั้วไฟฟ้าแอโนด นอกจากนี้จุลินทรีย์ที่ต่างชนิดกันก็มีผลต่อการสูญเสียในส่วนนี้ด้วย



รูปที่ 2.7 กราฟโวลตาโรเซชัน แสดงการสูญเสียแรงดันจากการดิ่งกระแสใน 3 ช่วง (Logan, 2007)

OCV : Open Circuit Voltage ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วงจรเปิด (เมื่อไม่มีการดิ่งกระแส)

E_{cell}^0 : ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง

การสูญเสียจากความต้านทาน (Ohmic losses) การสูญเสียนี้เกิดจากการต้านทานการนำไฟฟ้าของประจุในสารละลาย เยื่อเลือกผ่านโปรตอน และการไหลของอิเล็กตรอนผ่านจุดเชื่อมต่อระหว่างขั้วไฟฟ้ากับสายไฟฟ้า ซึ่งการสูญเสียส่วนนี้สำคัญต่อการออกแบบเซลล์เชื้อเพลิง จุลินทรีย์ สามารถลดการสูญเสียนี้ได้โดยลดระยะห่างของขั้วไฟฟ้า เลือกชนิดของเยื่อเลือกผ่านโปรตอนให้เหมาะสม เคลือบขั้วไฟฟ้าด้วยคะตะลิสต์เพื่อลดการต้านทาน ตรวจสอบจุดเชื่อมต่อของสายไฟในวงจรให้มีประสิทธิภาพ และเพิ่มประสิทธิภาพของการนำไฟฟ้าในสารละลายและบัฟเฟอร์ แสดงบริเวณการสูญเสียนี้ในช่วงบริเวณที่ 2 ของเส้นกราฟรูปที่ 2.7

การสูญเสียจากการถ่ายโอนมวล (Mass transfer losses) เกิดจากการไหลของอิเล็กตรอนถูกจำกัดจึงมีผลต่อผลิตไฟฟ้า การถ่ายโอนมวลจะจำกัดการไหลของโปรตอนไปยังฝั่งแคโทด มีผลให้เกิดการสะสมโปรตอนซึ่งทำให้ความเป็นกรดเบสในฝั่งแอโนดมีค่าลดลงส่งผลกระทบต่อจุลินทรีย์ และทำให้ความเป็นกรดเบสในฝั่งแคโทดมีค่าเพิ่มสูงขึ้นด้วย สามารถลดการสูญเสียได้โดยเติมคะตะลิสต์ในฝั่งแคโทดการสูญเสียนี้เกิดขึ้นในช่วงบริเวณที่ 3 ของเส้นกราฟรูปที่ 2.7 (Logan, 2007)

2.8 ปัจจัยที่มีผลในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์

ปริมาณของอาหารในถังแอนโดมีผลต่อการเจริญของจุลินทรีย์และการผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งจะอาจกำหนดเป็น ความเข้มข้นของอาหาร อัตราการไหลของอาหารที่ให้เข้าระบบ หรือ ระยะเวลาที่กักทางศาสตร์

ความเป็นกรดเบสและอุณหภูมิมีผลต่อการเจริญของจุลินทรีย์ และยังมีผลโดยตรงต่อการทำงานของเอนไซม์ในเซลล์จุลินทรีย์อีกด้วย ซึ่งค่าความเป็นกรดเบสและอุณหภูมิต่างกันไปในจุลินทรีย์แต่ละชนิด นอกจากนี้ความเป็นกรดเบสที่ต่างกันระหว่างห้องแอนโดและห้องแคโทด ก็เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดความลาดเอียงของความเป็นกรดเบส (gradient) เพราะถ้าความเป็นกรดเบสในถังทั้งสองมีค่าต่างกันจะเกิดความลาดเอียงของความเป็นกรดเบส ส่งผลให้โปรตอนไหลจากห้องแอนโดไปยังห้องแคโทดได้ดี

โครงสร้างและวัสดุของเซลล์เชื้อเพลิง ได้แก่ โครงสร้างประเภทต่างๆ ที่มีการศึกษาพัฒนา ออกแบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้า ขั้วไฟฟ้าที่แตกต่างกันทั้งในด้านลักษณะ และวัสดุจะส่งผลในการตั้งอิเล็กตรอนจากเซลล์จุลินทรีย์ และการยึดเกาะของจุลินทรีย์ที่บริเวณผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า เยื่อเลือกผ่านประจุบวกมีผลในการจำกัดการไหลของโปรตอนไปยังห้องแคโทด การเติมสารบางอย่างในสารละลายในห้องแคโทดก็ช่วยตั้งอิเล็กตรอนให้ไหลได้สะดวกขึ้น เช่น เพอร์ออกไซด์ หรือเปอร์แมงกาเนต เป็นต้น

ความต้านทานภายนอกที่เหมาะสมจะส่งผลให้ระบบของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าได้สูง (Rabaey และ Verstraete, 2005b)

2.9 อิทธิพลของความเป็นกรดเบสและอุณหภูมิ

ความเป็นกรดเบสและอุณหภูมิต่างกันมีผลโดยตรงต่อการเจริญของจุลินทรีย์ โดยจุลินทรีย์แต่ละชนิดจะเจริญได้ดีในช่วงค่าความเป็นกรดเบสและอุณหภูมิที่แตกต่างกันออกไป นอกจากนี้ความเป็นกรดเบสและอุณหภูมิต่างกันยังมีผลโดยตรงต่อกระบวนการทำงานและเสถียรภาพของเอนไซม์ด้วย ในส่วนของความเป็นกรดเบส จุลินทรีย์บางชนิดจะเจริญได้ดีในภาวะที่มีความเป็นกรดเบสต่ำ (Acidophiles) จุลินทรีย์บางชนิดเจริญได้ดีในภาวะที่มีความเป็นกรดเบสเป็นกลางหรือมีค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 7 (Neutralophiles) และจุลินทรีย์บางชนิดเจริญได้ดีในภาวะที่ค่อนข้างเป็นด่าง (Alkalophiles) เมื่อทำการเลี้ยงจุลินทรีย์ในอาหารเป็นเวลานานจะทำให้ค่าความเป็นกรดเบสของอาหารเปลี่ยนไป เนื่องจากจุลินทรีย์ที่เจริญมากจะปล่อยสารบางอย่างออกมาอาจเป็นกรด

หรือเบส จึงทำให้ค่าความเป็นกรดเบสเปลี่ยนแปลงไปอย่างมากและไปขัดขวางการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ดังนั้นในการเตรียมอาหารจึงต้องใส่สารบางอย่างที่ทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ ซึ่งเป็นสารต้านทานการเปลี่ยนค่าความเป็นกรดเบส ตัวอย่างสารที่ทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ KH_2PO_4 และ K_2HPO_4 (นงลักษณ์ สุวรรณพินิจและปรีชา สุวรรณพินิจ, 2547)

ในส่วนของอุณหภูมิ พบว่าจุลินทรีย์แต่ละชนิดนั้นสามารถเจริญได้ดีในช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกันออกไป โดยจุลินทรีย์บางชนิดสามารถเจริญได้ดีที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่า 20 องศาเซลเซียส (psychophiles) จุลินทรีย์บางชนิดสามารถเจริญได้ดีที่อุณหภูมิประมาณ 25 ถึง 45 องศาเซลเซียส (mesophiles) จุลินทรีย์บางชนิดสามารถเจริญได้ดีที่อุณหภูมิสูงกว่า 45 องศาเซลเซียส (thermophiles) อุณหภูมิที่นำมาใช้ในการเลี้ยงจุลินทรีย์นั้นจะต้องเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญของจุลินทรีย์แต่ละชนิด และอุณหภูมินั้นถือเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเร่งปฏิกิริยาทางเคมีต่างๆ ภายในเซลล์ ทำให้สามารถดำเนินปฏิกิริยาเคมีต่อไปได้โดยที่ไม่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของโปรตีนหรือเอนไซม์ต่างๆ ที่ถูกผลิตขึ้นจากเซลล์ (จุฑากานต์ บุญมี, 2552)

2.10 อิทธิพลของแหล่งคาร์บอน

คาร์บอนเป็นธาตุที่เป็นองค์ประกอบสำคัญในกระบวนการสังเคราะห์ส่วนต่างๆ ของเซลล์ และจัดเป็นแหล่งพลังงานแหล่งใหญ่ที่ใช้ในการเจริญของจุลินทรีย์ โดยทั่วไปจุลินทรีย์ที่เจริญในสภาวะไร้อากาศจะต้องการคาร์บอนประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ในกระบวนการสังเคราะห์เซลล์ ส่วนจุลินทรีย์ที่เจริญในภาวะที่มีอากาศจะต้องการคาร์บอนประมาณ 50-55 เปอร์เซ็นต์ในกระบวนการสังเคราะห์เซลล์ (จุฑากานต์ บุญมี, 2552) การศึกษาการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ สามารถใช้แหล่งคาร์บอนได้หลากหลายชนิด เช่น กลูโคส ซูโครส กรดแอซีติก และกรดบิวทริก เป็นต้น

การประยุกต์ใช้เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์กับการบำบัดน้ำเสีย

นอกจากแหล่งคาร์บอนที่ได้กล่าวไปข้างต้นแล้ว น้ำเสียต่างๆ ก็สามารถนำมาใช้เป็นแหล่งคาร์บอนให้แก่จุลินทรีย์ในเซลล์เชื้อเพลิงได้เป็นอย่างดี ซึ่งนอกจากจะได้ประโยชน์เป็นการรักษาสิ่งแวดล้อมอันเกิดจากมลพิษทางน้ำแล้ว ยังเป็นแหล่งคาร์บอนที่ไม่ต้องลงทุนอีกด้วย ในปี 1991 Habermann และ Pommer ได้ทำการศึกษาประยุกต์ใช้เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์เข้ากับกระบวนการบำบัดน้ำเสียให้ได้ประโยชน์มากขึ้นคือได้ไฟฟ้าและน้ำสะอาดขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าสามารถประยุกต์ใช้ได้กับน้ำเสียหลากหลายประเภททั้งน้ำเสียชุมชนและน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

ต่างๆ (Min และ Logan, 2004; Aelterman และคณะ, 2006; Ghangrekar และ Shinde, 2007, 2008) เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์จึงกลายเป็นพลังงานทางเลือกที่สามารถสร้างไฟฟ้าจากของเสียได้ โดยอาศัยจุลินทรีย์เป็นตัวผลิตกระแสไฟฟ้า (Lui และคณะ, 2004) ถึงแม้ว่าเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์จะสร้างกระแสไฟฟ้าได้ต่ำกว่าเซลล์เชื้อเพลิงเคมีอย่างเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน แต่กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้นั้นจะสามารถลดค่าใช้จ่ายในกระบวนการบำบัดน้ำเสียลงได้ (Min และ Logan, 2004)

ตารางที่ 2.4 ตารางแสดงค่ากระแส ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าโดยใช้อาหารต่างชนิดให้แก่เชื้อจุลินทรีย์เดี่ยวและจุลินทรีย์ผสมในเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ โดยใช้วัสดุขั้วไฟฟ้าที่แตกต่างกัน (Rabaey และ Verstraete, 2005b)

	Substrate	Electrode type	I (current, mA)	P (mW/m ²)	P (W/m ³)
Axenic cultures					
<i>Proteus vulgaris</i>	Glucose	Glassy carbon	0.8	4.5	18
<i>Erwinia dissolvens</i>	Glucose	Woven graphite	0.7	0.27 ^b	n.a. ^e
<i>Proteus vulgaris</i>	Glucose	Glassy carbon	0.7	85	9.0
<i>Shewanella putrefaciens</i>	Lactate	Woven graphite	0.04	0.00032	0.08
<i>Geobacter sulfurreducens</i>	Acetate	Plain graphite	0.4	13	0.35
<i>Rhodospirillum rubrum</i>	Glucose	Plain graphite	0.2	8	0.25
		Woven graphite	0.57	17	1.7
		Graphite foam	0.4514	33	0.96
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Glucose	Plain graphite	0.1	88	8.8
<i>Escherichia coli</i>	Lactate	Woven graphite ^c	3.3	1.2	7.6
		Plain graphite ^c	2.6	91	3.6
Mixed cultures					
Mixed, saltwater	Acetate	Plain graphite	0.23	10	n.a. ^e
	S ₂ -/acetate	Plain graphite	60 ^d	32	n.a. ^e
Mixed consortium, batch	Glucose	Plain graphite	30	3600	216
Activated sludge	Wastewater	Woven graphite	0.2	8	1.6
		Woven graphite ^b	11	5.3	34
		Plain graphite ^b	2.6	788	32
	Wastewater	Woven graphite	4.85	26	1.6
	Glucose	Woven graphite	0.9	494	13
Mixed consortium, continuous	Sucrose	Granular graphite	6.2	23	47
	Glucose	Granular graphite	5.4	18	37
	Acetate	Carbon paper	1.27	506	13
	Butyrate	Carbon paper	0.48	305	7.6

จุลินทรีย์ที่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ได้ มีทั้งจุลินทรีย์ชนิดเดี่ยวและจุลินทรีย์ผสม ดังแสดงในตารางที่ 2.4 นอกจากนี้อาหารที่เข้าระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ก็ยังสามารถใช้ได้หลายชนิด ได้แก่ น้ำตาลกลูโคส น้ำตาลซูโครส กรดแลคติก กรดแอสติก กรดแลคติก กรดบิวไทริก และน้ำเสีย และการใช้ขั้วไฟฟ้าแตกต่างกันก็มีผลทำให้ได้กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ต่างกัน ขั้วไฟฟ้ามีหลายชนิด ได้แก่ คาร์บอนคล้ายแก้ว (Glassy carbon) แผ่นแกรไฟท์อย่างง่าย (Plain graphite) แกรไฟท์ถัก (Woven graphite) เม็ดแกรไฟท์ (Granular graphite) ผ้าคาร์บอน (Carbon paper)

2.11 กระบวนการบำบัดน้ำเสีย

น้ำเสียมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นน้ำ ส่วนที่เหลือเป็นของแข็งแขวนลอยและสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ ได้แก่ น้ำตาล กรดอะมิโน กรดไขมัน แอลกอฮอล์ และสารอินทรีย์อื่นๆ โรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะปลดปล่อยทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ได้แก่ โรงงานน้ำตาล โรงงานกระดาษ โรงงานโลหะต่างๆ จะปล่อยทั้งกรด เกลือของโลหะ และสารอินทรีย์อื่นๆ ดังนั้นเมื่อปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำ จึงเป็นการเพิ่มสารอินทรีย์และอนินทรีย์ให้แก่แหล่งน้ำ ทำให้แบคทีเรียนำไปใช้เป็นอาหารและเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว พร้อมกับย่อยสลายสารอินทรีย์ไปด้วย ในการนี้จะมีการใช้ออกซิเจนไปในการย่อยเรื่อยๆ จนบางครั้งอาจใช้ไปเกือบหมดจึงเกิดสภาพไร้ออกซิเจนในแหล่งน้ำ ทำให้สิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำทนอยู่ไม่ได้และตายในที่สุด ทำให้แบคทีเรียพวกที่ไม่ใช้ออกซิเจนจะได้ออกซิเจนขึ้นมาแทนที่มากมายและย่อยสารอินทรีย์ต่อไป การย่อยในสภาพที่ไม่ใช้ออกซิเจนจะได้สารประกอบที่มีกลิ่นเหม็น เช่น ก๊าซไข่เน่า หรือ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) เป็นต้น ทำให้แหล่งน้ำกลายเป็นน้ำเน่าเสีย (นงลักษณ์ สุวรรณพินิจและปรีชา สุวรรณพินิจ, 2547)

ในสมัยก่อนนั้นน้ำเสียจากแหล่งชุมชน โรงงานอุตสาหกรรมและจากการเกษตรกรรม มักจะถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำโดยตรงและอาศัยกระบวนการทำความสะอาดด้วยจุลินทรีย์ในแหล่งน้ำนั้น ซึ่งเรียกว่า Self-purification หรือการย่อยสลายสารปนเปื้อนในน้ำเสียเหล่านี้จึงกลายเป็นสารไม่มีพิษในที่สุด แต่ในปัจจุบันมีจำนวนประชากรเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จึงทำให้น้ำเสียที่ปลดปล่อยออกมาสู่สิ่งแวดล้อมมีปริมาณมากกว่าที่จุลินทรีย์ในแหล่งน้ำจะย่อยสลายได้ทันซึ่งผลที่ตามมาคือเกิดการเน่าเสียของแม่น้ำลำคลอง โดยแม่น้ำลำคลองหลายแห่งในประเทศไทยมีการปนเปื้อนด้วยสารพิษหลากหลายชนิดและมีคุณภาพน้ำที่ต่ำกว่าการนำมาใช้อุปโภคหรือบริโภค ดังนั้นระบบบำบัดน้ำเสียจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญและจำเป็นต้องจัดทำ เพื่อบำบัดน้ำเสียให้มีความสกปรกลดลงจนอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานและไม่ก่อให้เกิดปัญหาตามมาก่อนที่จะถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ตามข้อบังคับของโรงงานอุตสาหกรรมในประเทศไทยได้กำหนดว่าน้ำเสียที่ปล่อยออกสู่แหล่งน้ำสาธารณะจะต้องมีค่าความสกปรกในรูปของบีโอดีไม่เกิน 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

ลักษณะของระบบบำบัดน้ำเสียที่เหมาะสมในแต่ละพื้นที่ คือ เป็นระบบที่สามารถทำงานได้ง่ายและควบคุมได้สะดวก ซึ่งต้องมีค่าใช้จ่ายไม่สูงมากเกินไปทำให้ผู้ที่สร้างระบบสามารถยอมรับได้ นอกจากนี้แต่ละระบบต้องการพื้นที่ในการปลูกสร้างไม่เท่ากันดังนั้นพื้นที่ในการปลูกสร้างต้องเหมาะสมด้วย

ระบบบำบัดน้ำเสียที่ถูกนำมาใช้ในประเทศไทยเป็นอันดับแรกคือ การบำบัดแบบบ่อเกรอะบ่อซึม ซึ่งเป็นแบบที่นิยมใช้ในบ้านเรือนโดยทั่วไป นอกจากนั้นเพื่อเป็นการป้องกันน้ำเน่าเสียที่เกิดจากแหล่งโรงงานอุตสาหกรรมในประเทศไทยจึงได้มีการประกาศใช้พระราชบัญญัติโรงงานซึ่งบังคับให้โรงงานอุตสาหกรรมต้องจัดให้มีระบบการบำบัดน้ำเสียชนิดต่างๆ ขึ้นมาก่อนที่จะปล่อยลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติ รวมทั้งยังมีกฎหมายของน้ำทิ้งหลายประเภทที่ถูกกำหนดออกมาเพื่อช่วยรักษาสภาพสิ่งแวดล้อมและลดภาวะมลพิษทางน้ำและด้านอื่นๆ (สุบัญญัติ นิมรัตน์, 2548)

2.11.1 ประเภทของระบบบำบัดน้ำเสีย

ระบบบำบัดน้ำเสียสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทคือ

1. ระบบบำบัดน้ำเสียทางกายภาพ (Physical process) คือวิธีการบำบัดโดยใช้กระบวนการทางกายภาพ ยกตัวอย่างเช่น การตกด้วยตะแกรง การตกตะกอน (Sedimentation) และการกรอง (Filtration) สารปนเปื้อนจากน้ำเสีย วิธีนี้นิยมใช้ในการบำบัดสารปนเปื้อนบางชนิดหรือบำบัดน้ำเสียที่มีสารสกปรกไม่มากนักและวิธีการบำบัดทางกายภาพนี้ต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูง เช่นเดียวกับการบำบัดน้ำเสียทางเคมี

2. ระบบบำบัดน้ำเสียทางเคมี (Chemical process) คือวิธีการบำบัดน้ำเสียโดยใช้ปฏิกิริยาทางเคมี เช่น การทำให้เป็นกลาง (Neutralization) การทำให้ตกตะกอน (Precipitation) และการช่วยการตกตะกอน (Chemical coagulation) ของสารปนเปื้อนในน้ำเสียให้แยกออกจากน้ำส่วนใส วิธีนี้เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงในการบำบัดแต่มีข้อเสียคือเป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายสูงและทำให้เกิดกากตะกอนในปริมาณสูง

3. ระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ (Biological process) คือระบบบำบัดโดยใช้สิ่งมีชีวิตในการกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ ซึ่งอยู่ในรูปของสารละลายหรือสารแขวนลอยขนาดเล็กที่ไม่สามารถตกตะกอนได้โดยอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลก จุลินทรีย์ที่มีบทบาทสำคัญในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียส่วนใหญ่เป็นแบคทีเรียประมาณ 95 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาได้แก่ เชื้อรา สาหร่าย และโปรโตซัว ระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพเป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายน้อยกว่าวิธีทางเคมีหรือวิธีทางกายภาพ ซึ่งระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพจะประกอบด้วย 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ ระบบบำบัดน้ำเสียแบบที่ใช้ออกซิเจนและแบบไม่ใช้ออกซิเจน (สุบัญญัติ นิมรัตน์, 2548)

2.11.2 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ

การย่อยสลายสารอินทรีย์ในถังย่อยสลายแบบไร้อากาศต้องอาศัยจุลินทรีย์ 4 กลุ่มในการย่อยสลาย โดยมีปฏิริยาต่างๆ ดังนี้

ปฏิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) คือปฏิริยาที่ทำการเปลี่ยนสารอินทรีย์ขนาดใหญ่ ได้แก่ สารจำพวกคาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน ซึ่งมีขนาดใหญ่เกินกว่าที่จุลินทรีย์จะดูดซึมเข้าเซลล์ได้ให้เป็นสารที่มีขนาดเล็ก ได้แก่ สารจำพวกน้ำตาล อะมิโน และกรดไขมัน โดยไฮโดรไลซิงแบคทีเรียจะเป็นกลุ่มแบคทีเรียที่ผลิตเอนไซม์แล้วปล่อยออกมาจากเซลล์เพื่อเป็นตัวเร่งปฏิริยาไฮโดรไลซิส หลังจากนั้นสารอินทรีย์ขนาดเล็กจึงจะถูกดูดซึมเข้าสู่เยื่อหุ้มเซลล์ของแบคทีเรียได้โดยตรง

ปฏิริยาการเกิดกรด (Acidogenesis) คือปฏิริยาย่อยสลายสารที่มีขนาดเล็ก ได้แก่ สารจำพวกน้ำตาล อะมิโน และกรดไขมัน ด้วยกระบวนการหมัก (Fermentation) ผลผลิตที่ได้ส่วนใหญ่คือกรดอินทรีย์ นอกจากนี้ยังพบผลิตภัณฑ์อื่นอีก ยกตัวอย่างเช่น ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และกรดแอสติก ปะปนออกมาโดยจะขึ้นอยู่กับชนิดของแบคทีเรียและสภาวะแวดล้อมของการเกิดปฏิริยา

ปฏิริยาสร้างกรดแอสติก (Acetogenesis) คือปฏิริยาที่ย่อยสลายกรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่เกิดจากขั้นตอนของปฏิริยาการเกิดกรดให้เป็นกรดแอสติกโดยแบคทีเรียกลุ่มแอสโตเจนิค (Acetogenic) ซึ่งเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญของการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน เนื่องจากในขั้นตอนสุดท้ายซึ่งเป็นขั้นตอนที่ต่อจากขั้นตอนนี้จะสามารถใช้สารตั้งต้นที่มีปริมาณคาร์บอนจำนวน 1 หรือ 2 อะตอมเท่านั้น ได้แก่ กรดแอสติก กรดฟอร์มิก เมทานอล และเมทิลามีน รวมทั้งก๊าซไฮโดรเจนด้วย โดยจะต้องมีสภาวะแวดล้อมในถังย่อยสลายที่เหมาะสม

ปฏิริยาสร้างก๊าซมีเทน (Methanogenesis) คือปฏิริยาเปลี่ยนกรดแอสติกหรือก๊าซไฮโดรเจนให้เป็นก๊าซมีเทนภายใต้ภาวะที่ไม่มีออกซิเจนโดยแบคทีเรียกลุ่มเมทาโนเจน (Methanogen) ซึ่งเป็นแบคทีเรียที่สร้างก๊าซมีเทน แบคทีเรียกลุ่มนี้เป็นพวกอาร์เคียแบคทีเรีย (Archaeobacteria) ที่มีอัตราการเจริญช้ามากและยังเป็นแบคทีเรียที่สามารถใช้สารตั้งต้นเพียงบางชนิดคือ สารที่มีคาร์บอนเพียง 1 หรือ 2 อะตอมเท่านั้น ส่วนกรดอินทรีย์ที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม แบคทีเรียที่สร้างก๊าซมีเทนจะไม่สามารถใช้เป็นสารตั้งต้นได้ ดังนั้นจะต้องอาศัยแบคทีเรียกลุ่มอื่นเปลี่ยนกรดอินทรีย์ต่างๆ ให้เป็นกรดแอสติกหรือก๊าซไฮโดรเจนเสียก่อน แบคทีเรียกลุ่มนี้จึงจะสามารถย่อยสลายไปเป็นก๊าซมีเทนต่อไปได้ (สุภัณฑิลา นิมรต์, 2548)

2.11.3 ข้อดีของกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน

กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนเป็นกระบวนการที่ไม่ต้องเติมก๊าซออกซิเจนแก่ระบบเหมือนกับกระบวนการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจน จึงช่วยลดค่าใช้จ่ายในกระบวนการได้ แม้ว่ากระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนจะใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวรับอิเล็กตรอนแต่ก็ไม่จำเป็นต้องเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้แก่ถังย่อยสลายเพราะเป็นก๊าซที่พบได้ในสิ่งแวดล้อมทุกระบบ อีกทั้งกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนเป็นกระบวนการที่เกิดจากแบคทีเรียกลุ่มที่ไม่ใช้ออกซิเจนซึ่งเป็นแบคทีเรียกลุ่มที่มีการเจริญช้ากว่ากลุ่มแบคทีเรียที่ใช้ออกซิเจน ดังนั้นจึงผลิตกากตะกอนหรือเซลล์จุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นใหม่ในปริมาณที่น้อยกว่าซึ่งจะทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการบำบัดกากตะกอนในขั้นตอนต่อไป นอกจากนี้กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนเป็นระบบที่เหมาะสมสำหรับของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ปนเปื้อนในปริมาณที่สูง อีกทั้งยังสามารถย่อยสลายสารที่มนุษย์สร้างขึ้นในขณะที่กระบวนการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจนไม่สามารถย่อยสลายสารเหล่านั้นได้ (สัจฉิต นิมรัตน์, 2548)

2.12 เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์กับระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน

ระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนเป็นระบบบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยาที่ไม่ต้องเติมออกซิเจนอิสระหรืออากาศให้แก่ระบบบำบัด และผลพลอยได้สำคัญที่ได้จากระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนคือ ก๊าซชีวภาพ ซึ่งอาศัยจุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียไปเป็นก๊าซชีวภาพที่มีก๊าซมีเทน (CH_4) เป็นองค์ประกอบหลักซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ จากลักษณะดังกล่าวจึงทำให้ระบบบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยาแบบไม่ใช้ออกซิเจนเป็นระบบบำบัดที่ประหยัดพลังงานมากที่สุดในการเดินระบบเพราะไม่จำเป็นต้องเติมอากาศให้กับระบบบำบัดน้ำเสียรวมทั้งได้ก๊าซมีเทนซึ่งสามารถใช้เป็นแหล่งพลังงานได้อีกด้วย

ซึ่งกระบวนการผลิตก๊าซมีเทนในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนต้องการกรดอินทรีย์จากกระบวนการไฮโดรไลซิสและกระบวนการหมัก (Acidogenesis) เพื่อสังเคราะห์กรดระเหยง่าย (Volatile acid) และไฮโดรเจนให้แก่จุลินทรีย์กลุ่มที่สร้างก๊าซมีเทนเพื่อเป็นสารตั้งต้นของปฏิกิริยาการสร้างก๊าซมีเทน โดยจุลินทรีย์กลุ่มนี้เป็นแบคทีเรียที่สามารถใช้สารตั้งต้นเพียงบางชนิดคือ สารที่มีคาร์บอนเพียง 1 หรือ 2 อะตอมเท่านั้น หากเป็นกรดอินทรีย์ที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม จะไม่สามารถใช้เป็นสารตั้งต้นได้ ต้องอาศัยแบคทีเรียกลุ่มอื่นเปลี่ยนกรดอินทรีย์เหล่านั้น

ให้เป็นกรดแอสติกหรือก๊าซไฮโดรเจนเสียก่อน จึงจะสามารถย่อยสลายไปเป็นก๊าซมีเทนต่อไปได้นอกจากนี้แบคทีเรียกลุ่มนี้เป็นพวกอาร์เคียแบคทีเรีย ซึ่งมีอัตราการเจริญช้ามาก อีกทั้งปริมาณความเข้มข้นของกรดระเหยง่ายต่ำและค่าความเป็นกรดเบสที่ต่ำก็ยิ่งเป็นการยับยั้งกระบวนการสร้างก๊าซมีเทนด้วย (สุภัณฑิต นิมรัตน์, 2548)

จากข้อจำกัดต่างๆ ที่มากมายจึงทำให้เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์มีความเป็นไปได้ที่จะแทนที่กระบวนการสร้างก๊าซมีเทน เนื่องจากจุลินทรีย์กลุ่มผลิตกระแสไฟฟ้ามีอัตราการเจริญเร็วกว่ากลุ่มที่สร้างมีเทนจึงสามารถเปลี่ยนกรดระเหยง่ายให้เป็นกระแสไฟฟ้าได้เร็วกว่า โดยทั่วไประบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศจะต้องควบคุมปริมาณกรดอินทรีย์และค่าความเป็นกรดเบส เพราะหากมีปริมาณกรดสะสมมากจะส่งผลให้ค่าความเป็นกรดเบสต่ำซึ่งจะยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์กลุ่มที่สร้างก๊าซมีเทนทำให้ระบบล้มเหลว ดังนั้นจึงสามารถควบคุมให้เกิดการผลิตกระแสไฟฟ้ามากกว่าการสร้างก๊าซมีเทนได้โดยควบคุมได้ด้วยอัตราการให้อาหาร โดยใช้ระยะเวลาพักทางจุลศาสตร์น้อยซึ่งทำให้อัตราการให้อาหารเข้าระบบเร็ว เพื่อเพิ่มปริมาณสารตั้งต้นสำหรับจุลินทรีย์กลุ่มที่สังเคราะห์กรดระเหยง่าย ทำให้สามารถผลิตกรดระเหยง่ายในปริมาณมากให้แก่จุลินทรีย์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า (Logan, 2007)

2.13 การวิเคราะห์ในน้ำเสีย

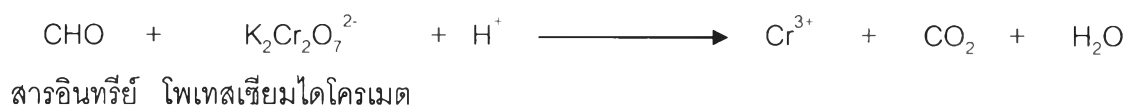
2.13.1 การวิเคราะห์ค่าซีโอดี

ค่าซีโอดี(Chemical Oxygen Demand หรือ COD) เป็นการวัดปริมาณออกซิเจนที่นำไปใช้ในการสลายสารอินทรีย์ที่มีในตัวอย่างน้ำได้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ดังนั้นการวิเคราะห์หาค่าซีโอดีจึงมีความสำคัญต่อระบบบำบัดน้ำเสียโดยการวิเคราะห์ซีโอดีใช้บ่งชี้ปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเสีย คำนวณประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ได้ การวิเคราะห์ค่าซีโอดีใช้เวลาสั้นประมาณ 3 ชั่วโมง จึงเหมาะสมในการควบคุมดูแลระบบบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากสามารถแก้ไขได้ทันทีที่มีความผิดพลาดเกิดขึ้น

หลักการ

ตัวอย่างน้ำจะถูกต้มในสารละลายกรดแก่ที่รู้ปริมาณของโพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) ซึ่งเป็นสารออกซิไดส์ที่มีความแรงสูง สารอินทรีย์ส่วนใหญ่จะถูกย่อยสลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และ น้ำ (H_2O) ในสารละลายผสมของโครมิกและกรดซัลฟูริกที่ต้มเดือด หลังจากย่อยสลายแล้ว หาปริมาณ $K_2Cr_2O_7$ ที่ถูกใช้ไปโดยการนำมาไตเตรทกับเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS) แล้วจึงนำมาคำนวณหาปริมาณออกซิเจนที่อยู่ใน $K_2Cr_2O_7$ ที่ถูกใช้ไป ซึ่งก็คือปริมาณออกซิเจนที่ใช้เพื่อสลายสารอินทรีย์ในตัวอย่างน้ำนั้น (คู่มือวิเคราะห์น้ำเสีย 2545)

ซิลเวอร์และความร้อน



สมการแสดงการออกซิไดส์สารอินทรีย์ในภาวะที่เป็นกรดโดยมีซิลเวอร์และความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

2.13.2 การวิเคราะห์กรดระเหยง่าย

กรดระเหยง่าย (Volatile fatty acid หรือ VFA) จัดเป็นกรดไขมันที่ละลายน้ำได้จึงสามารถกลั่นออกมาได้ที่ความดันบรรยากาศ ดังนั้นการวิเคราะห์กรดระเหยง่ายจึงสามารถทำได้ทั้งโดยวิธีการกลั่นและวิธีไตเตรท กรดระเหยง่ายประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ คือ อะซิติก โพรพิโอนิก บิวทิริก และส่วนที่สำคัญรองลงมาอีก 3 ชนิด คือ วาเลริก ไอโซวาเลริก และคาโปรอิก ในการบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยาแบบไม่ใช้ออกซิเจนจะเกิดกรดระเหยง่ายขึ้นเป็นจำนวนมาก ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนทั่วไปกรดระเหยง่ายที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนแปลงไปเป็นก๊าซมีเทน หากการเปลี่ยนแปลงกรดระเหยง่ายไปเป็นก๊าซมีเทนช้ากว่าอัตราที่มันเกิดขึ้น ปริมาณกรดระเหยง่ายจะสะสมมากขึ้นทำให้ระบบบำบัดมีพีเอชลดลง เมื่อความเข้มข้นของคาร์บอนเตลด์ต่ำกว่า 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปของ $CaCO_3$ ขณะที่มีการระเหยง่ายสะสมอยู่มากจะทำให้พีเอชลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะทำให้ระบบบำบัดล้มเหลวได้ ดังนั้นในระบบบำบัดน้ำเสียทั่วไปจึงต้องควบคุมปริมาณกรดระเหยง่าย ในระบบของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ที่ประยุกต์กับระบบบำบัดน้ำเสียก็เช่นเดียวกัน กรดระเหยง่ายที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนแปลงไปเป็นไฟฟ้าแทนก๊าซมีเทน

ความสำคัญต่อระบบบำบัดน้ำเสีย

การย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนจะแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน คือ

ขั้นตอนที่ 1 สารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ในน้ำเสีย ได้แก่ โปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต จะถูกแบคทีเรียย่อยสลายโดยปล่อยเอนไซม์ออกมาย่อยสลายนอกเซลล์ ทำให้สารอินทรีย์มีโมเลกุลเล็กลง เช่น กรดอะมิโน กรดไขมัน กลูโคส

ขั้นตอนที่ 2 แบคทีเรียกลุ่มที่สร้างกรดจะสลายสารอินทรีย์โมเลกุลเล็กนี้ ให้ได้กรดระเหยง่าย หรือแอลกอฮอล์ โดยส่วนใหญ่จะเป็นกรดระเหยง่าย

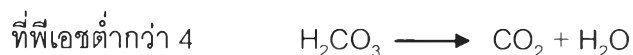
ขั้นตอนที่ 3 กรดระเหยง่ายจะถูกสลายเป็นก๊าซมีเทน คาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำโดยแบคทีเรียกลุ่มที่สร้างมีเทน (สับบัติน นิมรต์น, 2548) ขณะที่ในระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ที่ประยุกต์กับระบบบำบัดน้ำเสียกรดระเหยง่ายจะถูกสร้างเป็นไฟฟ้าโดยจุลินทรีย์กลุ่มที่ผลิตไฟฟ้า (Logan, 2007)

หลักการวิเคราะห์

ขั้นที่ 1 เป็นการหาสภาพต่างโดยไตเตรทตัวอย่างน้ำด้วย H_2SO_4 จนกระทั่งพีเอชเป็น 4 มีปฏิกิริยาดังนี้



ขั้นที่ 2 ไล่ H_2CO_3 ไตเตรทตัวอย่างน้ำด้วย H_2SO_4 ต่อจนกระทั่งได้พีเอช 3.3-3.5 มีปฏิกิริยาดังนี้



ไล่ CO_2 ออกจากตัวอย่างน้ำด้วยการต้ม

ขั้นที่ 3 ไตเตรทกลับจากพีเอช 4 เป็น 7 แล้วไตเตรทตัวอย่างน้ำด้วย NaOH นับจากพีเอช 4 จนเป็น 7 มีปฏิกิริยาดังนี้



2.14 แหล่งน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลไม้กระป๋อง

อุตสาหกรรมผลไม้กระป๋อง จัดอยู่ในกลุ่มของอุตสาหกรรมอาหารโดยการนำผลไม้สดมาแปรรูปเป็นอาหารกระป๋อง และสามารถนำน้ำผลไม้บรรจุกระป๋องซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการผลิตจากการสำรวจสถิติการส่งออกของประเทศไทยสินค้าส่งออกประเภทผลไม้บรรจุกระป๋องเพิ่มสูงขึ้นมาก โดยพบว่าในปี พ.ศ.2542 การส่งออกผลไม้บรรจุกระป๋องมีมูลค่า 784.4 ล้านบาท (สุนทรี อยู่สถาน, 2550) ขณะที่ในปี พ.ศ. 2553 มีมูลค่าสูงถึง 42,624 ล้านบาท (พาณิชย์, 2554)

การผลิตเพื่อเพิ่มรายได้ในอุตสาหกรรมผลไม้กระป๋อง ก่อให้เกิดปัญหาสำคัญทางด้านสิ่งแวดล้อม ซึ่งน้ำเสียเป็นปัญหาที่สำคัญที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรมผลไม้กระป๋อง เนื่องจากมีปริมาณการใช้น้ำสูงเกือบทั้งกระบวนการผลิต โดยน้ำเสียส่วนใหญ่เกิดขึ้นในกระบวนการล้างทำความสะอาดวัตถุดิบ ก่อให้เกิดการปนเปื้อนสารอินทรีย์สูง จากการศึกษาวิจัยพบว่าปริมาณน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมผลไม้กระป๋องมีค่าความสกปรกที่วัดในรูปของ BOD₅ สูงถึง 114,530 ตันต่อปี (สุนทรี อยู่สถาน, 2550) โดยน้ำเสียส่วนใหญ่ถูกระบายลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติในบริเวณใกล้เคียงกับโรงงานการผลิต จึงก่อให้เกิดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมทั้งแก่โรงงานและชุมชนโดยรอบ

2.14.1. การใช้น้ำแต่ละสายการผลิต

เนื่องจากโรงงานมีผลิตภัณฑ์หลายชนิด จากตารางที่ 2.5 แต่ละสายการผลิตมีการใช้น้ำต่างกันและมีกำลังการผลิตต่างกัน สายการผลิตสับปะรดมีการใช้น้ำ 308 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ซึ่งมากกว่าสายการผลิตผลไม้กระป๋องที่ใช้น้ำเพียง 274 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ซึ่งจากการวิเคราะห์ข้อมูลทำให้ทราบว่าเหตุผลที่สายการผลิตสับปะรดมีการใช้น้ำมาก เนื่องจากมีกำลังการผลิตสูงสุด โดยดูจากปริมาณวัตถุดิบที่เข้าสู่กระบวนการผลิตสูงถึง 377 ตันต่อวัน และในกระบวนการผลิตปกติของผลไม้กระป๋องเกิดน้ำเสียค่อนข้างมากทั้งนี้อาจเกิดมาจากกระบวนการล้างและชนิดของผลไม้ และหากเปรียบเทียบปริมาณการใช้น้ำต่อปริมาณวัตถุดิบ พบว่าในสายการผลิตผลไม้กระป๋องมีการใช้น้ำ 8.56 ลูกบาศก์เมตรต่อตันวัตถุดิบ ขณะที่สายการผลิตสับปะรดกระป๋องจะใช้น้ำน้อยกว่าคือ 0.8 ลูกบาศก์เมตรต่อตันวัตถุดิบ จึงอธิบายได้ว่าปริมาณการผลิตเป็นปัจจัยสำคัญต่อการใช้น้ำ กล่าวคือหากกำลังผลิตสูงจะทำให้การใช้น้ำต่อปริมาณวัตถุดิบลดลง อีกข้อสังเกตคือการผลิตน้ำผลไม้กระป๋องมีการใช้น้ำที่สูงมาก อาจเนื่องมาจากน้ำส่วนหนึ่งถูกใช้ไปเป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์ เช่น ผสมในน้ำผลไม้ รวมไปถึงใช้ในการทำความสะอาดเครื่องจักรอุปกรณ์ (สุนทรี อยู่สถาน, 2550)

2.14.2. ปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละสายการผลิต

จากตารางที่ 2.5 พบว่ากระบวนการผลิตสับปะรดกระป๋องหรือผลไม้กระป๋องมีน้ำเสียเกิดขึ้นในปริมาณที่สูง โดยปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นต่อตันวัตถุดิบในสายการผลิตผลไม้กระป๋องมีค่าสูงถึง 6.95 ลูกบาศก์เมตรต่อตันวัตถุดิบ ในขณะที่สายการผลิตสับปะรดกระป๋องมีน้ำเสียเกิดขึ้น เพียง 0.65 ลูกบาศก์เมตรต่อตันวัตถุดิบ และกระบวนการผลิตของสายการผลิตสับปะรดกระป๋องหรือผลไม้กระป๋อง น้ำเสียจะเกิดในปริมาตร ปริมาณร้อยละ 80 ของน้ำใช้ อาจเป็นเพราะน้ำอยู่ในผลิตภัณฑ์หรือเป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์ส่วนหนึ่ง (สุนทรีย์ อยู่สถาน, 2550)

2.14.3. คุณสมบัติของน้ำเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละสายการผลิต

จากตารางที่ 2.6 พบว่าน้ำเสียเกิดขึ้นจากสายการผลิตมีค่าความสกปรกที่แตกต่างกัน น้ำเสียที่เกิดขึ้นในการผลิตผลไม้กระป๋องมีค่าความสกปรกสูงมากคือมีค่าซีไอดี 2581 มิลลิกรัมต่อลิตร นอกจากนี้พบว่าสารแขวนลอยในน้ำเสียจากสายการผลิตสับปะรดกระป๋อง และสายการผลิตผลไม้กระป๋อง มีค่าสูงถึง 130 และ 169 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ อาจจะเป็นเกิดจากกระบวนการผลิตในแต่ละสายการผลิตรวมทั้งชนิดของผลิตภัณฑ์ กล่าวคือ หากเป็นผลไม้กระป๋องแล้วมีความหลากหลายของชนิดของผลไม้คุณภาพของผลไม้ทำให้น้ำเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการล้างมีการปนเปื้อนสิ่งสกปรกได้สูง ส่วนกรณีของน้ำผลไม้ น้ำเสียอาจจะมีการปนเปื้อนจากน้ำผลไม้มากในขั้นตอนการผลิต การบรรจุ และการล้างทำความสะอาดเป็นต้น

นอกจากนี้หากพิจารณาปริมาณความสกปรกที่เกิดขึ้นในแต่ละวัน ในแต่ละสายการผลิต ดังแสดงในตารางที่ 2.7 พบว่า สายการผลิตผลไม้กระป๋องจะผลิตสิ่งสกปรกในรูปของบีโอดี หรือ ซีไอดี สูงสุดคือ 335 และ 566 กิโลกรัมต่อวัน ตามลำดับ ทั้งนี้อาจจะเนื่องมาจากกำลังการผลิตในแต่ละสายการผลิตสับปะรดกระป๋องมีปริมาณสูงสุด โดยดูได้จากวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตแต่เมื่อพิจารณาความสกปรกที่เกิดขึ้นต่อปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ในแต่ละสายการผลิต ดังตารางที่ 2.8 พบว่าสายการผลิตผลไม้กระป๋องนั้นมีค่าความสกปรกในรูปซีไอดีสูงสุดคือ 18 กิโลกรัมซีไอดีต่อตันวัตถุดิบ ขณะที่สายการผลิตสับปะรดกระป๋องมีค่าความสกปรกเกิดขึ้นต่ำสุดคือ 1.03 กิโลกรัมซีไอดีต่อตันวัตถุดิบ อาจจะอธิบายได้ว่าในสายการผลิตผลไม้กระป๋องนั้น หากเป็นผลไม้ชนิดอื่นๆ ที่ไม่ใช่สับปะรดแล้วอาจจะมีการปนเปื้อนของสิ่งสกปรกในวัตถุดิบค่อนข้างสูง รวมทั้งความหลากหลายของชนิดและขนาดผลไม้ ทำให้อัตราการผลิตเกิดน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของสิ่งสกปรกค่อนข้างสูง (สุนทรีย์ อยู่สถาน, 2550)

ตารางที่ 2.5 ตารางแสดงค่าปริมาณการใช้น้ำ ปริมาณวัตถุดิบ ปริมาณน้ำเสียในแต่ละสาย
กระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมผลไม้กระป๋อง

ข้อมูลที่ทำการศึกษา	กระบวนการผลิตผลไม้กระป๋อง	
	สับปะรด	ผลไม้ชนิดอื่น
ปริมาณน้ำใช้ (ลบ.ม/วัน) เฉลี่ย	308	274
ปริมาณวัตถุดิบ (ตัน/วัน) เฉลี่ย	377	32
ปริมาณน้ำเสีย (ลบ.ม/วัน) เฉลี่ย	246	219
น้ำที่หายในกระบวนการผลิต (ลบ.ม/วัน) เฉลี่ย	62	55
ปริมาณการใช้น้ำ/ตัน วัตถุดิบ (ลบ.ม/ตัน) ช่วง	0.66-1.05	4.60-12.86
	เฉลี่ย	0.82
ปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้น / ตันวัตถุดิบ (ลบ.ม/ตัน) ช่วง	0.5-0.8	3.7-10.3
	เฉลี่ย	0.65
%ปริมาณน้ำเสีย / น้ำใช้ ช่วง	75.76-76.15	80.34-84.45
	เฉลี่ย	79.27
%น้ำที่หายในกระบวนการผลิต เฉลี่ย	20.73	18.81

ที่มา : สุนทรী, 2550

ตารางที่ 2.6 ตารางแสดงค่าเฉลี่ยคุณสมบัติของน้ำเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละกระบวนการผลิตของ
โรงงานอุตสาหกรรมผลไม้กระป๋อง

ข้อมูลที่ทำการศึกษา	กระบวนการผลิตผลไม้กระป๋อง	
	สับปะรด	ผลไม้ชนิดอื่น
pH	4.47	5.48
ปริมาณน้ำเสีย (ลบ.ม/วัน)	246	219
BOD ₅ (มก./ล)	820	1523
COD (มก./ล)	1583	2581
SS (มก./ล)	130	169

ที่มา : สุนทรী, 2550

ตารางที่ 2.7 ตารางแสดงค่าเฉลี่ยปริมาณความสกปรกที่เกิดขึ้นต่อวันในแต่ละกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมผลไม้กระป๋อง

ข้อมูลที่ทำการศึกษา	กระบวนการผลิตผลไม้กระป๋อง	
	สัปดาห์	ผลไม้อื่น
ปริมาณน้ำเสีย (ลบ.ม./วัน)	246	219
BOD ₅ (กก./วัน)	204	335
COD (กก./วัน)	391	566
SS (กก./วัน)	32.19	36.33

ที่มา : สุนทร, 2550

ตารางที่ 2.8 ตารางแสดงค่าปริมาณความสกปรกที่เกิดขึ้นต่อตันวัตถุดิบในแต่ละกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมผลไม้กระป๋อง

ข้อมูลที่ทำการศึกษา	กระบวนการผลิตผลไม้กระป๋อง	
	สัปดาห์	ผลไม้อื่น
ปริมาณน้ำเสีย (ตัน/วัน)	377	-
BOD ₅ (กก./ตัน)	0.54	10.52
COD (กก./ตัน)	1.03	18
SS (กก./ตัน)	0.08	1.17

ที่มา : สุนทร, 2550

ตารางที่ 2.9 ตารางแสดงคุณสมบัติของน้ำเสียก่อนและหลังผ่านระบบการบำบัดน้ำเสียและประสิทธิภาพของระบบบำบัดของโรงงานอุตสาหกรรมผลไม้กระป๋อง

คุณสมบัติของน้ำเสีย	ค่าเฉลี่ยผลการวิเคราะห์คุณสมบัติ				
	pH	BOD ₅ มก./ล	COD มก./ล	SS มก./ล	FOG มก./ล
ก่อนผ่านระบบบำบัด	5.27	2965	6320	144	11
หลังผ่านระบบบำบัด	7.5	9	43	13	-
ค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง	<5.5-9.0	<20	<120	<30-50	<100
ประสิทธิภาพของการบำบัด(%)	-	99.7	99	91	100

ที่มา : สุนทร, 2550

2.15 งานวิจัยเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ในประเทศไทย

กมล รอดอยู่ (2551) ได้คัดเลือกแบคทีเรียด้วยกระแสไฟฟ้าค่าต่างๆ และนำมาทดสอบในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ปราศจากตัวนำพาอิเล็กตรอน ทดลองโดยออกแบบและประดิษฐ์โมเดล Glass I และ Glass II จากการทดสอบความสามารถในการส่งอิเล็กตรอนด้วยตัวเองในโมเดล Glass I ทำให้สามารถสรุปได้ว่าความสามารถในการรีดิวซ์ไฮดรอนเหล็กเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการผลิตกระแสไฟฟ้าของแบคทีเรียในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพมากกว่าความสามารถในการทนต่อกระแสไฟฟ้า หลังจากทดสอบในโมเดล Glass II เพื่อคัดเลือกแบคทีเรียที่มีความสามารถในการรีดิวซ์ไฮดรอนของเหล็กภายใต้ภาวะที่ไม่มีอากาศ พบว่า *Proteus vulgaris* ที่ทดสอบใน ให้ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงที่สุดถึง 0.62 มิลลิวัตต์ต่อตารางเมตร

Sarinee และคณะ (2007) ได้ศึกษาค่าอิมพีแดนซ์ของวัสดุขั้วไฟฟ้าแอโนด 5 ชนิด เพื่อวิเคราะห์ค่าอิมพีแดนซ์ซึ่งเป็นค่าความต้านทานระหว่างรอยต่อของขั้วไฟฟ้ากับสารละลาย ค่าอิมพีแดนซ์มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ โดยพบว่านิเกิลออกไซด์และสแตนเลส มีค่าอิมพีแดนซ์สูงทำให้จำกัดการถ่ายโอนอิเล็กตรอนในระบบเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ ขณะที่ผ้าเส้นใยคาร์บอนมีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำกว่าทำให้ถ่ายโอนอิเล็กตรอนได้สะดวกส่งผลให้มีประสิทธิภาพการทำงานสูงกว่ายืนยันได้จากค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าของผ้าเส้นใยคาร์บอนซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.8 มิลลิวัตต์ต่อตารางเมตร จึงได้เสนอว่าผ้าเส้นใยคาร์บอนเป็นวัสดุขั้วไฟฟ้าที่ช่วยถ่ายโอนอิเล็กตรอนได้ดีและให้กำลังไฟฟ้าสูงในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ