

การวิเคราะห์การถ่ายโอนอิเล็กตรอนในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ

นางสาว สารีณี อู่ตระกูล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ANALYSIS OF ELECTRON TRANSFER IN BIO-FUEL CELL

Miss Sarinee Outrakul

A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Doctor of Philosophy Program in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic year 2007


Copyright of Chulalongkorn University

**501845**

Thesis Title ANALYSIS OF ELECTRON TRANSFER IN BIO-FUEL CELL  
By Miss Sarinee Outtrakul  
Field of Study Electrical Engineering  
Thesis Advisor Associate Professor Mana Sriyudthsak, D.Eng.

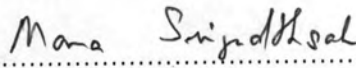
---

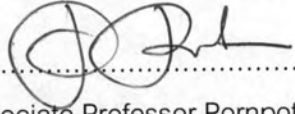
Accepted by the Faculty of Engineering, Chulalongkorn University in Partial Fulfillment of the Requirements for the Doctoral Degree

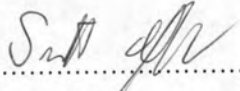
  
..... Dean of the Faculty of Engineering  
(Associate Professor Boonsom Lerdhirunwong, Dr. Ing.)

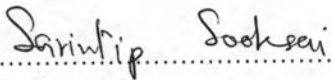
THESIS COMMITTEE

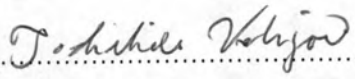
  
..... Chairman  
(Professor Somsak Panyakeow, Ph.D.)

  
..... Thesis Advisor  
(Associate Professor Mana Sriyudthsak, D.Eng.)

  
..... Member  
(Associate Professor Pornpote Piumsomboon, Ph.D.)

  
..... Member  
(Sumittra Charojrochkul, Ph.D.)

  
..... Member  
(Sarintip Sooksai, Ph.D.)

  
..... Member  
(Associate Professor Toshihide Kakizono, Ph.D.)

สารนิพนธ์ อยู่ตระกูล : การวิเคราะห์การถ่ายโอนอิเล็กตรอนในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ.

(ANALYSIS OF ELECTRON TRANSFER IN BIO-FUEL CELL)

อ. ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.มานะ ศรียุทธศักดิ์, 101 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาการวิเคราะห์การถ่ายโอนอิเล็กตรอนในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ โดยศึกษาผลของพารามิเตอร์ทางกายภาพ ได้แก่ ชนิดอิเล็กโทรด (เส้นใยคาร์บอน, เงิน, นิกเกิล, สแตนเลส และอลูมิเนียม), พื้นที่อิเล็กโทรด และระยะระหว่างอิเล็กโทรด (แอโนดและแคโทด) รวมถึงศึกษาผลของปริมาตรห้องทดลองเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ และผลขององค์ประกอบทางชีวภาพและเคมี ได้แก่ ผลของความเข้มข้นยีสต์, กลูโคส, เมธิลีนบลู และเฟอร์ริไซยาไนด์, ผลของชนิดตัวนำพาอิเล็กตรอน (เมธิลีนบลู, นิวทอรอลเรด และโรดามินบี) และผลของชนิดตัวรับอิเล็กตรอน (ออกซิเจนและเฟอร์ริไซยาไนด์) การทดลองจะทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางไฟฟ้า ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า, กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า จากนั้นวิเคราะห์การถ่ายโอนอิเล็กตรอนภายในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพโดยพิจารณาจากค่าความต้านทานเรวินินที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดัน หรือกำลังไฟฟ้ากับโหลด หรือจากวงจรสมมูลทางไฟฟ้าที่ได้จากการวัดค่าเอซีอิมพีแดนซ์

อิมพีแดนซ์ในระบบเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพประกอบด้วยอิมพีแดนซ์ของอิเล็กโทรด, สารละลาย, รอยต่อของอิเล็กโทรดและสารละลาย และเมมเบรนเลือกผ่านโปรตอน พบว่าอิมพีแดนซ์ของรอยต่อนี้เป็นตัวสำคัญที่จำกัดการถ่ายโอนอิเล็กตรอนในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ และพบว่าเส้นใยคาร์บอนเป็นวัสดุที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้เป็นอิเล็กโทรดสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพเนื่องจากไม่เป็นพิษ, มีเสถียรภาพทั้งด้านกายภาพและเคมี, ราคาถูก และที่สำคัญมีอิมพีแดนซ์ของรอยต่ออิเล็กโทรดและสารละลายต่ำที่ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ การเพิ่มพื้นที่อิเล็กโทรดมีผลทำให้อิมพีแดนซ์ของอิเล็กโทรด, สารละลายและระหว่างรอยต่อของอิเล็กโทรดและสารละลายมีค่าลดลง อันส่งผลให้กระแสและกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นในขณะที่ความหนาแน่นกระแสลดลง สำหรับการเพิ่มปริมาตรห้องทดลองพบว่าจำนวนประจุรวมที่เซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพจ่ายได้มีค่าเพิ่มขึ้น ผลการทดลองการเปลี่ยนความเข้มข้นพบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของยีสต์, กลูโคส และเฟอร์ริไซยาไนด์ ทำให้ความต้านทานเรวินินมีค่าลดลง แรงดันไฟฟ้าขณะไม่ต่อโหลดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นยีสต์หรือเฟอร์ริไซยาไนด์ ในขณะที่การเพิ่มความเข้มข้นขององค์ประกอบใดองค์ประกอบหนึ่งเหล่านี้จะทำให้กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น สำหรับการเปรียบเทียบตัวนำพาอิเล็กตรอนและตัวรับอิเล็กตรอนพบว่าเมธิลีนบลูและเฟอร์ริไซยาไนด์ร่วมกับออกซิเจนเป็นตัวนำพาอิเล็กตรอนและตัวรับอิเล็กตรอนที่ดีที่สุดตามลำดับ เซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ให้ประสิทธิภาพดีที่สุดสามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้า, ความหนาแน่นกระแส และความหนาแน่นกำลังได้สูงสุด 0.45 โวลต์, 83 มิลลิแอมป์ต่อตารางเมตร, 9 มิลลิวัตต์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ และมีความต้านทานภายใน 797 โอห์ม เมื่อใช้เส้นใยคาร์บอนขนาด 5x5 ตารางเซนติเมตร, นิโอเซพตาขนาด 5x5 ตารางเซนติเมตร, ยีสต์ 21 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร, กลูโคส 53 มิลลิโมล, เมธิลีนบลู 3 มิลลิโมล และเฟอร์ริไซยาไนด์ 0.5 มิลลิโมล ร่วมกับออกซิเจน 500 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นอิเล็กโทรด, เมมเบรนเลือกผ่านโปรตอน, จูลินทรีย์, เชื้อเพลิง, ตัวนำพาอิเล็กตรอน และตัวรับอิเล็กตรอนตามลำดับ

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า..... ลายมือชื่อนิสิต..... *สว. อยู่ตระกูล*  
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... *ดร. มานะ ศรียุทธศักดิ์*  
 ปีการศึกษา 2550..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

# # 4771830021 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: BIO-FUEL CELL / IMPEDANCE ANALYSIS / ELECTRODE / ELECTRON MEDIATOR / ELECTRON ACCEPTOR

SARINEE OUITRAKUL : ANALYSIS OF ELECTRON TRANSFER IN BIO-FUEL CELL.

THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. MANA SRIYUDTHSAK, D.ENG., 101 pp.

This dissertation presents the analysis of electron transfer in the bio-fuel cell (BFC). Physical parameters, i.e., electrode materials (i.e. carbon fiber, silver, nickel, stainless steel and aluminum), electrode surface area, distance between electrodes and compartment volume, were investigated. The effect of biological and chemical components comprised of yeast, glucose, electron mediator types (i.e. methylene blue, neutral red and rhodamine B) and electron acceptor (i.e. oxygen and ferricyanide) were also studied. The BFC performances (i.e. voltage, current and power) were explored by varying the above parameters. In addition, the analysis of electron transfer was studied by using ac-impedance analysis or Thevenin resistance ( $R_{th}$ ).

Total impedance of the BFC system consists of impedance of electrode, solution, electrode-solution interfacial and proton exchange membrane (PEM) impedances. The interfacial impedance plays a vital role in limiting of electron transfer. The best electron transfer occurs at the lowest interfacial impedance. It was found that carbon fiber is a suitable material for using as the BFC electrode because it is non-toxic, physically and chemically stable, inexpensive and having low interfacial impedance, which is very important characteristic. The increasing of electrode surface area decreases the electrode, solution and electrode-solution interfacial impedances, leading to the increasing of the current and power generation. It was found that the total charge from the BFC increases as the volume of the BFC is increased. The results of biological and chemical concentrations showed that the increasing of yeast, glucose and ferricyanide concentrations lead to the decreasing of the  $R_{th}$ . The open circuit voltage increases as yeast or ferricyanide is increased while the current generation could be increased by adding the higher concentration of yeast, glucose, methylene blue or ferricyanide. In comparison of electron mediator and acceptor types, it was found that methylene blue and combination of oxygen and ferricyanide were the best electron mediator and acceptor for the BFC, respectively. The best performance of 0.45V open circuit voltage, 83 mA/m<sup>2</sup> current density, 9 mW/m<sup>2</sup> power density and 797  $\Omega$  internal resistance were obtained by using carbon fiber (size: 5x5cm<sup>2</sup>), Neosepta<sup>®</sup> (size: 5x5cm<sup>2</sup>), yeast (21mg/ml), glucose (53mM), methylene blue (3mM) and combination between ferricyanide (0.5mM) and oxygen (500ml/min) as electrode, PEM, microorganism, fuel source, electron mediator and electron acceptor, respectively.

Department... Electrical Engineering..... Student's signature... Sarinee Ouitrakul...  
Field of study... Electrical Engineering..... Advisor's signature... Mana Sriyudthsak...  
Academic year ...2007..... Co-advisor's signature.....



## Acknowledgments

The author would like to express her gratitude to Assoc. Prof. Dr. Mana Sriyudthsak for his guidance and valuable discussions during the whole course. He is gratefully acknowledged. Without his professional guidance and continuous encouragement throughout the course of this study, this work can hardly complete.

The author would like to extend her gratitude to Prof. Dr. Somsak Panyakeow, Assoc. Prof. Dr. Pompote Piumsomboon, Dr. Sumittra Charojrochkul, Dr. Sarintip Sooksai and Assoc. Prof. Dr. Toshihide Kakizono for being my dissertation examination committees.

The author would like to acknowledge Chulalongkorn University, Thailand; the Bioelectronic Research Laboratory and SOFC laboratory (MTEC) for providing the author the great facilities throughout my Ph.D. program. The author also would like to thank to Miss Panadda Phangam, Miss Tichakorn Srarush, Mr. Chalernporn Wanpukdee and other members in Bioelectronic Research Laboratory and members in SOFC laboratory (MTEC) for their contributions to the experiments and other forms of assistances. Moreover, the author also would like to thanks The 90th Anniversary of the Chulalongkorn University fund (Ratchadaphiseksomphot Endowment Fund) and the Center of Excellence in Power Technology (Chulalongkorn University) fund for their supporting.

Finally, the important persons are my parents, brother and sister. The author's sincere thanks are due to these persons for their support, encouragement, and love. This work could not have been possible if it was not for them.

## Contents

	page
Abstract (Thai) .....	iv
Abstract (English) .....	v
Acknowledgments .....	vi
Contents .....	vii
List of Tables .....	xi
List of Figures .....	xiii
List of Symbols and Acronyms .....	xix
Chapter	
1 Introduction .....	1
1.1 Fuel Cell .....	1
1.2 Bio-Fuel Cell .....	4
1.3 Purpose and Outline of the Study .....	9
2 Basic Background and Related Topic .....	11
2.1 Biological Mechanism .....	11
2.2 Equivalent Circuit of the Bio-Fuel Cell .....	12
2.3 Ac-Impedance Spectroscopy .....	15
3 Materials and Methods .....	26

Chapter	viii page
3.1 Configuration of Bio-Fuel Cell .....	26
3.2 Components in the Bio-Fuel Cell .....	27
3.3 Electrical Measurements .....	28
3.3.1 Bio-Fuel Cell Performance .....	28
3.3.2 Electrical Impedance .....	29
4 Impedance Analysis of Bio-Fuel Cell Electrode Materials .....	30
4.1 Bio-Fuel Cell Experiments .....	31
4.1.1 Bio-Fuel Cell Performances .....	31
4.1.2 Impedance Studies .....	31
4.2 Results and Discussions .....	33
4.2.1 Voltage Generation from the Bio-Fuel Cell Electrode Materials .....	33
4.2.2 Impedance analysis of the Bio-Fuel Cell Electrode Materials .....	36
4.3 Summary .....	44
5 Study of Physical Parameters on the Bio-Fuel Cell Performances .....	45
5.1 Bio-Fuel Cell Experiments .....	45
5.1.1 Bio-Fuel Cell Performances .....	45
5.1.2 Impedance Studies .....	46



Chapter	ix page
5.2 Results and Discussions .....	46
5.2.1 Effect of Electrode Surface Area .....	46
5.2.1.1 Electricity Generation of the Bio-Fuel Cell .....	46
5.2.1.2 Impedance Analysis of the Bio-Fuel Cell due to Electrode Surface Area .....	49
5.2.2 Effect of Distances between Electrodes .....	52
5.2.2.1 Electricity Generation of the Bio-Fuel Cell .....	52
5.2.2.2 Impedance Analysis of the Bio-Fuel Cell due to Distances between Electrodes .....	54
5.2.3 Effect of Compartment Volume .....	56
5.3 Summary .....	60
6 Study of Biological and Chemical Components in the BFC .....	61
6.1 Bio-Fuel Cell Experiments .....	61
6.2 Results and Discussions .....	62
6.2.1 Effect of Biological and Chemical Concentration in the Bio-Fuel Cell .....	62
6.2.1.1 Glucose Concentration .....	62
6.2.1.2 Yeast Concentration .....	64

Chapter	x page
6.2.1.3 Methylene Blue Concentration .....	67
6.2.1.4 Ferricyanide Concentration .....	69
6.2.2 Effect of Electron Mediator Types .....	72
6.2.3 Effect of Electron Acceptor Types .....	76
6.3 Summary .....	78
7 Conclusions .....	80
7.1 Impedance Analysis .....	80
7.2 Physical Parameters .....	80
7.3 Chemical Parameters .....	84
7.4 Biological Parameters .....	87
7.5 Summary.....	88
7.6 Suggestions .....	89
References .....	90
Appendices .....	95
A Study the used Component in the Bio-Fuel Cell .....	96
B Publications and Presentations .....	100
Vitae .....	101

## List of Tables

Table		page
1.1	Summary of various types of fuel cells .....	3
1.2	The performances of different types of two compartment bio-fuel cells ...	7
1.3	The performances of different types of single compartment bio-fuel cells .....	8
2.1	The impedance of electrical element .....	18
4.1	Voltage, current density and power density of the bio-fuel cell .....	35
4.2	Parameters estimated from a fitting process for the equivalent circuit of Fig. 4.6 .....	38
4.3	Resistance ( $Z_{re}$ ), reactance ( $Z_{im}$ ) and magnitude ( $ Z_{CPE} $ ) of the $Z_{CPE}$ for all electrodes when the frequency was set at 1 Hz .....	41
4.4	Total resistance ( $f \rightarrow 0$ ) when using different electrode materials .....	43
5.1	Parameters estimated from fitting process for the equivalent circuit of Fig. 5.6 .....	50
5.2	Comparison of $R_m$ and $Z_T$ of the electrode with different electrode surface areas .....	52
5.3	Parameters evaluated from fitting process for the equivalent circuit of Fig. 5.11 .....	55

5.4	Comparison of $R_{th}$ and $Z_T$ of the electrode with different distances between electrodes .....	56
5.5	Charge of the BFC with different compartment volumes .....	59
6.1	Chemical structure of electron mediators .....	74

## List of Figures

Figure		page
1.1	Schematic of an individual fuel cell .....	2
1.2	Schematic of a bio-fuel cell .....	5
2.1	Equivalent circuit of the BFC connecting with the load resistance .....	12
2.2	Ideal and actual BFC voltage vs. current density characteristics .....	15
2.3	Geometrical representation of impedance .....	17
2.4	Parallel resistor-capacitor circuit .....	18
2.5	Complex plane impedance plot for equivalent circuit in Fig. 2.4 .....	18
2.6	Simulation of equivalent circuit in Fig. 2.4 when $R = 10\text{k}\Omega$ , $C = 0.01 \mu\text{F}$ and $f = 0.05\text{Hz}-10\text{MHz}$ .....	19
2.7	Randles Cell and its Cole-Cole plot (a) Randles Cell; (b) Cole-Cole plot of Randles Cell .....	20
2.8	Simulation of equivalent circuit in Fig. 2.8 (a) when $R_1 = 1\text{k}\Omega$ , $R = 10\text{k}\Omega$ , $C = 0.01 \mu\text{F}$ and $f = 0.05\text{Hz}-10\text{MHz}$ .....	21
2.9	Series connection of RC equivalent circuit and its Cole-Cole plot  (a) Series connection of RC equivalent circuit; (b) Cole-Cole plot  of series connection of RC equivalent circuit .....	22



2.10 Simulation of equivalent circuit in Fig. 2.11 (a) when	
(a) $R = 10\text{k}\Omega$ , $C = 0.01\ \mu\text{F}$ and $R_2 = 1\text{k}\Omega$ , $C_2 = 0.001\ \mu\text{F}$ ;	
(b) $R = 10\text{k}\Omega$ , $C = 0.01\ \mu\text{F}$ and $R_2 = 1\text{k}\Omega$ , $C_2 = 10\ \mu\text{F}$ ;	
(c) $R = 10\text{k}\Omega$ , $C = 0.01\ \mu\text{F}$ and $R_2 = 10\text{k}\Omega$ , $C_2 = 10\ \mu\text{F}$ ;	
(d) $R = 10\text{k}\Omega$ , $C = 0.01\ \mu\text{F}$ and $R_2 = 10\text{k}\Omega$ , $C_2 = 0.01\ \mu\text{F}$ .....	23
2.11 Simple equivalent circuit of $Z_{\text{CPE}}$ model .....	24
2.12 Simulation of $Z_{\text{CPE}}$ model when $R_1 = 1\text{k}\Omega$ and $f = 0.05\text{Hz}-10\text{MHz}$	
(a) $A=0.0001\ \text{s}^{\alpha}/\Omega$ and $\alpha = 0.4-1$ ; (b) $A = 0.01\ \text{s}^{\alpha}/\Omega$ and $\alpha = 1$ ;	
(c) $A = 0.001\ \text{s}^{\alpha}/\Omega$ and $\alpha = 1$ ; (d) $A = 0.0001\ \text{s}^{\alpha}/\Omega$ and $\alpha = 1$ .....	25
3.1 Configuration of the BFC .....	26
3.2 Assigned code for the BFC compartment .....	27
3.3 Schematic of the BFC in the experiments .....	28
3.4 Schematic of the BFC connecting to the measuring system .....	29
3.5 Ac-impedance analyzer .....	29
4.1 An ac-impedance measurement .....	32
4.2 The estimation of total BFC impedance when the system consists of electrodes and PB .....	32
4.3 Voltage generation from BFC when using carbon fiber as an electrode ..	33

Figure	page
4.4 Voltage vs. current density of the BFC when using different electrodes .....	34
4.5 Power density vs. load of the BFC when using different electrodes .....	35
4.6 Cole-Cole plots using (a) silver, nickel, and stainless steel electrodes; (b) aluminum electrode; (c) carbon fiber electrode; (d) the enlarged Fig. 4.6 (c) in the high frequency region .....	37
4.7 A comparison of $R_i$ and $1/A$ for various electrodes .....	40
5.1 Voltage-current characteristics of the BFC with different electrode surface areas .....	46
5.2 Voltage-current density characteristics of the BFC with different electrode surface areas .....	47
5.3 Current and current density vs. the different electrode surface areas at $2k\Omega$ load .....	48
5.4 Power-load characteristics of the BFC with different electrode surface areas .....	48
5.5 Power density-load characteristics of the BFC with different electrode surface areas .....	49
5.6 Cole-Cole plots of the BFC with different electrode surface areas .....	50

Figure	page
5.7 Total impedance vs. the different electrode surface areas .....	52
5.8 Voltage vs. current density of the BFC with different distance between electrodes .....	53
5.9 Power density vs. load of the BFC with different distances between electrodes .....	54
5.10 Voltage generation vs. distance between electrodes of the BFC .....	54
5.11 Cole-Cole plots of the BFC with different distances between electrodes .	55
5.12 The relationship between the total impedance and the different distances between electrodes .....	56
5.13 Voltage-current density characteristics of the BFC with different compartment volumes .....	57
5.14 Power density-load characteristics of the BFC with different compartment volumes .....	58
5.15 The relationship between the total charge and volume of the BFC .....	58
6.1 Voltage vs. current density of the BFC with different glucose concentrations .....	62
6.2 Voltage generation of the BFC with different glucose concentrations .....	63
6.3 Power density-load characteristics of the BFC with different glucose concentrations .....	63
6.4 Thevenin resistance of the BFC with different glucose concentrations .....	64

Figure	page
6.5 Voltage-current density of the BFC with different yeast concentrations ....	65
6.6 Voltage generation of the BFC with different yeast concentrations .....	65
6.7 Power density-load characteristics of the BFC with different yeast concentrations .....	66
6.8 Thevenin resistance of the BFC with different yeast concentrations .....	67
6.9 Voltage-current density of the BFC with different methylene blue concentrations .....	67
6.10 Voltage generation of the BFC from different methylene blue concentrations .....	68
6.11 Power density vs. load of the BFC with different methylene blue concentrations .....	68
6.12 Thevenin resistance with different methylene blue concentrations .....	69
6.13 Voltage-current density characteristics of the BFC with different ferricyanide concentrations .....	69
6.14 Relation between the voltage generation and the ferricyanide concentration .....	70
6.15 Power density-load characteristics of the BFC with different ferricyanide concentrations .....	71
6.16 Thevenin resistance of the BFC with different ferricyanide concentrations	72
6.17 Voltage – current density characteristics of the BFC with different electron mediators .....	73
6.18 Power density – load characteristics of the BFC with different electron mediators .....	73
6.19 Thevenin resistance of the BFC with different electron mediators .....	74
6.20 Open circuit voltage and current density at $1k\Omega$ load of the BFC vs. reduction potential of each electron mediator .....	75

Figure	page
6.21 Voltage – current density characteristics of the BFC with different electron acceptors .....	76
6.22 Power density – load of the BFC with different electron acceptors .....	77
6.23 Thevenin resistance of the BFC with different electron acceptors .....	78
7.1 Voltage vs. current density of the BFC when using different electrodes ..	81
7.2 Power-load characteristics of the BFC with different electrode surface areas .....	82
7.3 Power density-load characteristics of the BFC with different electrode surface areas .....	82
7.4 Voltage vs. current density of the BFC with different distances between electrodes .....	83
7.5 Relationship between the total charge and volume at fixed component concentrations .....	84
7.6 Voltage vs. current density of the BFC with different glucose Concentrations .....	85
7.7 Open circuit voltage and current density at 1 k $\Omega$ load of the BFC vs. reduction potential of each electron mediator .....	85
7.8 Voltage-current density of the BFC with different methylene blue concentrations .....	86
7.9 Voltage-current characteristics of the BFC with different ferricyanide concentrations .....	87
7.10 Voltage-current characteristics of the BFC with different electron acceptors .....	87
7.11 Voltage-current density of the BFC with different yeast concentrations ...	88



## List of Symbols and Acronyms

### Acronyms

AFC	Alkaline fuel cell
Ag	Silver
Al	Aluminum
ATP	adenosine triphosphate
BFC	Bio-fuel cell
CF	Carbon fiber
DMFC	Direct methanol fuel cell
H <sub>2</sub>	Hydrogen molecule
MCFC	Molten carbonate fuel cell
MB	Methylene blue
NADH	Nicotinamide adenine dinucleotide
Ni	Nickel
NR	Neutral red
oc	Open circuit
PAFC	Phosphoric acid fuel cell
PEMFC	Polymer electrolyte fuel cell
PEM	Proton exchange membrane
PB	Phosphate buffer

RFC	Regenerative fuel cell
RhB	Rhodamine B
sc	Short circuit
SOFC	Solid oxide fuel cell
St	Stainless steel
ZAFC	Zinc air fuel cell

#### Fundamental constants

$\epsilon_0$ Permittivity in free space	$8.854 \times 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$
F Faraday's constant	96845 C/mol
R Molar gas constant	$8.31441 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$

#### Symbols

$\alpha$	Direction of impedance
$\omega$	Angular frequency [rad/sec]
$\theta$	Phase angle of voltage source [rad]
$\theta_z$	Impedance angle [rad]
$\phi$	Phase angle of current [rad]
$\epsilon_r$	Relative electrical permittivity [F/m]
$\rho$	Resistivity [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ]
A	Pseudo capacitance [ $\text{s}^\alpha/\Omega$ ]
A	Surface of one electrode [ $\text{cm}^2$ ]

C	Capacitance [F]
$C_E$	Electrode capacitance [F]
$C_S$	Solution capacitance [F]
$C_I$	Electrode-solution interfacial capacitance [F]
d	Distance between two electrodes [cm]
$e^-$	Electron [ $1.602 \times 10^{-19}$ C]
$E_{\text{anode}}$	Half-cell potential at the anode [V]
$E_{\text{cathode}}$	Half-cell potential at the cathode [V]
$E^0$	Standard electrode voltage [V]
f	Frequency [Hz]
h	Height [m]
$H^+$	Hydrogen ions [mole]
I	Current [A]
i	Current density [ $A/m^2$ ]
I	Phasor current [A]
$I_m$	Current amplitude [A]
$I_{\text{load}}$	Generated current [A]
$i_{\text{load}}$	Generated current density [ $A/m^2$ ]
l	Length [m]
M	Concentration of the substrate [mol/l]

$n$	Number of moles of electrons produced per mol of substrate
$P$	Power [W]
$p$	Power density [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]
$P_{\text{load}}$	Generated power [W]
$p_{\text{load}}$	Generated power density [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]
$Q$	Charge [C]
$R$	Resistance [ $\Omega$ ]
$R_E$	The electrode resistance [ $\Omega$ ]
$R_S$	Solution resistance [ $\Omega$ ]
$R_i$	Electrode-solution interfacial resistance [ $\Omega$ ]
$R_{\text{load}}$	Load resistance [ $\Omega$ ]
$R_{\text{th}}$	Thevenin resistance [ $\Omega$ ]
$t$	Time [sec]
$T$	Temperature [K]
$V$	Voltage [V]
$V$	Phasor voltage [V]
$V_{\text{BFC}}$	BFC voltage [V]
$V_m$	Voltage amplitude [V]
$V_{\text{oc}}$	Open circuit voltage [V]
$V_{\text{load}}$	Generated voltage [V]

$V_{th}$	Thevenin voltage [V]
$v$	Substrate volume [l]
$d$	Distance between electrodes [m]
$w$	Wide [m]
$Z_E$	Electrode impedance [ $\Omega$ ]
$Z_S$	Solution impedance [ $\Omega$ ]
$Z_L$	Load impedance [ $\Omega$ ]
$Z_i$	Electrode-solution interface impedance [ $\Omega$ ]
$Z_{CPE}$	Constant-Phase Element (CPE) impedance [ $\Omega$ ]
$Z_T$	Total impedance [ $\Omega$ ]
$ Z $	Impedance magnitude [ $\Omega$ ]