

## การวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ของอิเล็กทรอนิกส์ในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ

สาริณี อู่ยตระกูล<sup>1</sup> มานะ ศรียุทธศักดิ์<sup>2</sup>

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

สมิตรา จรสโรจน์กุล<sup>3</sup>

สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย ปทุมธานี 12120

และ โตชิฮิเดะ กากิโซโน<sup>4</sup>

ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพโมเลกุล มหาวิทยาลัยอิโรซิม่า อิกาชิ-อิโรซิม่า ญี่ปุ่น 73-8530

รับเมื่อ 17 ตุลาคม 2549 ตอบรับเมื่อ 17 สิงหาคม 2550

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์กระแสสลับของอิเล็กทรอนิกส์ 8 ชนิด คือ เงิน, สแตนเลส, อะลูมิเนียม, นิกเกิล, ฟังก์คาร์บอน, กระจกคาร์บอน, ฟังก์คาร์บอนเคลือบทอง และกระจกคาร์บอนเคลือบทอง การวัดอิมพีแดนซ์เป็นแนวทางหนึ่งในการวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์ สามารถนำมาใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพเพื่อวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ที่ส่งผลต่อการจำกัดการถ่ายโอนอิเล็กตรอนภายในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ ระบบที่ใช้วัดอิมพีแดนซ์ประกอบด้วยสารละลายบัฟเฟอร์และอิเล็กทรอนิกส์ ดังนั้นวงจรสมมูลประกอบด้วยความต้านทานของสารละลาย ( $R_s$ ) และอิมพีแดนซ์ของอิเล็กทรอนิกส์ ( $Z_E$ ) ต่ออนุกรมกับความต้านทานระหว่างรอยต่อของอิเล็กทรอนิกส์กับสารละลาย ( $R_i$ ) ที่ต่อขนานอยู่กับ CPE อิมพีแดนซ์ (Constant-Phase Element impedance:  $Z_{CPE}$ ) จากผลการทดลองพบว่า  $R_i$  และ  $Z_{CPE}$  มีผลต่อการถ่ายโอนอิเล็กตรอนระหว่างรอยต่อของอิเล็กทรอนิกส์และสารละลาย โดยพบว่าอิเล็กทรอนิกส์ฟังก์คาร์บอน, กระจกคาร์บอน, ฟังก์คาร์บอนเคลือบทอง, กระจกคาร์บอนเคลือบทองและเงินมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นอิเล็กทรอนิกส์ของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ เนื่องจากมีค่า  $R_i$  และ  $Z_{CPE}$  ต่ำพอที่จะทำให้อิเล็กทรอนิกส์สามารถถ่ายโอนได้สะดวก ในขณะที่อิเล็กทรอนิกส์สแตนเลส, อะลูมิเนียมและนิกเกิลมีค่า  $R_i$  และ  $Z_{CPE}$  สูงซึ่งทำให้เกิดการจำกัดการถ่ายโอนอิเล็กตรอนภายในระบบ ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้กับเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ

ผลการวัดอิมพีแดนซ์ที่ได้นี้จะนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า, กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า ซึ่งเลือกทดสอบอิเล็กทรอนิกส์เพียง 4 ชนิด คือ ฟังก์คาร์บอน, กระจกคาร์บอน, เงิน และสแตนเลส เพื่อแสดงให้เห็นว่าอิเล็กทรอนิกส์ที่มีอิมพีแดนซ์ระหว่างรอยต่อของอิเล็กทรอนิกส์และสารละลายที่มีค่าสูงส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพต่ำ และอิเล็กทรอนิกส์ที่มีอิมพีแดนซ์ระหว่างรอยต่อของอิเล็กทรอนิกส์และสารละลายมีค่าต่ำ ส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพสูง จากผลการทดลองพบว่าที่โหลด 1 kΩ อิเล็กทรอนิกส์ฟังก์คาร์บอน, กระจกคาร์บอนและเงิน เป็นอิเล็กทรอนิกส์ที่มีอิมพีแดนซ์ระหว่างรอยต่อของอิเล็กทรอนิกส์และสารละลายต่ำกว่าอิเล็กทรอนิกส์สแตนเลส และจ่ายกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าสูงกว่าอิเล็กทรอนิกส์สแตนเลส 3-4 เท่า และ 17-22 เท่า ตามลำดับ ดังนั้นกล่าวได้ว่าการวิเคราะห์อิมพีแดนซ์มีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพคือประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพจะสูงก็ต่อเมื่ออิมพีแดนซ์ของระบบมีค่าต่ำ

**คำสำคัญ :** การวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ / อิเล็กทรอนิกส์ / เซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ / การถ่ายโอนอิเล็กตรอน

<sup>1</sup> นักศึกษาปริญญาเอก ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

<sup>2</sup> รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

<sup>3</sup> นักวิจัย ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ

<sup>4</sup> รองศาสตราจารย์ ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพโมเลกุล

## Impedance Analysis of Electrodes in Bio-Fuel Cell

Sarinee Ouitrakul<sup>1</sup>, Mana Sriyudthsak<sup>2</sup>

Department of Electrical Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok 10330

Sumittra Charojrochkul<sup>3</sup>,

National Science and Technology Development Agency, Pathumthani 12120

and Toshihide Kakizono<sup>4</sup>

Department of Molecular Biotechnology, Hiroshima University, Higashi-Hiroshima, Japan 73-8530

*Received 17 October 2006 ; accepted 17 August 2007*

### Abstract

The present paper reports an AC-impedance measurement of eight electrodes; silver, stainless steel, aluminum, nickel, carbon fiber cloth, carbon paper, gold-coated carbon fiber cloth and gold-coated carbon paper. The impedance measurement is a technique used in analyzing electrical properties of electrode for applying the bio-fuel cell (BFC). The impedance analysis results will point out which component is an electron transfer limiting part in the BFC. The impedance measuring system consists of only a buffer solution and electrode. Therefore, the equivalent circuit consists of a solution resistance [ $R_s$ ], electrode impedance [ $Z_e$ ], interfacial resistance [ $R_i$ ] and constant-phase element impedance [ $Z_{CPE}$ ]. The results indicate that  $R_i$  and  $Z_{CPE}$  is an electron transfer limiting component between electrode and solution interface. Carbon fiber cloth, carbon paper, gold-coated carbon fiber cloth, gold-coated carbon paper and silver are suitable for using as the BFC electrode since their  $R_i$  and  $Z_{CPE}$  are low enough for facile electron transfer in the system. While stainless steel, aluminum and nickel have high  $R_i$  and  $Z_{CPE}$  which limit the electron transfer in the system then they are not suitable for the BFC application.

The impedance measurement results were compared with the BFC performance test which are generated voltage, current and power. The performance test have been carried out for only 4 electrode; carbon fiber cloth, carbon paper, silver and stainless steel. The high interfacial impedances make low BFC performance and the low interfacial impedances make high BFC performance. At 1 k $\Omega$  load, it was found that carbon fiber cloth, carbon paper and silver could generate the current and power higher than stainless steel 3~4 and 17~22 times, respectively. Therefore, the impedance results were correlated with the BFC performance that the performances of the BFC will be high when the impedance of the system is low.

**Keywords :** Impedance Analysis / Electrode / Bio-Fuel Cell / Electron Transfer

<sup>1</sup> Ph. D. Candidate, Department of Electrical Engineering.

<sup>2</sup> Associate Professor, Department of Electrical Engineering.

<sup>3</sup> Researcher, National Metal and Materials Technology Center.

<sup>4</sup> Associate Professor, Department of Molecular Biotechnology.

## 1. บทนำ

เซลล์เชื้อเพลิงเป็นพลังงานทดแทนรูปแบบหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจจากนักวิจัยด้านพลังงาน เนื่องจากเป็นพลังงานสะอาดที่ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม เซลล์เชื้อเพลิงจ่ายพลังงานโดยอาศัยปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี ซึ่งแบ่งออกได้หลายแบบขึ้นอยู่กับอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ เช่น เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane Fuel Cells, PEMFC), เซลล์เชื้อเพลิงแบบกรดฟอสฟอริก (Phosphoric Acid Fuel Cells, PAFC) และเซลล์เชื้อเพลิงแบบมีเทนอลโดยตรง (Direct Methanol Fuel Cells, DMFC) ฯลฯ [1] เซลล์เชื้อเพลิงเหล่านี้จะใช้ไฮโดรเจนหรือสารไฮโดรคาร์บอนเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งการได้มาของเชื้อเพลิงต้องเสียค่าใช้จ่าย และสูญเสียพลังงานในกระบวนการผลิต จากสาเหตุดังกล่าวนำไปสู่การพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงอีกรูปแบบหนึ่ง ที่เรียกว่าเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ (Bio-Fuel Cell) เป็นแหล่งจ่ายพลังงานที่นำพลังงานจากกระบวนการเผาผลาญอาหารของจุลินทรีย์มาใช้ได้โดยตรง เนื่องจากผลพลอยได้ของกระบวนการนี้คือ โปรตอน, อิเล็กตรอน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยอิเล็กตรอนและโปรตอนที่ได้จากกระบวนการนี้จะถูกนำไปใช้ในการแปลงรูปเป็นพลังงาน

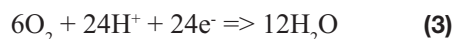
การวิจัยเกี่ยวกับเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพเกิดขึ้นตั้งแต่ปี ค.ศ. 1912 โดย Potter [2] ต่อมาในปี ค.ศ. 1990 Benetto [3] ได้สร้างแบบจำลองเบื้องต้นเพื่อพิสูจน์ให้เห็นว่า จุลินทรีย์สามารถนำมาใช้ในการผลิตพลังงานได้ โดยใช้ *E.Coli* เป็นจุลินทรีย์ และใช้กลูโคส ( $C_6H_{12}O_6$ ) เป็นเชื้อเพลิง ซึ่งกระบวนการเผาผลาญกลูโคส แสดงได้ดังสมการที่ (1)



จากสมการที่ (1) กระบวนการเผาผลาญสารอาหารที่เกิดจากจุลินทรีย์สิ้นสุดที่วัฏจักรเครบส์จะได้ผลผลิตเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ), โปรตอน ( $H^+$ ) และอิเล็กตรอน ( $e^-$ ) แสดงปฏิกิริยาได้ดังสมการที่ (2)

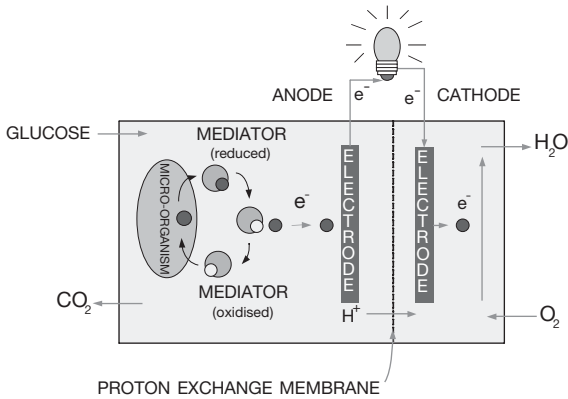


หลังจากนั้นโปรตอนและอิเล็กตรอนจะถูกส่งไปยังระบบการถ่ายเทอิเล็กตรอน (Electron Transport System : ETS) หรือลูกโซ่การหายใจ (Respiratory Chain) เพื่อรวมตัวกับออกซิเจน ทำให้กระบวนการเผาผลาญสารอาหารเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ และให้ผลผลิตเป็นน้ำ แสดงดังสมการที่ (3)



สมการที่ (2) และ (3) นี้ได้ถูกนำมาใช้กับเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ประกอบด้วยห้องแอโนด และห้องแคโทด ที่กั้นกลางด้วยเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (proton exchange membrane) โดยปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดจากการออกซิโดซ์ของกลูโคสหรือสมการที่ (2) เกิดขึ้นในห้องแอโนดทำให้ขั้วแอโนดเป็นขั้วลบ และปฏิกิริยารีดักชันหรือสมการที่ (3) เกิดขึ้นในห้องแคโทดทำให้ขั้วแคโทดเป็นขั้วบวก โปรตอนที่เกิดขึ้นนี้จะแพร่ผ่านเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนจากห้องแอโนดไปห้องแคโทด ส่วนอิเล็กตรอนจะถูกตัวนำพาอิเล็กตรอน (Electron Mediator) เช่น เมธิลีนบลู (methylene blue) และ นิวทรอลเรด (neutral red) เป็นต้น ที่สามารถแพร่ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์เข้าไปในเซลล์และนำพาอิเล็กตรอนออกมาภายนอกเซลล์ได้ และหากอิเล็กตรอนเหล่านี้ถูกส่งให้ขั้วแอโนด อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ต่อไปยังโพลด์ภายนอกและขั้วแคโทด เพื่อรวมตัวกับโปรตอนและออกซิเจนในห้องแคโทด หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่กล่าวนี้แสดงได้ดังรูปที่ 1

จากหลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพพบว่ามีตัวแปรสำคัญหลายตัวแปรที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ ได้แก่ โครงสร้างของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ ชนิดและความเข้มข้นของจุลินทรีย์เชื้อเพลิง ตัวนำพาอิเล็กตรอนและตัวรับอิเล็กตรอน ชนิดและขนาดของอิเล็กโทรด และเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน ซึ่งนอกจากตัวแปรเหล่านี้แล้วก็ยังมีผลของอุณหภูมิ และค่า pH ของสารละลายในห้องแอโนดและห้องแคโทด ดังนั้นแนวทางหลักในการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพจะขึ้นอยู่กับตัวแปรต่างๆ เหล่านี้ [2-14]



รูปที่ 1 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ

โดยทั่วไปหากพิจารณาในทางไฟฟ้า เซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพสามารถแทนด้วยวงจรสมมูลของเทวินิน ที่ประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าอนุกรมกับอิมพีแดนซ์ โดยที่อิมพีแดนซ์จะสัมพันธ์กับตัวแปรต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของระบบ ระบบที่มีอิมพีแดนซ์ภายในต่ำที่สุดทำให้เซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพจ่ายกระแสไฟฟ้าได้สูงสุด กล่าวคือการถ่ายโอนอิเล็กตรอนภายในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพจะเป็นไปได้ดี ดังนั้นอิมพีแดนซ์ภายในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพจึงเป็นประเด็นที่น่าสนใจ

การวิเคราะห์อิมพีแดนซ์เป็นวิธีหนึ่งที่น่ามาใช้กับเซลล์เชื้อเพลิง [15,16] ทำให้หาค่าพหุคูณทางไฟฟ้าเคมีของอิเล็กโทรดที่เกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิง โดยแสดงด้วยองค์ประกอบทางไฟฟ้า คือ ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำ ดังนั้นบทความนี้ได้้นำการวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ที่ใช้กับเซลล์เชื้อเพลิงที่มีสภาวะการทำงานอยู่ในก๊าซมาใช้กับเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่มีสภาวะการทำงานอยู่ในของเหลว โดยจะพิจารณาผลของอิมพีแดนซ์ที่เกิดขึ้นเมื่อใช้อิเล็กโทรด 8 ชนิด คือ เงิน (Ag), สแตนเลส (St), อะลูมิเนียม (Al), นิกเกิล (Ni), ผ้าคาร์บอน (carbon fiber cloth : CF), กระดาษคาร์บอน (carbon paper : CP), ผ้าคาร์บอนเคลือบทอง (gold-coated carbon fiber cloth : CFG) และกระดาษคาร์บอนเคลือบทอง (gold-coated carbon paper : CPG)

ซึ่งอิเล็กโทรดเหล่านี้เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี สามารถใช้งานเป็นตัวนำได้ทั่วไปในสภาวะปกติ แต่เมื่อนำมาใช้ในสารละลายจะก่อให้เกิดผลของอิมพีแดนซ์ระหว่างรอยต่อของอิเล็กโทรดและสารละลาย ซึ่งหากอิมพีแดนซ์ที่เกิดขึ้นนี้มีค่าสูงจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการจ่ายกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพมีค่าต่ำ ดังนั้นอิเล็กโทรดที่เหมาะสม ต้องมีค่าอิมพีแดนซ์ระหว่างรอยต่อของอิเล็กโทรดและสารละลายต่ำๆ นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์อิมพีแดนซ์จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ โดยเลือกอิเล็กโทรดมาทดสอบเพียง 4 ชนิด ได้แก่ ผ้าคาร์บอน กระดาษคาร์บอน เงิน และสแตนเลส เพื่อพิสูจน์ว่า อิเล็กโทรดที่ทำให้อิมพีแดนซ์ของระบบสูง ส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพต่ำกว่าอิเล็กโทรดที่ทำให้อิมพีแดนซ์ของระบบต่ำ

## 2. วิธีการทดลอง

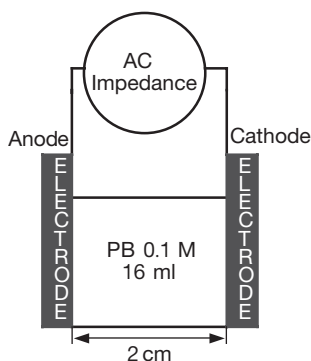
แบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ใช้ในการทดลองสร้างจากแผ่นอะคริลิก ประกอบด้วย 2 ห้อง คือห้องแอโนดและห้องแคโทด แต่ละห้องมีปริมาตร 8 ซม.<sup>3</sup> โดยอิเล็กโทรดที่นำมาทดสอบในการทดลองนี้สามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มดังนี้

1. โลหะ ได้แก่ เงิน, สแตนเลส, อะลูมิเนียม และนิกเกิล
2. คาร์บอน ได้แก่ ผ้าคาร์บอน และกระดาษคาร์บอน
3. วัสดุผสมระหว่างคาร์บอนและโลหะ ได้แก่ ผ้าคาร์บอนเคลือบทอง และกระดาษคาร์บอนเคลือบทอง

สำหรับผ้าคาร์บอนเคลือบทองและกระดาษคาร์บอนเคลือบทองเป็นอิเล็กโทรดที่พัฒนาขึ้นเอง โดยใช้เครื่องระเหยแบบความร้อน (evaporator) ระเหยทองให้ติดบนผ้าคาร์บอนและกระดาษคาร์บอน โดยมีความหนาประมาณ 280°A

อิเล็กโทรดที่ใช้ในการทดลองมีพื้นที่สัมผัสกับสารละลาย 9.6 ซม.<sup>2</sup> หนา < 0.1 มม. อิเล็กโทรดแต่ละชนิดจะทำความสะอาดด้วยแอลกอฮอล์ แล้วนำไปแช่ในน้ำ DI ก่อนนำไปใช้ในแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ

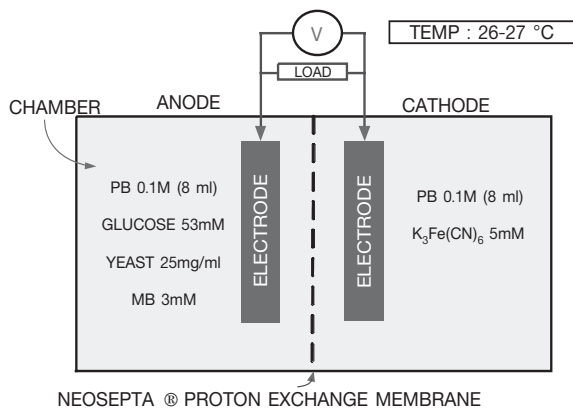
เนื่องจากต้องการศึกษาเฉพาะอิมพีแดนซ์ของอิเล็กโทรดในสารละลายเท่านั้น ในการทดสอบนี้จะไม่ใส่เมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน จูลินทรีย์ เชื้อเพลิง ตัวนำพาอิเล็กตรอน และตัวรับอิเล็กตรอน เพื่อตัดผลอิมพีแดนซ์ของตัวแปรเหล่านี้ ดังนั้นในระบบนี้เติมเฉพาะสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.1 M pH7 ปริมาตร 16 มล. ลงในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ และต่อเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพเข้ากับเครื่องวัดอิมพีแดนซ์กระแสสลับ (AC-Impedance measurement) แสดงได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ต่อกับเครื่องวัดอิมพีแดนซ์กระแสสลับ

เครื่องวัดอิมพีแดนซ์กระแสสลับที่ใช้ในการทดลองเป็นของ Solartron รุ่น SI 1260 ตั้งค่าความถี่ที่ใช้วัดในช่วง 0.05 Hz - 10 MHz โดยเปลี่ยนค่าความถี่จากมากไปน้อย สำหรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ป้อนในการทดลองไม่สามารถใช้แรงดันต่ำในช่วง 1-10 mV ได้ เนื่องจากเกิดสัญญาณรบกวนสูง ดังนั้นค่าแอมพลิจูดของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ป้อนให้กับระบบคือ 200 mV เพื่อให้ได้ค่าอิมพีแดนซ์ที่มีความเสถียรที่ความถี่สูง สำหรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงตั้งค่าที่ 0 V เพื่อไม่ให้เกิด electrolysis ภายในแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ

สำหรับการทดลองวัดแรงดันไฟฟ้าที่เซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพสามารถผลิตได้เมื่อใช้อิเล็กโทรดชนิดต่างๆ นั้น จะใช้ Neosepta® เมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน เพื่อกั้นระหว่างห้องแอโนดและห้องแคโทด ในห้องแอโนดใช้กลูโคสเป็นเชื้อเพลิงให้กับยีสต์ที่ใช้เป็นตัวสร้างพลังงาน ตัวนำพาอิเล็กตรอนใช้เมธิลีนบลู (methylene blue : MB) และใช้สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (PB) ความเข้มข้น 0.1 M (pH7) เป็นตัวทำละลายและรักษาค่าความเป็นกรด-เบสของระบบ ในห้องแคโทดใช้โพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรทรี ( $K_3Fe(CN)_6$ ) เป็นตัวรับอิเล็กตรอน และรักษาอุณหภูมิขณะทดลอง 26-27 °C องค์ประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงแสดงได้ดังรูปที่ 3



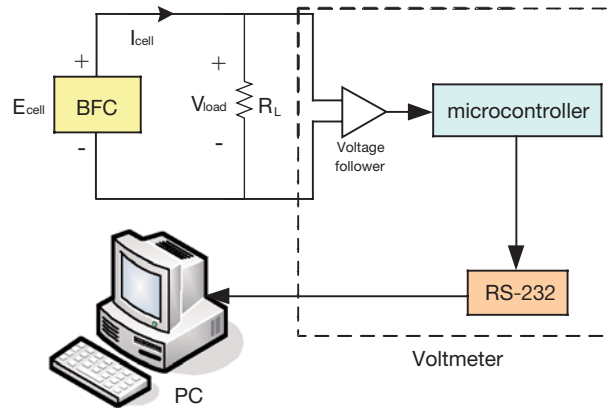
รูปที่ 3 องค์ประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ใช้ในการทดลอง

แรงดันไฟฟ้าที่เซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพผลิตได้ ( $V_{load}$ ) จะถูกวัดด้วยเครื่องวัดแรงดันไฟฟ้า (Voltmeter) ที่สามารถบันทึกข้อมูลลงในหน่วยความจำของเครื่องคอมพิวเตอร์ (PC) ทุกๆ 30 วินาที ขณะทดลองมีการต่อโหลด ( $R_L$ ) ค่าต่างๆ ในช่วง 100  $\Omega$  - 100 k $\Omega$  โดยต่อโหลดจากค่ามากไปค่าน้อย เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณกระแสไฟฟ้าที่เซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพผลิตได้ ( $I_{cell}$ ) โดยใช้กฎของโอห์มดังสมการที่ (4) และแสดงระบบการวัดแรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพได้ดังรูปที่ 4

$$V_{\text{load}} = I_{\text{cell}} \times R_L \quad (4)$$

กำลังไฟฟ้าที่เซลล์เชื้อเพลิงผลิตได้ ( $P_{\text{load}}$ ) คำนวณโดย

$$P_{\text{load}} = V_{\text{load}} \times I_{\text{cell}} \quad (5)$$



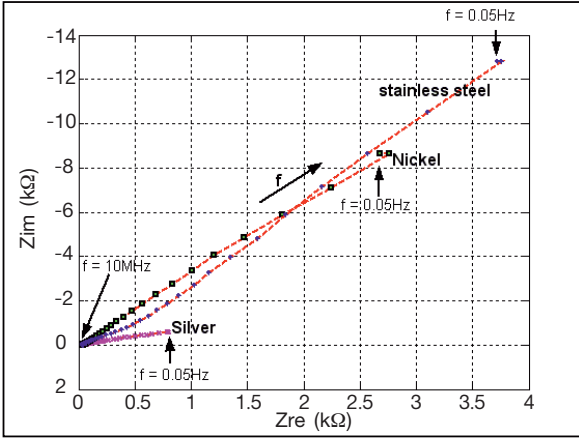
รูปที่ 4 ระบบวัดแรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ

### 3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

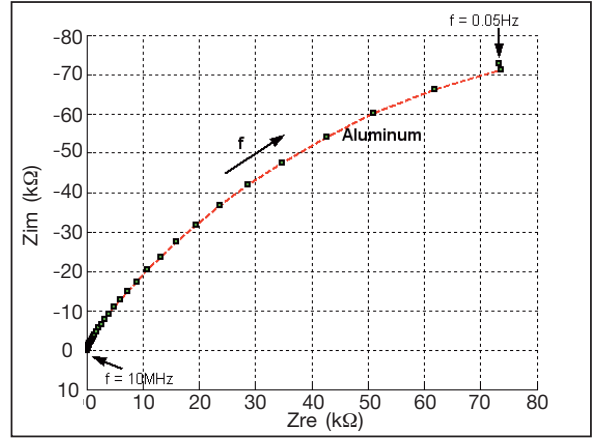
#### 3.1 อิมพีแดนซ์ของอิเล็กโทรดในสารละลายบัฟเฟอร์

รูปที่ 5 แสดงกราฟอิมพีแดนซ์ของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่วัดด้วยเครื่องวัดอิมพีแดนซ์กระแสสลับโดยที่แกน

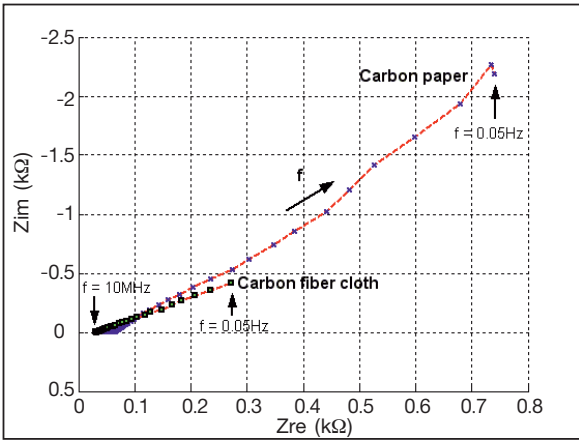
x แสดงส่วนจริงของอิมพีแดนซ์ ( $Z_{re}$ ) และแกน y แสดงส่วนจินตภาพของอิมพีแดนซ์ ( $Z_{im}$ ) มีหน่วยเป็นโอห์ม ( $\Omega$ )



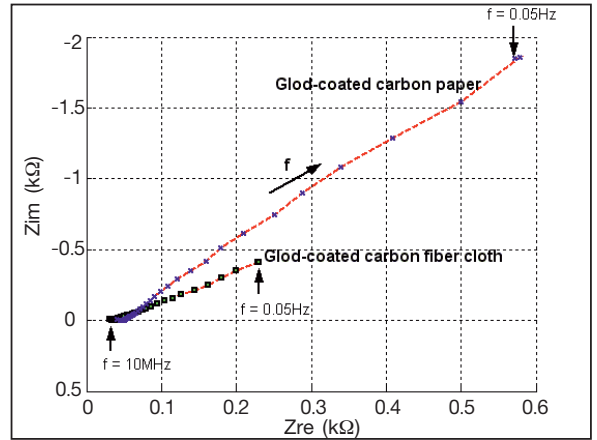
(ก)



(ข)



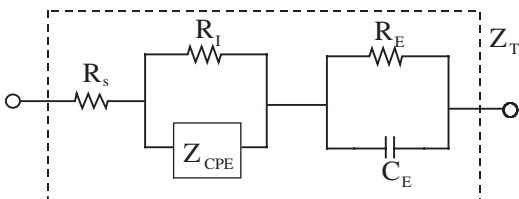
(ค)



(ง)

**รูปที่ 5** กราฟอิมพีแดนซ์ของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพเมื่อใช้ (ก) เงิน, นิกเกิล และสแตนเลส, (ข) อะลูมิเนียม, (ค) กระดาษคาร์บอน และผ้าคาร์บอน, และ (ง) กระดาษคาร์บอนเคลือบทอง และผ้าคาร์บอนเคลือบทองเป็นอิเล็กโทรด

จากรูปที่ 2 เขียนวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 6



**รูปที่ 6** วงจรสมมูลของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่มีเฉพาะสารละลายบัฟเฟอร์และอิเล็กโทรด [17]

โดยที่  $R_s$  : ความต้านทานไฟฟ้าของสารละลาย

$R_1$  : ความต้านทานไฟฟ้าระหว่างรอยต่อของอิเล็ก

โทรดกับสารละลาย

$Z_{CPE}$  (Constant-Phase Element) : อิมพีแดนซ์ระหว่างรอยต่อของอิเล็กโทรดกับสารละลาย [17]

$$\text{โดยที่ } Z_{CPE} = \frac{1}{A(j\omega)^\alpha}$$

เมื่อ  $A$  : ค่าความจุเทียม (pseudo capacitance)

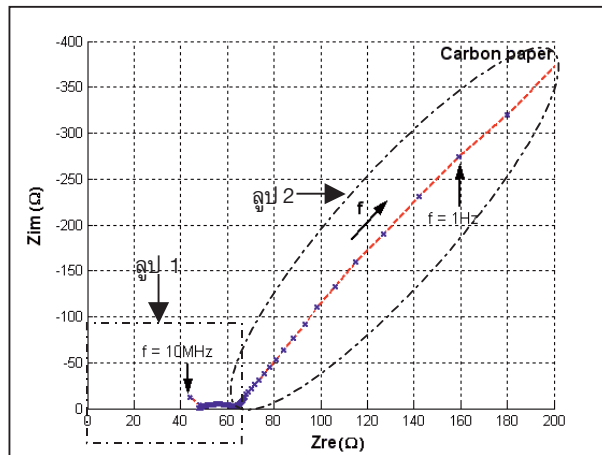
$\omega$  : ความถี่เชิงมุม (rad/s) และ  $\omega = 2\pi f$

f : ความถี่ (Hz)  
 α : ทิศทางของอิมพีแดนซ์ มีค่าอยู่ในช่วง 0-1  
 ถ้ามีค่าเครื่องหมายเป็นบวกแสดงว่ามีตัวเก็บประจุเป็นองค์ประกอบ  
 ถ้ามีค่าเครื่องหมายเป็นลบแสดงว่ามีตัวเหนี่ยวนำเป็นองค์ประกอบ  
 เมื่อ α=0 : Z<sub>CPE</sub> เป็นค่าความต้านทาน  
 α=1 : Z<sub>CPE</sub> เป็นค่าความจุหรือค่าความเหนี่ยวนำ  
 0<α<1 : Z<sub>CPE</sub> เป็นผลรวมของค่าความต้านทานและค่าความจุ หรือค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำ

R<sub>E</sub> : ความต้านทานไฟฟ้าของอิเล็กโทรด  
 C<sub>E</sub> : ค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กโทรด  
 เพราะฉะนั้น

$$Z_T(\omega) = R_S + \left( \frac{R_I}{1 + AR_I(j\omega)^\alpha} \right) + \left( \frac{R_E}{1 + j\omega C_E R_E} \right) \quad (6)$$

เมื่อ Z<sub>T</sub>: อิมพีแดนซ์รวม  
 จากผลการทดลองในรูปที่ 5 พบว่าอิมพีแดนซ์ของระบบโดยใช้อิเล็กโทรดชนิดต่างๆ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 รูป ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 กราฟอิมพีแดนซ์ของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพเมื่อใช้กระดาษคาร์บอนเป็นอิเล็กโทรด

จากรูปที่ 7 จะเห็นว่าเกิดรูปขึ้น 2 รูป โดยรูป 1 อยู่ในช่วงความถี่สูงของการวัด ส่วนรูป 2 เกิดขึ้นที่ความถี่ต่ำของการวัด และรูป 1 นั้นมีค่าอิมพีแดนซ์ (Zre และ Zim) ต่ำมากเมื่อเทียบกับรูป 2 ซึ่งหากทำการพิจารณาจากระบบในรูปที่ 2 พบว่าความต้านทานของสารละลายบัฟเฟอร์ (R<sub>S</sub>) นั้นมีค่าต่ำ เนื่องจากมีค่าความเข้มข้นไอออน (ionic strength) สูง (0.1M) และอิเล็กโทรดที่ใช้ในการทดลองทั้งหมดนี้มีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำเนื่องจากเป็นวัสดุตัวนำไฟฟ้า ดังนั้นผลของอิมพีแดนซ์ที่เกิดขึ้นในรูป 1 จึงเป็นผลของความต้านทานของสารละลาย และอิมพีแดนซ์ของอิเล็กโทรด และเนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดขึ้นในรูป 1 ต่ำกว่ารูป 2 มาก หรือกล่าวได้ว่าอิมพีแดนซ์ในช่วงความถี่ต่ำ (รูป 2) ส่ง

ผลต่อการจำกัดการถ่ายโอนอิเล็กตรอนสูงกว่าช่วงความถี่สูง (รูป 1) มาก ดังนั้นในการวิเคราะห์หาอิมพีแดนซ์ของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพจึงกำหนดให้

$$R_{SE} = R_S + (R_E/C_E)$$

ดังนั้นจะได้ว่า Z<sub>T</sub> = R<sub>SE</sub> + (R<sub>I</sub>//Z<sub>CPE</sub>) และ

$$Z_T = R_{SE} + \left( \frac{R_I}{1 + AR_I(j\omega)^\alpha} \right) \quad (7)$$

ค่าคงตัวในอิมพีแดนซ์ของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่วัดได้จากเครื่องวัดอิมพีแดนซ์กระแสสลับสามารถหาได้จากการพิตกราฟอิมพีแดนซ์ในรูปที่ 5 โดยใช้สมการที่ (7) ซึ่งค่าคงตัวต่างๆ ในอิมพีแดนซ์ที่ได้สรุปดังตารางที่ 1



จากตารางที่ 1 จะเห็นว่าค่า  $R_{SE}$  มีค่าอยู่ในช่วง 30-65  $\Omega$  โดยค่า  $R_{SE}$  ที่แตกต่างกันนี้เป็นผลจากความต้านทานของแต่ละอิเล็กโทรด ค่า  $R_{SE}$  นี้มีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบ

เทียบกับความต้านทานที่เกิดขึ้นระหว่างรอยต่อ ( $R_i$ ) ดังนั้น  $R_{SE}$  จึงไม่ได้เป็นตัวจำกัดการถ่ายโอนอิเล็กตรอนภายในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ

ตารางที่ 1 ค่าคงตัวในอิมพีแดนซ์ของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่อิเล็กโทรดชนิดต่างๆ

Electrode	$R_{SE}$ ( $\Omega$ )	$R_i$ ( $k\Omega$ )	$\alpha$	$A$ ( $s^{\alpha}/\Omega$ )	$SSE_{re}$ (%)	$SSE_{im}$ (%)
CFG	36.9	7.10	0.74	0.004961	2.10	0.28
CF	34.7	4.96	0.71	0.0044231	1.42	0.27
CPG	49.5	581.27	0.82	0.0013263	0.91	0.08
CP	65.2	177.17	0.80	0.0010173	8.13	0.90
Ag	30.6	2.61	0.56	0.0013661	2.86	5.41
Ni	33.8	3662.56	0.82	0.0002868	1.08	0.02
St	31.8	2452.87	0.82	0.0001947	3.17	0.11
Al	30.0	224.14	0.76	0.0000174	0.07	0.23

เมื่อ  $SSE_{re} = \sum (Z_{re(normalize)} - Z_{resim(normalize)})^2$

$SSE_{im} = \sum (Z_{im(normalize)} - Z_{imsim(normalize)})^2$

และ SSE คือ sum square error

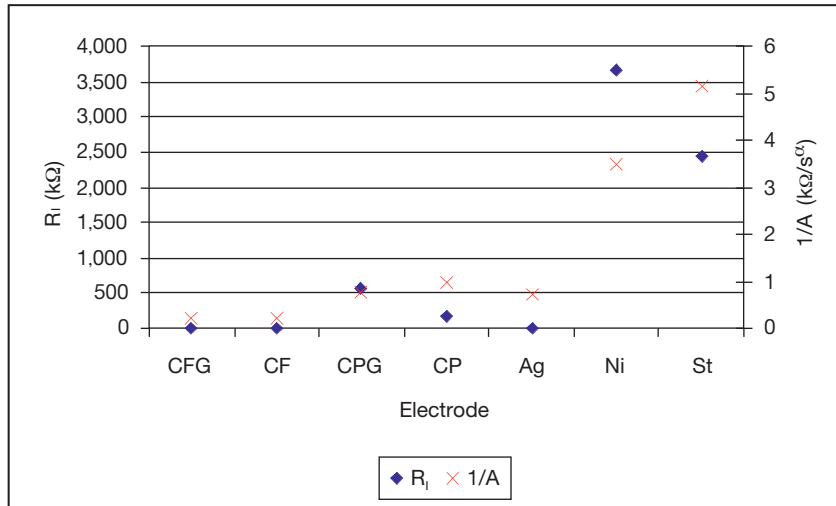
สำหรับอิมพีแดนซ์ที่เกิดขึ้นระหว่างรอยต่อของอิเล็กโทรดกับสารละลายที่แสดงโดยค่า  $R_i$  และ  $Z_{CPE}$  จะเห็นว่าค่าที่ได้มีค่าแตกต่างกันตามชนิดของอิเล็กโทรดที่ใช้ เมื่อพิจารณาค่า  $R_i$  พบว่าอิเล็กโทรดเงินมีค่า  $R_i$  ต่ำที่สุด คือ 2.61  $k\Omega$  รองลงมาคือผ้าคาร์บอนมีค่า  $R_i$  4.96  $k\Omega$  และเมื่อผ้าคาร์บอนถูกเคลือบด้วยทองหนึ่งด้านส่งผลให้ค่า  $R_i$  สูงขึ้นเป็น 7.10  $k\Omega$  ผลที่ได้นี้เป็นไปในทำนองเดียวกันกับกระดาษคาร์บอน เพราะกระดาษคาร์บอนที่ไม่เคลือบทองมีค่า  $R_i$  177.17  $k\Omega$  เมื่อเคลือบทองจะมีค่า  $R_i$  สูงขึ้นเป็น 581.27  $k\Omega$  ดังนั้นแสดงว่าผ้าและกระดาษคาร์บอนที่เคลือบทองนี้ส่งผลให้ค่า  $R_i$  สูงขึ้น ซึ่งเมื่อค่า  $R_i$  สูงขึ้น มีผลทำให้การถ่ายโอนอิเล็กตรอนผ่าน  $R_i$  ได้น้อยลง ส่วนอิเล็กโทรดอะลูมิเนียมมีค่า  $R_i$  224.14  $k\Omega$  ใกล้เคียงกับกระดาษคาร์บอน สำหรับอิเล็กโทรดนิเกิลและสแตนเลสมีค่า  $R_i$  สูงกว่า 1  $M\Omega$  ซึ่งแสดงให้เห็นชัดเจนว่าการถ่ายโอนอิเล็กตรอนผ่าน  $R_i$  ของอิเล็กโทรดนิเกิลและสแตนเลส นั้นเกิดขึ้นได้ค่อนข้างต่ำ อย่างไรก็ตามอิเล็กตรอน ยังคงสามารถไหลผ่าน  $Z_{CPE}$  ได้ เนื่องจากเป็นองค์ประกอบที่

ต่อขนานกันอยู่ ดังนั้นจำเป็นต้องพิจารณา  $Z_{CPE}$  เพื่อพิจารณาว่าอิเล็กตรอนสามารถถ่ายโอนผ่านทางนี้ได้หรือไม่

ค่า  $Z_{CPE}$  แสดงอยู่ในค่าของ  $\alpha$  และ  $A$  ซึ่งจากการทดลองพบว่า ค่า  $\alpha$  ที่คำนวณได้ของแต่ละอิเล็กโทรดมีค่าอยู่ในช่วง 0.71-0.82 ยกเว้นอิเล็กโทรดเงินซึ่งมีค่า  $\alpha = 0.56$  ที่มีเครื่องหมายเป็นบวกและ  $0 < \alpha < 1$  ดังนั้น  $Z_{CPE}$  ของระบบนี้มีตัวเก็บประจุและตัวต้านทานเป็นองค์ประกอบ ซึ่งในการพิจารณาความหมาย เราสามารถเปรียบ  $Z_{CPE}$  ได้กับตัวต้านทานที่อนุกรมอยู่กับตัวเก็บประจุ ดังนั้นการที่อิเล็กตรอนถ่ายโอนได้ดีที่สุดนั้น ค่าความต้านทานควรมีค่าต่ำๆ และค่าความจุควรมีค่าสูงๆ อันจะทำให้อิมพีแดนซ์ของส่วนนี้มีค่าต่ำ ส่งผลให้กระแสไหลผ่านได้สะดวก จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอิเล็กโทรดเงินมีสัดส่วนของค่าความต้านทานกับค่าความจุใกล้เคียงกัน ส่วนอิเล็กโทรดชนิดอื่นๆ มีสัดส่วนของค่าความจุมากกว่าค่าความต้านทาน แสดงให้เห็นว่าอิมพีแดนซ์ระหว่างรอยต่อของอิเล็กโทรดกับสารละลายของอิเล็กโทรดส่วนใหญ่มีค่ารีแอกแตนซ์สูงกว่าค่าความต้านทาน ทำให้ค่า  $\alpha$  เพียงตัวเดียวยังไม่สามารถบอกได้ว่าการถ่ายโอนอิเล็กตรอนระหว่างรอยต่อดีหรือไม่ ดังนั้นต้องพิจารณาอัตราขยายหรือค่า  $1/A$  โดยถ้าวค่า  $A$  สูง ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ต่ำ ซึ่งจากการทดลองสามารถแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนโดยนำค่า

$R_i$  และค่า  $1/A$  มาแสดงดังรูปที่ 8 ยกเว้นอิเล็กโทรดอะลูมิเนียม เนื่องจากค่า  $1/A$  ของอิเล็กโทรดอะลูมิเนียม

มีค่า  $57.43 \text{ k}\Omega/\text{s}^\alpha$  สูงกว่าค่า  $1/A$  ของอิเล็กโทรดชนิดอื่นๆ มาก

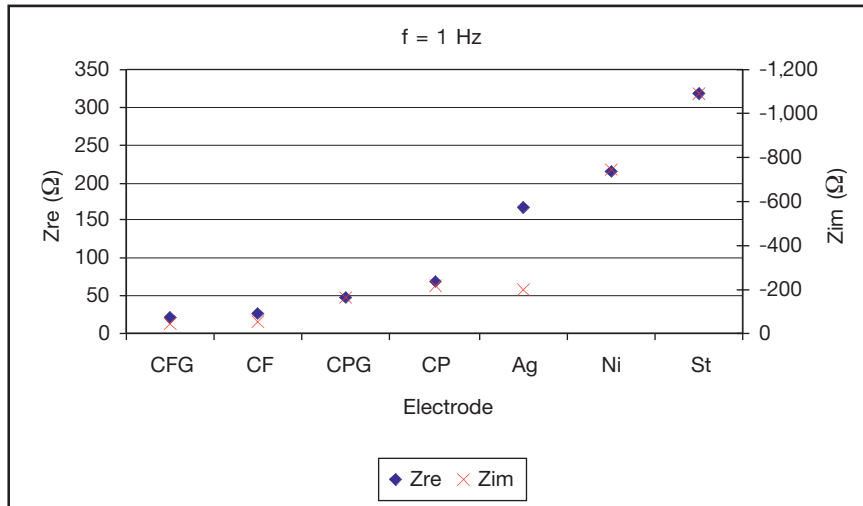


รูปที่ 8 กราฟ  $R_i$  และ  $1/A$  ของอิเล็กโทรดชนิดต่างๆ

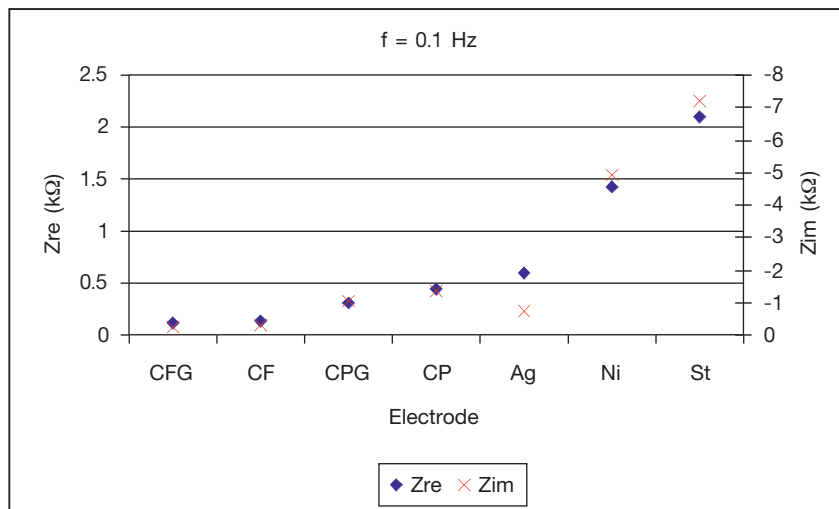
จากรูปที่ 8 แสดงให้เห็นว่าอิเล็กโทรดผ้าคาร์บอนเคลือบทอง ผ้าคาร์บอน และเงิน มีค่า  $R_i$  และ  $1/A$  ต่ำ หมายถึงการถ่ายโอนอิเล็กตรอนผ่านได้ดีทั้งทาง  $R_i$  และ  $Z_{CPE}$  สำหรับอิเล็กโทรดกระดาษคาร์บอน และกระดาษคาร์บอนเคลือบทองจะมีค่า  $R_i$  สูง แต่ค่า  $1/A$  ต่ำกว่า  $1 \text{ k}\Omega/\text{s}^\alpha$  ซึ่งทำให้อิเล็กตรอนสามารถถ่ายโอนผ่านทาง  $Z_{CPE}$  ได้ สำหรับอิเล็กโทรดนิกเกิล, สแตนเลส และอะลูมิเนียม มีค่า  $R_i$  และ  $1/A$  สูงมาก ทำให้การถ่ายโอนอิเล็กตรอนผ่านได้น้อยมาก ทำให้อิเล็กโทรดนิกเกิล สแตนเลส และอะลูมิเนียมไม่เหมาะสมกับการใช้เป็นอิเล็กโทรดในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ

เนื่องจาก  $Z_{CPE}$  เปลี่ยนแปลงตามความถี่ หากต้องการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ต้องทราบความถี่ที่แน่นอน แต่ใน

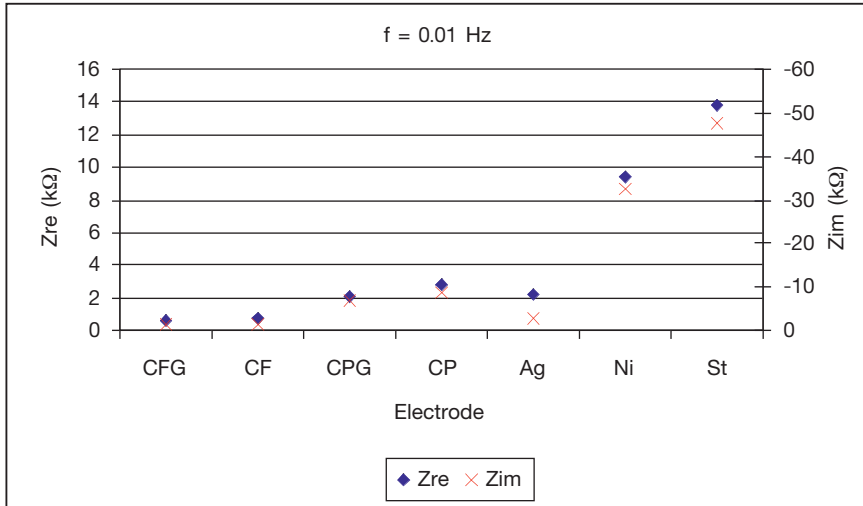
ทางปฏิบัติความถี่ของการจ่ายแรงดันไฟฟ้าภายในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพไม่สามารถใช้ออสซิลโลสโคปจับสัญญาณได้โดยตรง เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่เซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพจ่ายเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งโดยทั่วไปมีความถี่เข้าใกล้ศูนย์ แต่จากการสันนิษฐานว่าการถ่ายโอนอิเล็กตรอนระหว่างจูลินทรีย์และอิเล็กโทรดนั้นต้องมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาโดยจะขึ้นอยู่กับความสามารถของจูลินทรีย์และตัวนำพาอิเล็กตรอน ดังนั้นเพื่อหาเกณฑ์ในการเปรียบเทียบค่า  $Z_{CPE}$  จึงกำหนดค่าความถี่ที่ต่างๆ เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่า  $Z_{CPE}$  โดยผลการคำนวณหาค่า  $Z_{CPE}$  แสดงในรูปของ  $Z_{re}$  และ  $Z_{im}$  ที่ความถี่ 1, 0.1 และ 0.01 Hz แสดงได้ดังรูปที่ 9 - รูปที่ 11



**รูปที่ 9** อิมพีแดนซ์ของอิเล็กโทรดชนิดต่างๆ เมื่อกำหนดให้ ความถี่มีค่าเท่ากับ 1 Hz (สำหรับอิเล็กโทรดอะลูมิเนียมมีค่า  $Z_{re} = 5.23 \text{ k}\Omega$  และ  $Z_{im} = -13.21 \text{ k}\Omega$ )



**รูปที่ 10** อิมพีแดนซ์ของอิเล็กโทรดชนิดต่างๆ เมื่อกำหนดให้ ความถี่มีค่าเท่ากับ 0.1 Hz (สำหรับอิเล็กโทรดอะลูมิเนียมมีค่า  $Z_{re} = 30.10 \text{ k}\Omega$  และ  $Z_{im} = -76.01 \text{ k}\Omega$ )



**รูปที่ 11** อิมพีแดนซ์ของอิเล็กโทรดชนิดต่างๆ เมื่อกำหนดให้ ความถี่มีค่าเท่ากับ 0.01 Hz (สำหรับอิเล็กโทรดอะลูมิเนียมมีค่า  $Z_{re} = 173.18 \text{ k}\Omega$  และ  $Z_{im} = -437.40 \text{ k}\Omega$ )

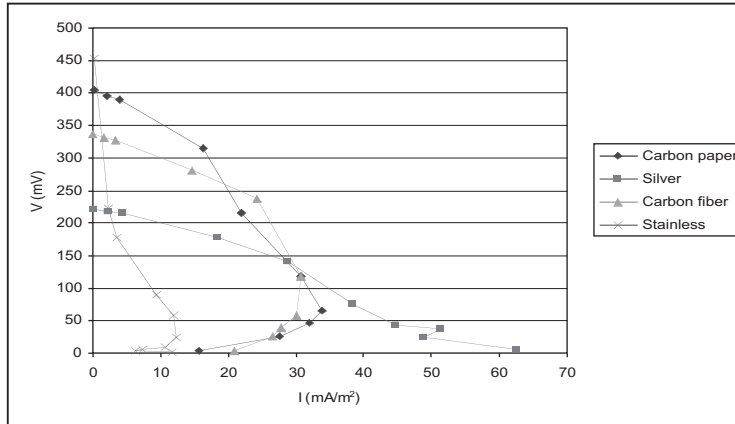
จากกราฟรูปที่ 9 - รูปที่ 11 แสดงให้เห็นชัดเจนว่า อิมพีแดนซ์ของอิเล็กโทรดนิเกิล, สแตนเลสและอะลูมิเนียม มีค่าสูงมากที่ความถี่ต่ำๆ เมื่อเทียบกับอิเล็กโทรดกลุ่ม คาร์บอน, วัสดุผสมระหว่างคาร์บอนและโลหะ และเงิน จากผลการวิเคราะห์นี้แสดงให้เห็นว่าในการพิจารณา อิมพีแดนซ์ของอิเล็กโทรดสามารถพิจารณาได้จากค่าคงตัว  $R_p$ ,  $\alpha$  และ  $1/A$  ของอิเล็กโทรด  $R_p$  ถ้ามีค่าต่ำ ทำให้การ ถ่ายโอนอิเล็กตรอนผ่าน  $R_p$  ได้ง่าย ถ้ามีค่าสูง ต้อง พิจารณาค่า  $\alpha$  และ  $1/A$  โดยที่ ค่า  $\alpha$  และค่า  $1/A$  ต้อง มีค่าไม่สูง เพื่อให้การถ่ายโอนอิเล็กตรอนผ่านทาง  $Z_{CPE}$  เป็น ไปได้ง่าย

### 3.2 การทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ

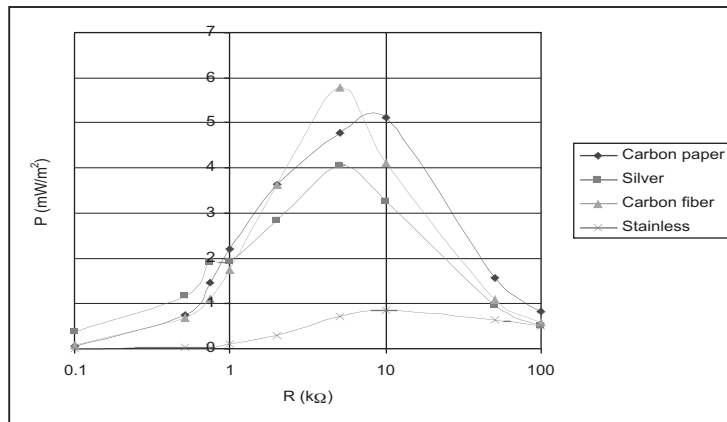
รูปที่ 12 และ รูปที่ 13 แสดงผลความหนาแน่น กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ และแสดงผลความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเทียบกับ โหลด ตามลำดับ เมื่อใช้ ฟ้าคาร์บอน, กระดาษคาร์บอน, เงิน และสแตนเลสเป็นอิเล็กโทรด โดยมีตัวแปรที่ใช้ในการทดลองดังนี้คือ

ห้องแอโนด : PB 0.1 M +yeast 25 mg/ml+glucose 53 mM+MB 3 mM

ห้องแคโทด : PB 0.1 M+  $K_3Fe(CN)_6$  5 mM



รูปที่ 12 กราฟความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ



รูปที่ 13 กราฟความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า-โหลดของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ

ตารางที่ 2 ค่าแรงดันไฟฟ้า, ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพสามารถผลิตได้

Electrode	$V_{max}$ (no load) (mV)	$V_{1k\Omega}$ (mV)	$I_{1k\Omega}$ (mA/m <sup>2</sup> )	$P_{1k\Omega}$ (mW/m <sup>2</sup> )
Stainless steel	454	10	10.6	0.1
Carbon paper	404	65	33.8	2.2
Carbon fiber	337	58	30.2	1.7
Silver	221	37	44.7	1.9

จากตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่าค่าแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพเมื่อใช้สแตนเลสเป็นอิเล็กโทรดจ่ายได้สูงสุด 454 mV ซึ่งมีค่าสูงกว่าอิเล็กโทรดอีก 3 ชนิดคือ อิเล็กโทรดกระดาษคาร์บอน, ผ้าคาร์บอนและเงิน ความแตกต่างที่เกิดขึ้นจากแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรนี้น่าจะเป็นผลที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาภายในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่เกิดขึ้นที่แต่ละขั้วของอิเล็กโทรด แต่จะเห็นว่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่อิเล็กโทรดสแตนเลสจ่ายได้สูงสุดคือ 10.6 mA/m<sup>2</sup> ที่โหลด 1 k $\Omega$  ซึ่งมีค่าต่ำกว่าอิเล็กโทรดกระดาษคาร์บอน, ผ้าคาร์บอนและเงิน 3-4 เท่า และอิเล็กโทรดแต่ละชนิดมีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 33.8 mA/m<sup>2</sup>, 30.2 mA/m<sup>2</sup> และ 44.7 mA/m<sup>2</sup> ที่โหลด 1 k $\Omega$  ตามลำดับ ซึ่งการจ่ายกระแสได้มากหรือน้อยนี้เป็นผลจากค่าอิมพีแดนซ์ของระบบ สำหรับสแตนเลสพบว่าค่าอิมพีแดนซ์มีค่าสูงดังนั้นการถ่ายโอนอิเล็กตรอนจึงเป็นไปได้ยาก ในขณะที่อิเล็กโทรดกระดาษคาร์บอน, ผ้าคาร์บอน และเงินสามารถถ่ายโอนอิเล็กตรอนได้ดีกว่าซึ่งอิเล็กโทรดเงินสามารถถ่ายโอนอิเล็กตรอนที่โหลดสูง(ค่าความต้านทานต่ำ)ได้ดีที่สุด การที่อิมพีแดนซ์ของสแตนเลสมีค่าสูงนั้นส่งผลให้ค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่ได้คือ 0.1 mW/m<sup>2</sup> ที่โหลด 1k $\Omega$  น้อยกว่าอิเล็กโทรดกระดาษคาร์บอน, ผ้าคาร์บอนและเงินที่มีค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า 2.2 mW/m<sup>2</sup>, 1.7 mW/m<sup>2</sup> และ 1.9 mW/m<sup>2</sup> ที่โหลด 1 k $\Omega$  ตามลำดับ หรือกล่าวได้ว่าค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าของอิเล็กโทรดกระดาษคาร์บอน, ผ้าคาร์บอนและเงินมีค่าสูงกว่าอิเล็กโทรดสแตนเลส 17-22 เท่า

#### 4. สรุปผลการทดลอง

จากการวัดอิมพีแดนซ์ของอิเล็กโทรดในสารละลายพบว่า กราฟอิมพีแดนซ์ประกอบด้วยสองรูป โดยรูปที่ 1 เกิดในช่วงความถี่สูง ที่ซึ่งเป็นผลของความต้านทานของสารละลายบัฟเฟอร์ และอิเล็กโทรด สำหรับรูปที่ 2 เกิดในช่วงความถี่ต่ำ ที่ซึ่งเป็นผลของอิมพีแดนซ์ระหว่างรอยต่อของอิเล็กโทรดและสารละลาย ( $Z_1$ ) ที่มีค่าสูงกว่ารูปที่ 1 มาก ดังนั้นอิมพีแดนซ์ของรูปที่ 2 เป็นตัวจำกัดการถ่ายโอนอิเล็กตรอนในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ การถ่ายโอนอิเล็กตรอนในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่มีประสิทธิภาพสูง ค่า  $Z_1$  ต้องมี

ค่าต่ำ ซึ่งก็คือค่า  $R_i$  และ/หรือ  $Z_{CPE}$  ต้องมีค่าต่ำ จากการทดลองพบว่าอิเล็กโทรดนิเกิล, สแตนเลสและอะลูมิเนียมมีค่าอิมพีแดนซ์ระหว่างรอยต่อของอิเล็กโทรดและสารละลายสูงมากอันจะส่งผลให้การถ่ายโอนอิเล็กตรอนผ่านระหว่างรอยต่อเป็นไปได้น้อย ทำให้กระแสไฟฟ้าที่เซลล์เชื้อเพลิงสร้างขึ้นไม่สามารถจ่ายออกมาได้อย่างเต็มที่แม้ว่าแรงดันขณะเปิดวงจรของสแตนเลสมีค่าสูงแต่ก็เป็นเพียงแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างรอยต่อของอิเล็กโทรดและสารละลาย (Junction potential) ที่ไม่สามารถนำมาใช้งานได้ ดังนั้นอิเล็กโทรดเหล่านี้ไม่เหมาะสำหรับนำมาใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับอิเล็กโทรดในกลุ่มคาร์บอน, วัสดุผสมระหว่างคาร์บอนและโลหะ และเงิน มีค่าอิมพีแดนซ์ระหว่างรอยต่อของอิเล็กโทรดและสารละลายไม่สูงมาก ทำให้การถ่ายโอนอิเล็กตรอนระหว่างรอยต่อเกิดขึ้นได้ง่าย และไม่เกิดการจำกัดกระแสระหว่างรอยต่อมาก อันส่งผลให้กระแสที่เซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพสามารถจ่ายได้มีค่าสูง ดังนั้นอิเล็กโทรดเหล่านี้เป็นอิเล็กโทรดที่เหมาะสมจะนำมาใช้งานในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ

จากการทดลองประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพพบว่าอิเล็กโทรดผ้าคาร์บอน, กระดาษคาร์บอน และเงิน ซึ่งเป็นอิเล็กโทรดที่มีอิมพีแดนซ์ระหว่างอิเล็กโทรดและสารละลายต่ำ จ่ายกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าสูงกว่าอิเล็กโทรดสแตนเลสซึ่งมีอิมพีแดนซ์ระหว่างอิเล็กโทรดและสารละลายสูง 3-4 และ 17-22 เท่า ตามลำดับ เมื่อต่อโหลด 1 kW ผลนี้แสดงให้เห็นว่าอิเล็กโทรดที่ส่งผลให้อิมพีแดนซ์ระหว่างอิเล็กโทรดและสารละลายมีค่าต่ำ ทำให้การถ่ายโอนอิเล็กตรอนภายในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพมีประสิทธิภาพสูงขึ้น

อย่างไรก็ตามในการพิจารณาอิเล็กโทรดมาใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ ยังมีปัจจัยที่ต้องพิจารณาอื่นๆ ที่ยังไม่ได้นำมาพิจารณาในบทความนี้ เช่น เสถียรภาพการทำงานของอิเล็กโทรดที่ต้องใช้งานเป็นเวลานานในของเหลวที่มีจุลินทรีย์ ที่ต้องสามารถรักษาสภาพความเป็นตัวนำที่ดีตลอดระยะเวลาที่ใช้งาน และต้องมีความทนทานไม่เกิดการสึกกร่อนได้ง่าย ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ควรนำมาพิจารณาเพิ่มเติม เพื่อให้ได้อิเล็กโทรดที่ดีและเหมาะสมที่สุดสำหรับนำมาใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ

## 5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ท่าน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และท่านสนับสนุนนิติตโครงการศิษย์กัณภูมิ โดยศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 6. เอกสารอ้างอิง

1. EG&G Services Parson, Inc., 2000, "Fuel Cell Handbook", *Science Application International Corporation Fifth Edition*, Morgantown, W. Va.: U.S. Dept of Energy

2. M.C. Potter, 1911, "Electrical effects accompanying the decomposition of organic compounds", *Proc. R. Soc. Lond. B* 84, pp. 260-276.

3. H.P. Benetto, 1990, "Electricity Generation by Microorganisms", *Biotechnology Education*, Vol. 1, No. 4, pp. 163-168.

4. S. Tanisho, N. Kamiya and N. Wakao., 1989, "Microbial fuel cell using *Enterobacter aerogenes*", *Journal of Electroanalytical Chemistry*, Vol. 275, Issue 1, pp. 25-32.

5. H.A. Viedla and A.J. Arvia, 1975, "The Response of a Bioelectrochemical Cell with *Saccharomyces cerevisiae* Metabolizing Glucose under Various Fermentation Conditions", *Biotechnol. Bioeng.*, Vol. 17, pp. 1529-1543.

6. H.J. Kim, H.S. Park, M.S. Hyun, I.S. Chang, M. Kim, B.H. Kim, 2002, "A mediator-less microbial fuel cell using a metal reducing bacterium, *Shewanella putrefaciens*", *Enzyme Microbial Technol.*, Vol. 30, No. 2, pp. 145-152.

7. D.R. Bond and D.R. Lovley, 2003, "Electricity production by *Geobacter sulfurreducens* attached to electrodes", *Appl. Environ. Microbiol.*, Vol. 69, No. 3, pp. 1548-1555.

8. D.R. Bond, D.E. Holmes, L.M. Tender and D.R. Lovley, 2002, "Electrode-Reducing

Microorganisms That Harvest Energy from Marine Sediments", *Science*, Vol. 295, pp. 483-485.

10. J. Niessen, U. Schröder and F. Scholz, 2004, "Exploiting Complex Carbohydrates for Microbial Electricity Generation - a Bacterial Fuel Cell Operating on Starch", *Electrochem. Commun.*, Vol. 6, No. 9, pp. 955-958.

11. S. Cheng, H. Liu and B.E. Logan, 2006, "Increased Performance of Single-Chamber Microbial Fuel Cells using an Improved Cathode Structure", *Electrochem. Comm.*, Vol. 8, No. 3, pp. 489-494.

12. D.H. Park, J.G. Zeikus, 2000, "Electricity Generation in Microbial Fuel Cells Using Neutral Red as an Electronophore", *Appl. Environ. Microbiol.*, Vol. 66, No. 4, pp. 1292-1297.

13. สารีณี อยู่ตระกูล และมานะ ศรียุทธศักดิ์, 2549, "ผลกระทบของตัวนำพาอิเล็กตรอนที่มีต่อเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ," *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 29*, PE30, หน้า 477-480.

14. S. Ouitrakul, M. Sriyudthsak and T. Kakizono, 2006, "Effect of Electron Acceptor in Bio-Fuel Cell", *Proceedings of the 1<sup>st</sup> IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*, January 18-21, Zhuhai, China, pp. 1432-1435.

15. M. Ciureanu, S.D. Mikhailenko, S. Kaliaguine, "PEM fuel cells as membrane reactors: kinetic analysis by impedance spectroscopy", *Catalysis Today*, Vol. 82, pp. 195-206.

16. D. Chakraborty, I. Chorkendorff and T. Johannessen, 2006, "Electrochemical impedance spectroscopy study of methanol oxidation on nanoparticulate PtRu direct methanol fuel cell anodes: Kinetics and performance evaluation", *Journal of Power Sources*, Vol. 162, pp. 1010-1022.

17. J. Ross Macdonald., 1987, *Impedance Spectroscopy Emphasizing Solid Materials and Systems*, Department of Physics and Astronomy University of North Carolina, Chapel Hill, North Carolina