

Meshack Imologie Simeon

**Optimization of Soil Microbial Fuel Cell for
Sustainable Bioelectricity Generation and
Bioremediation**



Verlag Dr. Köster
Berlin

Wissenschaftliche Schriftenreihe Bioprozesstechnik

Band 8

D 703

(Dissertation Universität Bayreuth)

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

1. Auflage Mai 2023

Verlag Dr. Köster
IHZ
Friedrichstr. 95
10117 Berlin

Tel. 030 76 40 32 24

info@verlag-koester.de

www.verlag-koester.de

ISBN 978 - 3 - 96831 - 034 - 3

Optimization of Soil Microbial Fuel Cell for Sustainable Bioelectricity Generation and Bioremediation

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften
der Universität Bayreuth
zur Erlangung der Würde
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

VON

M.Sc. Meshack Imologie Simeon

AUS

Okpella, Edo State, Nigeria

Erstgutachterin:	Prof. Dr. rer. Nat. R. Freitag
Zweitgutachter:	Prof. Dr.-ing. D. Holtmann
Tag der Mündlichen Prüfung:	02. March, 2023

Lehrstuhl Bioprozesstechnik
Universität Bayreuth

2023

Optimization of Soil Microbial Fuel Cell for Sustainable Bioelectricity Generation and Bioremediation

From the Faculty of Engineering
at the University of Bayreuth
to gain dignity as
Doctor-Engineering (Dr.-Ing.)
Approved dissertation

by

M.Sc. Meshack Imologie Simeon

from

Okpella, Edo State, Nigeria

First examiner: Prof. Dr. rer. Nat. R. Freitag
Second examiner: Prof. Dr.-ing. D. Holtmann
Day of the oral exam: 02. March, 2023

Chair of Process Biotechnology
University of Bayreuth

2023

Abstract

The focus of energy strategies of all countries has shifted from traditional fossil fuels to environmentally friendly and renewable energy sources out of concern for environmental protection and sustainability. Microbial fuel cell (MFC) technology is one of the leading research topics as a potential renewable energy source due to its environmental friendliness and versatility. Among MFC concepts, soil MFC (SMFC) is very attractive for bioremediation of polluted environments while generating bioelectricity, which has applications in sensor development. However, the low energy yield and associated performance instability require optimization of some key factors to develop SMFC beyond laboratory experiments. While many of these factors have generally been investigated in single-factor experiments, knowledge of the interactive effects of key variables on SMFC performance is limited. Therefore, this study aims to determine the individual and interactive effects of selected variables on SMFC performance by integrating the variables into a single experimental design. The objective is to find a solution for the optimal performance of SMFC for sustainable bioelectricity generation and application in bioremediation.

Design Expert software was used to obtain an optimal user-defined design for the optimization study. In this regard, two electrode materials, namely carbon felt (CF) and surface-modified stainless-steel mesh (SM), were tested at three different electrode spacings (ES) and three levels of substrate feeding interval or duration (FD). Using a new electrode fabrication method, the effect of the binder component of the electrode material was further investigated by comparing the performance of four different polymer binders, namely epoxy, polyvinyl alcohol, polytetrafluoroethylene, and polyvinylidene fluoride, in the SMFC. 16S rDNA gene amplicon sequencing was performed to gain insight into the effects of the experimental treatments on the microbial community diversity and its effect on the overall performance of the SMFC. Finally, a customized multicell SMFC was developed to study the bio-electrochemical stimulation of indigenous soil microbes for the biodegradation of petroleum hydrocarbon-contaminated soils.

The results of the study based on the influences of the individual factors show that the SM electrode produced an average 4-fold higher power density compared to the CF electrode at all experimental treatment levels. The result of the combined optimization including the interactive effects of the variables showed that the optimum stable performance of the SMFC could be achieved at an ES of about 4 cm and a FD of 8 days, although the electrode material proved to be the most influential factor. By further optimizing the binder component of the SM,

a maximum power density of 515.4 mW/m² was achieved with epoxy, which is 2.3 times higher than the maximum power achieved in the first optimization. Application of the optimized electrode in the SMFC designed for bioremediation resulted in biodegradation of up to 24.26 % of total petroleum hydrocarbons in the contaminated soil within 24 days with concurrent power generation, compared to 11.04 % and 5.34 % removal in open-circuit and under natural attenuation, respectively. Microbial community analysis revealed that both the contaminated and uncontaminated soils were enriched in a variety of microbes, including common electroactive bacteria such as *Shewanella oneidensis* and *Lactococcus lactis*. While the microbial community was dominated by a group of bacteria belonging to the Proteobacteria phylum, the diversity in composition and abundance in the SMFC was associated with the cathode and anode and the time of sampling, but not with the different electrode materials. This result indicated that the difference in electrode performance was due to the electrochemical properties of the electrodes, but not to the diversity in microbial composition and abundance.

This study contributes to the body of scientific knowledge by determining the best combination of electrode material, electrode spacing, and substrate loading interval to achieve the optimal performance of SMFC for stable bioelectricity generation. Among others, the study demonstrated the potential practical implementation of the optimized SMFC system for lighting, biosensor development, and bioremediation of polluted soil. Further studies could focus on improving the SMFC design for continuous substrate utilization and moisture availability during bioremediation, as well as developing an efficient power management system to scale up the output of a single SMFC without stacking many units.

Zusammenfassung

Der Schwerpunkt der Energiestrategien aller Länder hat sich aus Sorge um den Umweltschutz und die Nachhaltigkeit von den traditionellen fossilen Brennstoffen zu umweltfreundlichen und erneuerbaren Energiequellen verlagert. Die mikrobielle Brennstoffzellentechnologie (MBZ) ist aufgrund ihrer Umweltfreundlichkeit und Vielseitigkeit eines der führenden Forschungsthemen als potenzielle erneuerbare Energiequelle. Unter den MBZ-Konstruktionen ist die Boden-MBZ (BMBZ) sehr attraktiv für die Bioremediation von verschmutzten Umgebungen bei gleichzeitiger Erzeugung von Bioelektrizität, die in der Sensorentwicklung Anwendung findet. Aufgrund der geringen Energieausbeute und der damit verbundenen Leistungsinstabilität ist jedoch eine Optimierung einiger Schlüsselfaktoren erforderlich, um BMBZ über Laborversuche hinaus zu entwickeln. Während viele dieser Faktoren im Allgemeinen in Einzelfaktorexperimenten untersucht wurden, ist das Wissen über die interaktiven Auswirkungen der Schlüsselvariablen auf die BMBZ-Leistung begrenzt. Daher zielt diese Studie darauf ab, die individuellen und interaktiven Effekte ausgewählter Variablen auf die BMBZ-Leistung zu bestimmen, indem die Variablen in einen einzigen Versuchsplan integriert werden. Ziel ist es, eine Lösung für die optimale Leistung von BMBZ für die nachhaltige Erzeugung von Biostrom und die Anwendung in der Bioremediation zu finden.

Die Software Design Expert wurde verwendet, um ein optimales kundenspezifisches Design für die Optimierungsstudie zu erhalten. In diesem Zusammenhang wurden zwei Elektrodenmaterialien, nämlich Kohlenstofffilz (KF) und oberflächenmodifiziertes Edelstahlgewebe (ESG), bei drei verschiedenen Elektrodenabständen (EA) und drei Stufen des Substratvorschubintervalls (SVI) getestet. Unter Verwendung einer neuen Elektrodenherstellungsmethode wurde die Auswirkung der Bindemittelkomponente des Elektrodenmaterials weiter untersucht, indem die Leistung von vier verschiedenen Polymerbindemitteln, nämlich Epoxid, Polyvinylalkohol, Polytetrafluorethylen und Polyvinylidenfluorid, in der BMBZ verglichen wurde. Die Sequenzierung von 16S rDNA-Genamplikons wurde durchgeführt, um einen Einblick in die Auswirkungen der experimentellen Behandlungen auf die Vielfalt der mikrobiellen Gemeinschaft und ihre Auswirkungen auf die Gesamtleistung der SMFC zu erhalten. Schließlich wurde eine maßgeschneiderte mehrzellige BMBZ entwickelt, um die bioelektrochemische Stimulation einheimischer Bodenmikroben zum biologischen Abbau von mit Erdölkohlenwasserstoffen kontaminierten Böden zu untersuchen.

Die Ergebnisse der Studie auf der Grundlage der Einflüsse der einzelnen Faktoren zeigen, dass die ESG-Elektrode im Vergleich zur KF-Elektrode bei allen experimentellen Behandlungsstufen eine durchschnittlich 4-fach höhere Leistungsdichte erzeugte. Das Ergebnis der kombinierten Optimierung unter Einbeziehung der interaktiven Effekte der Variablen zeigte, dass die optimale stabile Leistung der BMBZ bei einem EA von etwa 4 cm und einer SVI von 8 Tagen erreicht werden konnte. Durch eine weitere Optimierung der Bindemittelkomponente der ESG wurde eine maximale Leistungsdichte von 515,4 mW/m² mit Epoxid erreicht, die 2,3 Mal höher ist als die maximale Leistung, die bei der ersten Optimierung erreicht wurde. Die Anwendung der optimierten Elektrode in der für die Bioremediation konzipierten BMBZ führte zu einem biologischen Abbau von bis zu 24,26 % der gesamten Erdölkohlenwasserstoffe im kontaminierten Boden innerhalb von 24 Tagen bei gleichzeitiger Stromerzeugung, verglichen mit 11,04 % und 5,34 % Entfernung bei offenem Kreislauf bzw. natürlicher Attenuation. Die Analyse der mikrobiellen Gemeinschaft ergab, dass sowohl die kontaminierten als auch die nicht kontaminierten Böden mit einer Vielzahl von Mikroben angereichert waren, darunter häufige elektroaktive Bakterien wie *Shewanella oneidensis* und *Lactococcus lactis*. Während die mikrobielle Gemeinschaft von einer Gruppe von Bakterien dominiert wurde, die zum Stamm der Proteobakterien gehören, war die Vielfalt in der Zusammensetzung und Häufigkeit in der BMBZ mit der Kathode und Anode und dem Zeitpunkt der Probenahme verbunden, aber nicht mit den verschiedenen Elektrodenmaterialien. Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass der Unterschied in der Elektrodenleistung auf die elektrochemischen Eigenschaften der Elektroden zurückzuführen ist, nicht aber auf die Vielfalt der mikrobiellen Zusammensetzung und Abundanz.

Diese Studie trägt zu den wissenschaftlichen Erkenntnissen von bei, indem sie die beste Kombination aus Elektrodenmaterial, Elektrodenabstand und Substratbeladungsintervall ermittelt, um die optimale Leistung der BMBZ für eine stabile Bioelektrizitätserzeugung zu erreichen. Die Studie zeigte unter anderem die potenzielle praktische Umsetzung des optimierten BMBZ -Systems für die Beleuchtung, die Entwicklung von Biosensoren und die Bioremediation von verschmutzten Böden. Weitere Studien könnten sich darauf konzentrieren, das Design der BMBZ für eine kontinuierliche Substratnutzung und Feuchtigkeitsverfügbarkeit während der Bioremediation zu verbessern sowie ein effizientes Energiemanagementsystem zu entwickeln, um die Leistung einer einzelnen BMBZ zu erhöhen, ohne viele Einheiten zu stapeln.