



CHALMERS

Kraftfulla mikroorganismer

En studie om den mikrobiella bränslecellen och dess sensorapplicering inom vattenrening

Kandidatarbete inom vatten miljö teknik

EMIL JOHANSSON

SARA LARSSON

AMANDA LÖÖV MILJEVIC

ALBIN NIMHEIM

PAVINEE NOJPANYA

KANDIDATUPPSATS

Kraftfulla mikroorganismer

En studien om den mikrobiella bränslecellen och dess sensorapplicering inom vattenrening

EMIL JOHANSSON

SARA LARSSON

AMANDA LÖÖV MILJEVIC

ALBIN NIMHEIM

PAVINEE NOJPANYA

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnad
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2019

Kraftfulla mikroorganismer

En studie om den mikrobiella bränslecellen och dess sensorapplicering inom vattenrening

EMIL JOHANSSON

SARA LARSSON

AMANDA LÖÖV MILJEVIC

ALBIN NIMHEIM

PAVINEE NOJPANYA

© EMIL JOHANSSON, SARA LARSSON, AMANDA LÖÖV MILJEVIC, ALBIN NIMHEIM, PAVINEE NOJPANYA, 2019

Handledare: Oskar Modin, Docent, Arkitektur och samhällsbyggnadsteknik, Vatten Miljö Teknik

Examinator: Frank Persson, Docent, Arkitektur och samhällsbyggnadsteknik, Vatten Miljö Teknik

Kandidatuppsats

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Chalmers Tekniska Högskola

SE-412 96 Göteborg

Förord

Under arbetets gång har vi fått en fördjupad kunskap om MFC-tekniken och dess möjlighet för sensorapplisering. Dessutom har vi fått prova att bygga en egen fungerande MFC, vilket har varit en mycket underhållande och lärorik kreativ process.

Vi vill rikta ett stort tack till vår handledare Oskar Modin, docent på avdelningen vatten miljö teknik på Chalmers tekniska högskola, som gett goda råd och hjälpt oss på vägen med laborationsarbetet. Vi vill även tacka Maria Neth från Ryaverket i Göteborg som ställde upp på en intervju.

Göteborg, maj 2019

Emil Johansson, Sara Larsson, Amanda Lööv Miljevic, Albin Nimheim, Pavinee Nojpanya

Abstract

In this study an examination of a microbial fuel cell (MFC) of a simple and inexpensive design has been made, where its potential to power a toy and to be applied as a biosensor of biochemical oxygen demand (BOD) within a waste water treatment plant were the main issues. The report has also been enriched with a literature study with the intention to provide a fundamental understanding of the technology within the MFC, and to answer why its application as a sensor is desirable.

Three single chamber MFCs of similar character have been constructed, set up in plastic buckets with carbon felt and carbon net acting as anode and cathode respectively. Waste water provided by Ryaverket in Gothenburg has been used as a source of bacterial culture. In the experimental phase, the MFCs were fed with a various concentration of the nutrient sodium acetate, with the underlying objective being to observe a change in the voltage outcome over time and thus be able to confirm a potential within the sensor application.

Different tools were applied to evaluate the performances of the MFCs. For instance, their efficiencies were calculated using the coulombic efficiency, and polarization and power curves were composed. The maximum voltage the three MFCs were able to produce was roughly 0.3 V and their efficiency reached a maximum of 0.4%. This performance was not enough to power the toy.

A MFC's potential within sensor application could in this study not be substantiated, since a consistent correlation between the voltage outcome and the nutrient load in the built MFCs was absent. An explanation to the inadequate outcome is believed to be the encountered difficulties trying to maintain the cathode afloat after an increasing of weight generated by fouling and precipitates.

Keywords: *Microbial Fuel Cell, BOD, Biosensor, Waste water Treatment Plant*

Sammanfattning

I den här studien har en undersökning gjorts huruvida en mikrobiell bränslecell (MFC) av en billig och enkel utformning har potential att driva en leksak, samt att appliceras som en biosensor för biokemisk syreförbrukning (BOD) inom avloppsvattenrening. Rapporten har även berikats med en litteraturstudie med intention att ge en grundlig förståelse för MFC:er, samt ge svar på varför en sensorapplicering är att eftertrakta.

Tre enkammars-MFC:er av samma karaktär har konstruerats, utformade i plasthinkar med kolfiberfilt och kolfibernetagerande som anod respektive katod. Avloppsvatten, hämtat från Ryaverket i Göteborg, användes som ursprung till bakteriekultur. I experiment har MFC:erna matats med olika mängder av näringsämnet natriumacetat, med målsättningen att kunna iaktta en förändring av spänningsutvinningen över tid och således kunna bekräfta en potential till sensorapplicering.

MFC:ernas prestation utvärderades med olika verktyg. Till exempel beräknades deras verkningsgrad med hjälp av den coulombiska effektiviteten och polariserings- och effektkurvor konstruerades. De tre MFC:erna producerade en maximal spänning kring 0,3 V och verkningsgraden uppgick maximalt till 0,4%. Denna prestation var inte tillräcklig för att driva leksaken.

En potential till sensorapplicering kunde i denna studie inte styrkas då de byggda MFC:erna inte påvisade någon konsekvent korrelation mellan spänningsutfall och näringsmängdstillsatts. En av anledningarna till det ovissa resultatet tros bero på de svårigheter som uppstod med att bibehålla katoderna flytande efter viktpålägg från påväxter och utfällningar.

Nyckelord: *Mikrobiell bränslecell, BOD, Biosensor, avloppsreningsverk*

Innehåll

1	Inledning	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Syfte	2
1.3	Frågeställningar	2
1.4	Avgränsningar	3
2	Den mikrobiella bränslecellen	4
2.1	Historien bakom den mikrobiella bränslecellen	4
2.2	Den mikrobiella bränslecellens konfigurationer	5
2.3	Reaktioner i den mikrobiella bränslecellen	6
2.4	Bakteriernas levnadskrav och mekanismer	7
2.4.1	Faktorer som påverkar bakteriernas överlevnad	7
2.4.2	Bakteriernas transportmekanism för elektroner	8
2.5	Anodens egenskaper och material	9
2.6	Katodens egenskaper och material	10
2.7	Metoder för att mäta en MFC:s effektivitet	11
2.7.1	Ohms lag samt ström- och effekttäthet	11
2.7.2	Polariserings- och effektkurva	12
2.7.3	Coulombisk effektivitet	12
3	Tillämpning av den mikrobiella bränslecellen inom vattenrening	14
3.1	Den grundläggande principen för avloppsrening	14
3.2	BOD; karaktärisering, historia och påverkan	15
3.2.1	Standardiserad metoden för provtagning av BOD	16
3.2.2	Krav på BOD ₇	16
3.2.3	Flaskhalsar vid provtagning av BOD ₇ med standardiserade metoden	17
3.3	En mikrobiell bränslecells potential att sensorappliceras	17
3.3.1	Sensorappliceringens utveckling	18
3.3.2	Sensorappliceringens utmaningar	18
3.3.3	Framgångsrika metoder för att optimera sensorappliceringen	19
4	Hållbarhetsaspekter hos den mikrobiella bränslecellens tillämpningar som BOD-sensor	20
4.1	Sociala aspekter	20
4.2	Ekonomiska aspekter	20
4.3	Ekologiska aspekter	21
5	Utförande av konstruktion och test med mikrobiella bränsleceller	22
5.1	Resonemang inför konstruktion av mikrobiella bränsleceller	22
5.2	Resonemang kring materialval	22
5.3	Metod för konstruktion av de mikrobiella bränslecellerna	23
5.3.1	Tillverkning av anod	23
5.3.2	Tillverkning av katod	24
5.3.3	Montering av anod och katod	25
5.4	Tester utförda med de mikrobiella bränslecellerna	26
5.4.1	Datinsamling och konstruktion av polariserings- och effektkurvor	26
5.4.2	Utvärdering av cellpotential och verkningsgrad	26
5.4.3	Inkoppling av leksaken	27
5.4.4	Test för att undersöka potentialen som BOD-sensor	27
6	Resultat	29

6.1	Förändringar hos de mikrobiella bränslecellerna under arbetets gång	29
6.2	Polariserings- och effektkurvor	31
6.3	De mikrobiella bränslecellernas cellpotential	34
6.4	De mikrobiella bränslecellernas verkningsgrader	36
6.5	Resultatet av leksakens inkoppling	36
6.6	Test för sensorapplicering	36
7	Diskussion	40
7.1	Utvärdering av de mikrobiella bränslecellernas prestation	40
7.1.1	Problematiken med påväxter	40
7.1.2	Analys av polarisering- och effektkurva	41
7.1.3	Utvärdering av cellpotentialen och den coulombiska effektiviteten	41
7.1.4	Resultat av sensorapplicering	42
7.2	Kommersiell sensorapplicering av mikrobiella bränsleceller	44
7.3	Utvärdering av metod	45
8	Slutsats	46
A	Fullständig data för polariseringskurvor	i

1 Inledning

I dagens värld där en växande befolkning och en ökad ekonomisk tillväxt konstant efterfrågar mer energi blir konsekvensen att större och mer problematiska avtryck görs på planetens välmående som resultat av användandet av fossila energikällor [1]. Dessa energikällor måste därför ersättas av förnyelsebara energikällor som inte förstör planeten [2]. En ökad medvetenhet hos dagens människa kring betydelsen av denna förändring innebär desto högre krav på samhällets energiproducenter. Kravet gör att flera fossila energikällor måste upptäckas och utvecklas för att tillgodose samhällets energibehov. En av dessa energikällor som tänkbart skulle minska människans påverkan på planeten är mikrobiella bränsleceller.

En mikrobiell bränslecell (MFC, för engelskans Microbial Fuel Cell) fungerar principiellt på liknande sätt som en galvanisk cell i såväl reaktionsförlopp som dess ingående komponenter. I en MFC är det dock bakterier som bryter ner organiska ämnen varvid elektroner frigörs [3]. Dessa elektroner ger sedan upphov till en elektrisk ström. Utöver utvinning av elektricitet kan MFC:er ha potential att appliceras som sensorer för att förbättra reningen av vatten [4]. Inom detta område är det viktigt med utveckling då vatten idag är en bristvara på många platser på jorden, samt att det ofta är påverkat av mänsklig aktivitet [5]. En effektivare reningsprocess är därför nödvändig för att kunna förse den ökande befolkning med vatten nu och i framtiden.

1.1 Bakgrund

Det konstant stigande energibehovet ökar för såväl det personliga bruket som för samhällets infrastruktur. En funktion som kräver stor mängd energi är hanteringen av avloppsvatten [1]. Länder som USA har ett energibehov för reningsverken som uppgår till mellan tre till fyra procent av landets totala förbrukning av elektricitet [6]. Inom Europa kräver Storbritanniens reningsverk samma mängd elektricitet som en procent av den dagliga elförbrukningen för England och Wales tillsammans. Det kan därmed klarläggas att en stor mängd energi krävs för att upprätthålla reningsverkens funktioner, men detta energibehov är tämligen litet i jämförelse med mängden energi som avloppsvattnet innehåller. Vattnet innehåller mellan tre till tio gånger mer energi än vad processerna kräver vid dess rening [6]. Avloppsvattnets potential som energikälla ligger som grund till den alternativa energitekniken med MFC:er, där förnyelsebar energi kan genereras ur avloppsvatten tack vare dess rika innehåll av organiskt material [7][8]. Tekniken skulle alltså på sikt kunna utvinna energi som finns bunden i avloppsvatten samtidigt som den även kan rena det från organiskt innehåll.

I dagsläget är en MFC:s effektivitet låg jämfört med andra källor som idag klassas som förnyelsebara, exempelvis sol och vindenergi. En MFC kan användas till att driva mindre elektronisk utrustning [9] där det bland annat har gjorts försök med LED-lampor som har lyckats drivas i två dagar. Teoretiskt är den högsta spänningen som kan erhållas ur en MFC 1,1 V [10], men i praktiken kan endast maximalt 0,7-0,8 V erhållas på grund av förluster [11]. För att driva större elektronisk utrustning skulle det därför krävas fler MFC:er för att uppnå högre effekt, vilket både kräver mer material och större utrymme. Det medför att ytterligare forskning och utveckling av den mikrobiella bränslecellen krävs för att applicera tekniken inom kommersiell elproduktion.

Den elektriska energin producerad av en MFC skulle potentiellt kunna användas till att förse de processer som krävs för att rena avloppsvattnet i reningsverken med energi. Det skulle både bli mer miljövänligt och lönsamt för reningsverken, då det idag, som tidigare nämnts, krävs en stor mängd energi för att utföra reningsprocesserna [6].

Det mest efterforscade appliceringsområdet av en MFC är energiutvinning, men fler användningsområden finns. Ett av de användningsområdena är sensorapplicering för att mäta biokemisk syreförbrukning

(BOD, för engelskans Biochemical Oxygen Demand), där fokus ligger på att analysera den elektriska utsignalen istället för den kvantitativa utvinningen av energi [4]. En utvärdering av BOD resulterar i ett värde som motsvarar hur stor mängd organiskt material som vattnet innehåller [12]. Idag utvärderas BOD genom en metod som tar upp till sju dagar. Tillämpningen av en MFC skulle kunna tidseffektivisera processen i den grad att det endast skulle krävas timmar eller ibland minuter innan ett värde för BOD skulle erhållas [4]. Tekniken innebär därmed att det snabbare skulle ges möjlighet för åtgärder i reningsstegen hos ett avloppsreningsverk, samt en ökad vetskap om vad som återförs till naturen. Sensortekniken kan även appliceras för till exempel toxicitetsmätningar inom vattenrening [13] för att kontrollera att vattnet inte innehåller för stor mängd toxiska ämnen, såsom tungmetaller och svårnedbrytbara organiska föreningar.

Dessutom kan MFC-tekniken till exempel användas till att utvinna väte eller förse elektronisk utrustning på otillgängliga platser med ström, exempelvis sensorer eller robotar på havets botten [14]. Dessa skulle med tekniken kunna försörjas med elektricitet producerad av havets bottensediment. Ytterligare ett alternativt användningsområde för en MFC skulle kunna tänkas vara vid sanering av förorenat grundvatten på grund av teknikens vattenrenande egenskaper.

Den här rapporten har sin grund i dagens aktuella miljöproblem, där en hållbar samexistens mellan människa och jord måste utvecklas och appliceras. Hållbarhetsperspektivet kan delvis uppnås med hjälp av MFC-tekniken, där denna studie och tillhörande experiment i framtiden potentiellt kan bidra till en del av lösningen i klimatfrågan, effektivare vattenreningsprocesser och åtgärder till andra nämnda problem. Arbetet är administrerat av avdelningen Water Environment Technology (WET) som är verksam vid Chalmers tekniska högskola. WET kommer erbjuda arbetsmaterialet och de framställda MFC:erna efter projektets färdigställande, för en eventuell användning i utbildningssyfte.

1.2 Syfte

Studien syftar till att ge en fördjupning i vad en mikrobiell bränslecell är, hur den fungerar och hur den kan tillämpas inom sensorapplicering. Dessutom ska en konstruktion av MFC utformas och byggas med målet att undersöka en MFC:s potential att appliceras som sensor för BOD-mätning. Det ska dessutom undersökas om MFC:n kan producera tillräckligt mycket ström för att driva en leksak.

1.3 Frågeställningar

Arbetet syftar, förutom till att göra en fördjupning i MFC-tekniken, till att undersöka potentialen att använda en MFC som BOD-sensor och se om en eldriven leksak kan drivas med en MFC. De frågor som arbetet önskas kunna besvara är följande:

- På vilket sätt hade det varit möjligt att använda MFC som sensor vid BOD-mätning i vattenreningsverk?
- Vad krävs för att få leksaken att röra sig med MFC som energikälla?

För att kunna besvara dessa har delfrågor formulerats:

- Hur ser metoden för mätning av BOD ut idag?
- Hur påverkar olika tillsattser av näringsämne MFC:ns spänning?
- Om tillsats av näringsämne genererar en förändring i cellens spänning, hur snabbt kan denna förändringen ses?

1.4 Avgränsningar

I detta arbete har en tydlig avgränsning gjorts mot MFC som sensor för mätning av BOD inom vattenrening. Det har gjorts en litteraturstudie där fokus låg på vad en MFC är, dess ingående komponenter och hur dess prestation kan utvärderas. Inom denna del har arbetet avgränsas ytterligare och enbart behandlat MFC med syrgas som elektronmottagare, då detta är den mest relevanta för tillämpning av MFC som sensor. Dagens metod för mätning av BOD har också beskrivits för att ge en bakgrund till en diskussion av MFC:ns för- och nackdelar vid BOD-mätning. Avgränsningen mot MFC som BOD-sensor har gjorts av intresse för att se om en effektivare BOD-mättningsprocess är möjlig.

Projektet innefattar även en experimentell del, där arbetet avgränsats genom att endast *en* modell av en MFC valts ut och konstruerats. Modellen har avgränsats till en enkammars-MFC utan pump, med syrgas som elektronmottagare. En pump hade använts för att syresätta katoden och anledningen till att detta väljs bort är för att hålla modellen enkel och energisnål. Bakterierna som använts har sitt ursprung från orenat avloppsvatten, vilket innebär att en avgränsning gjorts till användandet av en blandkultur.

2 Den mikrobiella bränslecellen

För att uppfylla syftet med att göra en fördjupning om mikrobiella bränsleceller (MFC:er) har en litteraturstudie rörande dess historia, utformning och funktion samt i sammanhanget användbara analysverktyg gjorts. Delar av detta står sedan i grund till den MFC:n som konstrueras i anknytning till arbetet.

MFC:er kan användas för att utvinna elektrisk energi genom att utnyttja den kemiska reaktionen som sker när mikroorganismer bryter ner organiska ämnen och därigenom frigör elektroner. Frigöring av elektronerna är en del av en så kallad redoxreaktion som består av en oxidations- och reduktionsreaktion. En oxidationsreaktion sker när elektroner frigörs från ett ämne och en reduktionsreaktion när elektroner tas upp. För att en redoxreaktion ska ske behövs två elektroder; en anod och en katod. I en MFC oxideras organiska ämnen vid anoden genom bakterier under anaeroba förhållanden. Elektronerna som avges vandrar genom en ledare till en katod. Vid katoden tas dessa elektroner upp av en elektronmottagare, som till exempel syrgas, och reduceras. Rörelsen av elektroner från anod till katod ger upphov till ett elektriskt arbete, som i sin tur skapar elektrisk energi på grund av potentialskillnaden i elektroderna [15].

2.1 Historien bakom den mikrobiella bränslecellen

Historiskt är förekomsten av ström vid reaktioner med mikroorganismer ingen ny upptäckt. Förhållandet mellan biologi och elektricitet upptäcktes redan år 1780 av biologen Luigi Galvani [16][17]. Efter Galvanis tidiga upptäckt dröjde det till år 1911 innan botanikern Michael Cresse Potter med hjälp av mikroorganismen *Escherichia coli* lyckades producera en ström [16][3]. Det M.C. Potter hade lyckats skapa var den första mikrobiella bränslecellen.

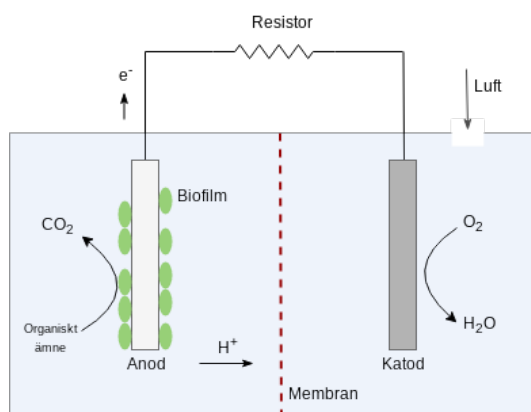
Den elektricitet M.C. Potters bränslecell lyckades generera var dock liten, vilket ledde till att en stor-skalig forskning inom området inte genomfördes på flera år [16][18]. Den mikrobiella bränslecellen blev istället åter i fokus år 1931, då Barnet Cohen konstruerade det första mikrobiella batteriet[7][16][19]. Batteriet som konstruerades hade en kapacitet på 35 V, vilket var ett resultat av att flera mikrobiella halvceller seriekopplats. Tekniken och forskningen inom mikrobiella bränsleceller växte i en större utsträckning under 1960-talet när den federala myndigheten för luft och rymdfart, NASA, visade intresse för tekniken [17]. NASA:s engagemang grundades i ett intresse att framställa energi från det organiska material som uppkommer under rymduppdrag.

Under de tidiga åren av 1990-talet började intresset för MFC-tekniken intensifieras och en bredare forskning skedde inom området [3]. Det ökade intresset resulterade i att forskare år 1999 lyckades utveckla bränslecellen till att fungera utan en mediator, vilket är ett hjälpmedel för att överföra elektroner till anoden. Denna forskningsupptäckt var betydelsefull för tekniken då detta hjälpmedel tidigare hade krävts för att en MFC skulle fungera. Intresset för tekniken växtes än mer starkt under 2000-talet och i nutid har en stor mängd material om tekniken publicerats i jämförelse med tidigare år under 2000-talet [17].

Sedan demonstreringen av den första MFC:n år 1911 av M.C. Potter och genom hela teknikens historia har den klassats som ett bra alternativ för att utvinna förnyelsebar energi men hinder finns för tekniken [20]. De problem som dagens forskare står inför är att effektivisera metoden genom att hitta de bäst lämpade materialen för cellens komponenter samt att minimera förluster vid elektricitetsproduktionen i bränslecellen [11]. Det är i nutid världens forskare börjar förstå hur tekniken fungerar och hur den skulle kunna appliceras för kommersiellt bruk [10].

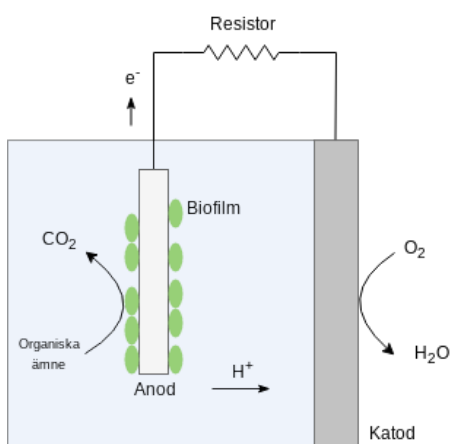
2.2 Den mikrobiella bränslecellens konfigurationer

Det finns många konfigurationer av en MFC, men de två vanligaste är en enkammars- eller en tvåkammars-MFC [21]. En tvåkammars-MFC som visas i Figur 1 består av en anodkammare och en katodkammare som separeras av en separator, som exempelvis kan vara ett *Cation Exchange Membrane* (CEM), en saltbrygga eller ett poröst membran [22]. Förutom att fysiskt separera två kammare från varandra har separatorn som funktion att tillåta diffusion av protoner från anodkammaren till katodkammaren som därigenom blir ett slutet system [23]. Separatorn hjälper även till att minimera diffusion av syre och organiskt ämne, i sammanhanget även kallat substrat, mellan anod och katod. Diffusion av syre till anoden är ofördelaktigt, då anoden behöver hållas fri från syre, vid närvaro av syre skulle bakteriernas förbrukning av de organiska ämnena minska. [24].



Figur 1: Tvåkammars-MFC med syrgas som elektronmottagare.

En enkammars-MFC däremot består endast av en anodkammare och en katod som sitter fast vid ytan eller väggen av anodkammaren [21], se Figur 2. Vanligtvis används syrgas som elektronmottagare i en enkammars-MFC eftersom katoden har direkt kontakt med syre i luften. Katoden kallas då för luftkatod. Till skillnad från en enkammars-MFC kan en tvåkammars-MFC använda flera olika elektronmottagare utöver syrgas, bland annat ferrocyanid, permanganat och nitrat [21].



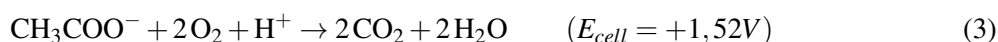
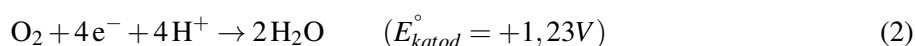
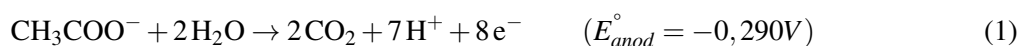
Figur 2: Enkammars-MFC med syrgas som elektronmottagare.

Båda designerna av MFC besitter både för- och nackdelar. Tvåkammars-MFC:ers fördel är separatorn som kan hindra diffusion av syre till anoden och diffusion av substrat till katoden, men nackdelen är att den kan kontaminera katoden och ge en blandad och därmed missvisande cellpotential [23]. Ett långt avstånd mellan anod och katod resulterar även i sämre prestation hos en MFC då den inre resistansen ökar

proportionellt med avståndet [25]. Fördelar med en enkammars-MFC är att den är billigare, enklare att konstruera och kräver mindre utrymme än en tvåkammars-MFC [25][26]. En enkammars-MFC förbättrar även reduktionen av syre på katoden tack vare direktkontakt med luften [25]. Mindre avstånd mellan anod och katod i en enkammars-MFC utan separator, ökar transporten av protonerna till katoden och den inre resistansen minskar. Det korta avståndet resulterar dock i att mer syre kan diffundera till anoden, och en direktkontakt med luft bidrar till att vatten kan avdunsta. Biologisk påväxt kan också vara ett problem för en enkammars-MFC utan separator då syre och substrat lättare kan transporteras mellan elektroderna [24].

2.3 Reaktioner i den mikrobiella bränslecellen

Redoxreaktionen i en MFC kan beskrivas genom två halvcellsreaktioner där oxidation sker i den ena halvcellen och reduktion i den andra. Det organiska ämnet som oxideras kan till exempel vara acetat (CH_3COO^-) i vattenlösning. Halvcellsreaktionen vid anoden och katoden samt den totala cellreaktion kan med acetat som elektrondonator och syrgas som elektronacceptator beskrivas som



där Reaktion (1) visar halvcellsreaktionen vid anoden, Reaktion (2) visar Reaktionen vid katoden och Reaktion (3) är den totala cellreaktionen [24][27]. E° betecknar standard-elektrodpotentialen för anoden och katoden. Standard-elektrodpotentialen är en potential som mäts i jämförelse med en referenselektrod, vars potential definieras som noll. Referenselektroden kallas standard väteelektrod (SHE, för engelskans Standard Hydrogen Electrode) och mätningen sker under standardförhållanden, det vill säga 1 bar, 298 K och pH = 0. Den teoretiska cellpotentialen (E_{cell}) som är potentialskillanden mellan katoden och anoden i en MFC, kan beräknas med formeln i Ekvation (4) [28].

$$E_{\text{cell}} = E_{\text{red}} - E_{\text{ox}} \quad (4)$$

Ett positivt värde på E_{cell} är termiskt gynnsamt, vilket innebär att reaktionerna kan ske spontant. Anledningen till att cellpotentialen behöver vara positiv för en spontan reaktion, är på grund av förhållandet mellan E_{cell} och Gibbs fria energi som visas i Ekvation (5) [15].

$$E_{\text{cell}} = \frac{-\Delta G_r}{\nu F} \quad (5)$$

där ΔG_r är förändringen i Gibbs fria energi för en cellreaktion ($\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$), ν är den stökiometriska koefficienten för elektronerna som överförs i redoxreaktionen och F är Faradays konstant, $9,64853 \cdot 10^4 \text{ C/mol}$. En spontan reaktion sker när Gibbs fria energi minskar och därmed antar ett negativt värde [29]. Detta gör att E_{cell} enligt Ekvation (5) får ett positivt värde.

Då MFC:n kan drivas under ett annat förhållande vad gäller pH kommer potentialskillnaden i MFC:n vara annorlunda än det som visas i Reaktion (3). För att ta hänsyn till ändringen i koncentration av vätejoner som är direkt kopplad till pH-värdet, kan cellpotentialen av katoden och anoden beräknas med hjälp av Nernst ekvation

$$E_{cell} = E_{cell}^{\circ} - \frac{RT}{nF} \ln(\Pi) \quad (6)$$

där R är den allmänna gaskonstanten, 8,3145 J/(mol·K), T är temperatur (K) och Π är reaktionskvot, vilket definieras som aktivitet av produkter dividerat med aktivitet för reaktanter [24]. Aktiviteten kan även antas vara koncentrationen eller trycket av komponenterna i vätskefas respektive gasfas.

För olika pH-förhållanden i en MFC kan potentialen av anoden, där reaktionen sker enligt Ekvation (1) och katoden, där reaktionen sker enligt Ekvation (2), räknas med Nernst ekvation enligt

$$E_{anod} = E_{anod}^{\circ} - \frac{RT}{8F} \ln\left(\frac{p(\text{CO}_2)^2 [\text{H}^+]^7}{[\text{CH}_3\text{COO}^-]}\right) \quad (7)$$

$$E_{katod} = E_{katod}^{\circ} - \frac{RT}{4F} \ln\left(\frac{1}{p(\text{O}_2)[\text{H}^+]^4}\right) \quad (8)$$

Värdet på aktiviteten för ämnet i fast- och vätskefas är ett, vilket förklarar varför aktiviteten av vatten inte visas med i ekvationerna. Sambandet mellan pH-värdet och koncentrationen av vätejonerna, $[\text{H}^+]$, är enligt Ekvation (9) [30].

$$\text{pH} = -\log[\text{H}^+] \quad (9)$$

2.4 Bakteriernas levnadskrav och mekanismer

Bakterierna är en drivande faktor i en MFC och har som syfte att utvinna elektroner genom oxidation. Oxidationen sker genom att enzymer i bakterierna bryter ner de organiska ämnena. Bakterier som kan genomföra denna process kallas för elektrogena bakterier (EAB, för engelskans Elektroactive Bacteria) [31]. Naturligt finns bakterierna i anaeroba, näringsrika miljöer. De har utvunnits från både mark och vattenmiljö men påträffats i rikligare mängder i vattenmiljö, som i sediment på havs- och sjöbottnar. Bakterier utvunna från dessa platser visar även en högre elektrogen aktivitet. Detta skulle kunna bero på det anaeroba förhållande som råder, samt det näringsrika sedimentet som ger bakterierna en optimal omgivning.

EAB:er förekommer i många olika stammar, där *Geobacter sulfurreducens*, *Rhodospirillum rubrum*, *Shewanella oneidensis* och *Escherichia coli* är några av de mest studerade [31]. Dessa stammar förekommer i rena kulturer och har i MFC:er gett upphov till elproduktion. Utöver rena kulturer finns det även blandkulturer, där många olika stammar av bakterier har blandats och växer sida vid sida. När det gäller blandkulturer kan det vara svårt att veta den exakta sammansättningen av bakterier och i många fall är det okänt. Detta medför även att det är svårt att veta vilken eller vilka bakterier som är de elproducerande. Blandkulturer hämtas främst från aktivt slam från t.ex reningsverk, eller havs- och sjöbottnar. I en MFC odlas bakterierna vid anoden där ett syrefritt förhållande råder.

2.4.1 Faktorer som påverkar bakteriernas överlevnad

För att bakterierna ska kunna leva måste vissa krav uppfyllas. Framförallt måste bakterien ha tillgång till livsavgörande ämnen. Ett av dessa är kväve som till exempel är en beståndsdel i aminosyror och nukleotider [32]. Vidare krävs väte som är en huvudbeståndsdel i organiska föreningar, fosfor som är en beståndsdel i nukleotider, samt fosforlipider, svavel, kaliumsalter, magnesium, calcium och järn, som alla är essentiella för bakterierna. Tillgång till en kolkälla är också nödvändigt för bakteriernas överlevnad,

eftersom cirka 50 procent av allt organiskt material är uppbyggt utav kol.

Miljön bakterien lever i har också en stor betydelse för dess överlevnad [31]. Faktorer som har en stor påverkan är temperatur och pH. Största andelen av alla EAB:er är mesofiler vilket innebär att deras optimala temperatur ligger mellan 20°C och 45°C. Det har dock visats att EAB:er har en stor tolerans för temperaturskillnader och kan både överleva i temperaturer under 20°C och över 45°C. Temperaturen påverkar bakteriernas kinetik som i sin tur har en påverkan på elproduktionen i en MFC. Detta kan förklaras med att de enzymer som är aktiva i bakterierna presterar bäst vid sina optimala temperaturer och en för hög eller låg temperatur försämrar bakterien.

De EAB:er som har en högre optimal temperatur, jämfört med mesofiler, har påvisat en högre elektrogenerativ aktivitet och en mindre risk för kontaminering av andra mikroorganismer som inte överlever vid dessa temperaturer [31]. EAB:er som visat kunna producera el vid dessa temperaturer tillhör stammen *Firmicutes* och skulle möjligtvis vid tillämpning i MFC:er kunna ha varmt restvatten, från till exempel industrier, som kolkälla. Motsatsen är de EAB:er som fungerar vid låga temperaturer. Dessa har oftast isolerats från marina sediment och största delen av de elproducerande bakterierna tillhör stammen *Geobacteraceae*. Dessa skulle kunna använda avloppsvatten direkt som kolkälla och har en möjlig applikation i biosensorer.

pH-värdet i bakteriernas omgivning har en stor påverkan för dess tillväxt [31]. Liksom temperaturen finns inget värde som är optimalt för alla EAB:er utan varje kultur har ett enskilt optimalt värde. Det optimala pH-värdet för de flesta EAB:er är dock ett neutralt värde kring 6,5 till 7,5. Vid pH-värden lägre än fem eller högre än åtta är risken stor att enzymernas aktiva säte förstörs och den elektrogena aktiviteten försämras.

Kolkällan kan variera mellan många olika ämnen [33]. Den kan vara allt från enkla fermenterbara kolhydrater, som glukos och sackaros, till mer komplexa icke-fermenterbara organiska föreningar. Några exempel på kolkällor som har testats för MFC:er är glukos, sackaros, laktat, xylos, cellulosa, acetat, etanol och avloppsvatten. Vanligt vid MFC:er är att använda ättiksyra som substrat, då detta har visats vara effektivt vid elproduktion.

2.4.2 Bakteriernas transportmekanism för elektroner

Vid en MFC:s anod bildar bakterierna en biofilm som är 30 till 50 µm tjock [33]. Alla mikroorganismer som kan överleva självständigt har förmågan att bilda biofilm, vilket är ett komplext skikt av mikroorganismer [34]. Biofilmen bildas på en solid yta och består av bakterierna samt polysackarider som bakterierna producerar. I en MFC är det nödvändigt att EAB:er bildar en biofilm för att kunna få en effektiv elproduktion.

Efter att bakterierna oxiderat det organiska materialet och fria elektroner bildats, använder EAB:er olika metoder för att transportera elektronerna till anoden. Det är framförallt bakteriearterna *Geobacter sulfurreducens* och *Shewanella oneidensis* som mer ingående studerats [31]. Det låga antalet studerade bakteriearter beror på den höga komplexitet som processen innefattar och problematik med att tyda elektronens transportväg *in vitro*. Hos båda bakterierna har dock två olika huvudklasser av transportsätt observerats, där ena är direkt elektronöverföring (DET) och det andra är medierad elektronöverföring (MET).

Geobacter sulfurreducens bildar i en MFC en tjock biofilm [33]. I ett första stadie, då biofilmen bara består av ett lager, använder bakterien MET för elektrontransport. Bakterien utsöndrar i detta stadie riboflavin som i sin tur binder till cytochrom c, som finns på bakteriens yttre membran, och tillsammans bildar de ett komplex. Riboflavin är en typ av b-vitamin [35] och cytochrom c är ett protein som

finns naturligt hos bakterien och innehåller hemgrupper, vilka har en viktig roll i bland annat elektrontransportkedjan [36]. Komplexets funktion är att transportera de fria elektronerna från biofilmen till det solida materialet [33]. Då *Geobacter sulfurreducens* biofilm mer och mer övergår till fler lager kommer elektrontransporten övergå till DET. Bakterierna närmast ytan kommer utnyttja cytokrom c för elektronöverföring, medan bakterier placerade längre bort från ytan kommer utveckla ledande nanotrådar, pili, som transporterar elektronerna inne i biofilmen till ytan.

Shewanella oneidensis använder en annan metod för att transportera de fria elektronerna till den solida ytan. Bakterien bildar extensioner av periplasmatiske cytokromer och cytokromer på det yttre membranet som ansluter till yttre membranblåsor [33]. Bakterien utsöndrar även två typer av flavin, riboflavin samt flavinmononukleotider, som fungerar som koenzym för cytokrom. Ett koenzym är en molekyl som binder till ett enzym för att denna ska kunna katalysera reaktionen [37]. Dessa komplex möjliggör sedan transporten av de fria elektronerna.

En möjlig transportväg för de fria elektronerna är även cell-till-cell kommunikation [38]. I detta fall skulle cellerna i biofilmen kommunicera genom *quorum sensing*, vilket innebär att cellerna genom att släppa ut vissa ämnen kan signalera till sina grannceller. Hos bakterien *Pseudomonas aeruginosa* till exempel, har det funnit att bakterien genererar specifika ämnen för *quorum sensing*. Men huruvida EAB:er använder *quorum sensing* för elektrontransport är ännu inte fastställt.

2.5 Anodens egenskaper och material

Anoden i en MFC är avgörande för hur stor effekttäthet som kan uppnås, då den verkar som en mellanhand mellan de elektrongenererande bakterierna och den yttre strömledande kretsen [39]. Därför behöver dess material ha vissa kvalitéer, som till exempel god elektrisk ledningsförmåga med låg resistans, vara väl kompatibel med bakterierna och kemiskt stabil, samt ej vara korrosivt [39][40]. Materialet bör även ha en stor yta och ha god hållfasthet. De material som hittills visats vara mest användbara för anoden, kan delas in i fyra huvudkategorier: kolbaserade, komposita, ytmodifierade och metallbaserade material [39].

För att gynna bildningen av biofilm bör anodens yta vara grov [40]. Anledningen till detta är att det då blir lättare för bakterierna att fästa på den och att fler bakterier får plats jämfört med på ett slätt material tack vare den större ytan, vilket bidrar till en ökad effekttäthet. Dock bör en allt för grov anodyta undvikas, då det även kan gynna påväxter som i längden försämrar en MFC:s effektivitet. Påväxt som till exempel alger producerar syre vilket gör att om de bildas vid anoden kommer förbrukning av substratet att minskas och färre elektroner kan utvinna.

Som nämnts är anodmaterialets ledningsförmåga en viktig faktor som påverkar hur stor effekt en MFC leverar. Hög konduktivitet bidrar till mindre värmeförluster, vilket i sin tur gynnar elektronernas vandring genom anoden till den yttre kretsen [40]. Den största orsaken till dåligt producerande MFC:er, rörande anoden, tros dock vara applicering av ett anodmaterial med låg biokapacitet [40]. Detta tros bero på att bakterierna där inte bildar en lika stabil och tät biofilm, som således medför att färre elektroner genereras.

Anodmaterial är dyra och för att möjliggöra en kommersialisering av MFC-tekniken behöver dess kostnad minimeras så mycket som möjligt [39][40][41]. Det är här materialets kemiska och fysiska hållbarhet kommer in; med en längre livslängd behöver ett utbyte inte ske lika frekvent. Då anoden är placerad i vatten behöver det vara ett material som inte korroderar eller sväller av vattnet. Fördelaktigt är att välja ett material som är hydrofobt och har en grov yta, som i detta fall bidrar till att vattenmolekyler inte kan fästa lika bra [40].

Kolbaserade anodmaterial har många fördelar [40]. Till exempel har de hög konduktivitet, är kemiskt

och fysiskt stabila, har hög biokapacitet och är icke-korrosiva. Dessutom är de relativt billiga, har en grov yta och ofta ett högt yta-till-volym-förhållande. Exempel på kolbaserade material som används, är kol i form av filt och papper, samt grafit i form av plattor, borstar, filter och stavar. Tack vare dess goda egenskaper är kolbaserade anoder idag det vanligaste.

De olika varianterna av kolbaserade anoder som nämnts, har olika för- och nackdelar [41]. Till exempel har stavarna mindre ytarea jämfört med de andra varianterna, vilket är till dess nackdel. En borste har stor area, men det är större risk att det fastnar smuts i den så att effektiviteten sänks. Även en filt har stor yta, tack vare dess porositet, men är istället förhållandevis dyr. Vad det gäller kolpapper, är de enkla att koppla ihop med katoden, men har på grund av sin skörhet sämre hållbarhet i jämförelse med de andra alternativen.

Metallbaserade anoder har den stora fördelen att de har god ledningsförmåga [40]. Utöver denna fördel medför metallen en del nackdelar, som till exempel dess släta yta, dåliga biokompatibilitet och risken för korrosion. Ändå finns det försök där guld, silver och koppar lyckats användas som anod, där koppar visats vara mest lovande. Även titan och rostfritt stål har används som anod i försök med god framgång. Dock når en MFC med metallbaserad anod inte upp i samma effekt som en med ett kolbaserat material.

En teknik som visats vara effektiv för att höja en MFC:s kapacitet, är att ytmodifiera anoden [40]. Exempel på modifieringar kan vara att värma materialet, eller använda olika kemikalier. Värme ger en större ytarea genom att materialet spricker, medan kemisk modifiering gynnar materialets kompatibilitet med bakterierna, samtidigt som ytan kan ökas. Vid kemisk modifiering är det vanligt att använda ammonium eller syra, som leder till att anodens yta får en ökad positiv laddning. Detta är gynnsamt eftersom bakterierna ofta är negativt laddade.

2.6 Katodens egenskaper och material

En MFC:s katod har likt anoden en stor inverkan på hur stor effekttäthet som kan uppnås i cellen. Här läggs störst vikt på dess kapacitet till att reducera elektronacceptatorn. Som nämnts i samband med klassificeringen av en- och tvåkammars-MFC, kan elektronacceptatorn vara olika ämnen, men enligt arbetets avgränsningar läggs fokus på syrgas.

Vanligt är att katoden, likt anoden, består av ett kolbaserat material [41]. Dock har dessa material dålig reduktionskinetik, så vanligt är att katoden behandlas med en katalysator som gynnar reduktionsreaktionens kinetik [42]. Syrgasens reduktionsreaktion har hög reduktionspotential och kräver mycket energi samtidigt som den är irreversibel, vilket medför stora energiförluster. För att främja kinetiken ska därför katalysatorns funktion vara att sänka aktiveringsenergin och överpotentialen för reduktionen. Reduktionsreaktionen av syrgas har presenterats i Ekvation (2) och denna kan ske på tre olika sätt [42]. Ett av dessa sätt inkluderar ett mellansteg där väteperoxid (H_2O_2) bildas. Detta vill undvikas på grund av väteperoxidens korrosivitet, negativa påverkan på katalysatorns aktivitet, samt tendens till att bilda reaktiva radikaler som kan skada övriga delar av cellen. Reaktionsvägen som inkluderar väteperoxid kan undvikas genom val av rätt yta på katalysatorn.

Förutom att katalysatorn bör ha god katalytisk aktivitet och vara något selektiv, bör den även ha egenskaper som inkluderar lång livslängd och god strömledningsförmåga [42]. Likt för anoden är lång hållbarhet viktigt för tillämpningen och god konduktivitet minskar motståndet och därmed även förluster vid transport av elektroner till ytan. Vanligen, då syrgas är elektronacceptator, är att en ädelmetall används som katalysator, varav platina (Pt) i kombination av aktivt kol är vanligast, bland annat tack vare dess låga väteperoxid-generering [42]. Dock medför användandet av metall höga kostnader, och dessutom har Pt låg stabilitet och tenderar att lätt bli förgiftad vilket bidrar till lägre aktivitet och effekttäthet för MFC:n.

För att överkomma de svårigheter som finns med Pt-katalysatorn har mycket forskning gjorts inom området, där det bland annat undersökts olika typer av nanostrukturer av Pt och Pt-baserade multimetaller [42]. Det har framkommit att multimetallerna genererar en större katalytisk effekt, samtidigt som kostnaderna minskar. Dock kvarstår problem med relativt hög kostnad och att Pt kan leda till förgiftning av katalysatorn.

Det har även forskats kring Pt-fria alternativ. Viktigt för att maximera den katalytiska processen är, likt för anoden gällande bakteriernas tillväxt, att uppnå en stor yta så att många syrgasmolekyler kan nå fram [42]. Till exempel har ett alternativ därför blivit att framställa en porös yta med hjälp av 3D-strukturer i form av skum. Exempel på skum som gett bra resultat är ett bestående av nanopartiklar av palladium och koppar, samt ett bestående av aktivt kol och nickel. Ett annat exempel som visat god katalytisk effekt är metalloxider. Framförallt har olika manganoxider varit framgångsrika som katalysatorer, med fördelar som en enkel framställning, lättillgänglighet, billiga samt god katalytisk effekt. Dock uppnår de inte samma effektkonfiguration som vad Pt tillsammans med aktivt kol gör.

2.7 Metoder för att mäta en MFC:s effektivitet

Det finns ett flertal verktyg som används för att karaktärisera hur effektiv en MFC är. I detta avsnitt presenteras några av de verktyg som är vanligt förekommande då MFC:er behandlas.

2.7.1 Ohms lag samt ström- och effekttäthet

Ett första fundamentalt samband rörande en MFC:s prestation är Ohms lag. Med en känd spänning U och extern resistans R kan strömmen I här beräknas enligt

$$I = \frac{U}{R} \quad (10)$$

där spänningen är angiven i enheten volt (V), resistansen i ohm (Ω) och strömmen i ampere (A) [43].

Ett bra redskap för att få ett mått på hur väl elektroner rör sig mellan anoden och katoden i en MFC, är att beräkna strömtätheten [43]. Strömtätheten är antingen definierad som ström per elektrodyta, eller ström per anodkammarevolum. Således gäller

$$I_d = \frac{I}{A_{elektrod}} \quad (11)$$

$$I_d = \frac{I}{V_{kammare}} \quad (12)$$

där I_d är strömtätheten, I är strömmen, $A_{elektrod}$ är elektrodens area och $V_{kammare}$ är volymen av anodkammaren. Ett liknande mått som är användbart för att kunna jämföra olika MFC:ers prestation, är effekttätheten [43]. Denna beräknas på samma sätt som strömtätheten för volymen av anodkammaren, eller arean av någon av elektroderna, fast med effekt istället för ström. Effekten, P , kan beräknas från den spänning cellen genererar tillsammans med strömmen vid en viss yttre resistans enligt

$$P = U \cdot I \quad (13)$$

där spänningen mäts i volt och strömmen i ampere, likt för Ohms lag, får effekten enheten watt (W). Effekttätheten, P_d , för till exempel anodens area A_{anod} beräknas sedan enligt Ekvation (14).

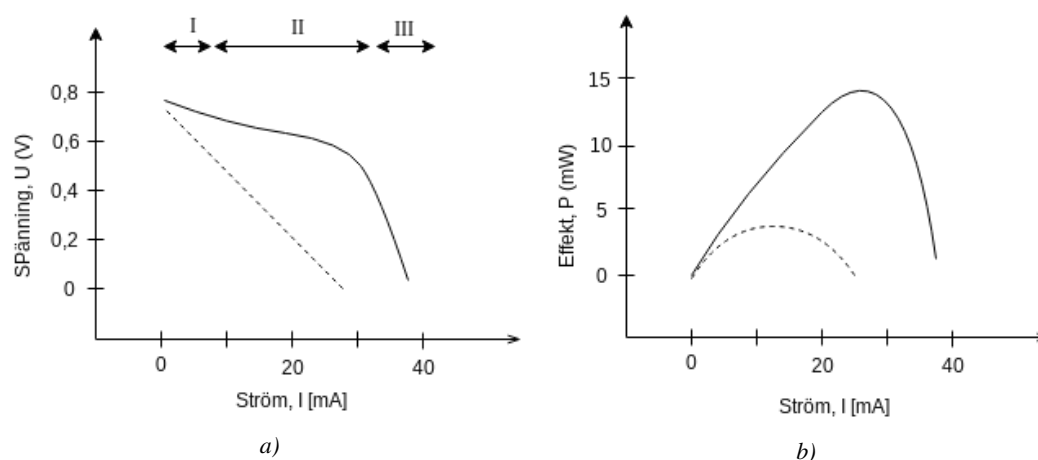
$$P_d = \frac{P}{A_{anod}} \quad (14)$$

För både I_d och P_d kommer index d från engelskans termer *current density* och *power density*.

2.7.2 Polariserings- och effektkurva

Ett annat verktyg som används för att karakterisera och utvärdera en MFC:s prestation, är att konstruera en polariseringskurva för antingen hela cellen, katoden eller anoden [24]. Kurvan visar en funktion för hur spänningen beror av strömmen och erhålls genom att mäta spänningen för flera olika externa resistorer och beräkna strömmen med hjälp av Ohms lag. För att utföra detta kan antingen en potentiostat eller flera olika lösa resistorer användas. En potentiostat är ett verktyg som kan variera resistansen samtidigt som den mäter spänningen. Vid insamling av data till en polariseringskurva bör spänningsförändringen för både en ökande och en sjunkande resistans mätas.

Polariseringskurvan kan delas in i tre olika zoner, I, II och III, som kännetecknas av olika typer av dominerande förluster i kretsen [24], se Figur 3a). Med ökande ström kommer spänningen sjunka. Typiskt i ett initialt skede, då spänningen är hög och strömmen är låg, är en snabb sänkning av spänning under ett kort intervall, område I, för att sedan stanna av och sjunka relativt långsamt, område II, och avslutas med en ytterligare drastiskt sänkning för en utplaning mot noll, område III. I den första zonen är det aktiveringsförluster som dominerar, i den andra är det värmeförluster och i den sista delen förluster från masstransport. Om polariseringskurvan linjäriseras kan MFC:ns inre resistansen fås som linjens lutning [24].



Figur 3: a) En polariserings- och b) en effektkurva där den streckade linjen är en vanlig förekommande trend för MFC:er.

Från polariseringskurvan kan en effektkurva konstrueras [43]. Detta görs genom att räkna om spänningen till effekt enligt Ekvation (13) och plotta mot strömmen. Typiskt har effektkurvan ett maximum som motsvarar en uppskattning av MFC:ns totala inre resistans, se Figur 3b).

2.7.3 Coulombisk effektivitet

Ett annat sätt att mäta prestationen hos en MFC är att titta på den coulombiska effektiviteten (CE). Måttet anger den faktiska andelen elektroner, med enheten coulomb, som frigörs från substratet i jämförelse med den maximala mängden som skulle kunna frigöras om all nedbrytning gick till att producera ström

[24]. En coulomb (C) definieras som mängden elektrisk laddning, Q , som förflyttas genom en ledare per sekund vid ström av 1 A. [44]. Definitionen kan beskrivas enligt Ekvation (15)

$$Q = I \cdot t \quad (15)$$

där t är tiden i sekunder. Laddningen kan också hittas med hjälp av mängden elektroner, n_e , i antal mol och Faradays konstant, F . Sambandet visas i Ekvation (16).

$$Q = F \cdot n_{e^-} \quad (16)$$

Den coulombiska effektiviteten kan enligt definitionen uttryckas som en kvot vilket visas i Ekvation (17)

$$CE = \frac{Q_{verklig}}{Q_{teoretisk}} \quad (17)$$

där $Q_{verklig}$ är mängden elektrisk laddning som faktisk frigörs vid oxidation av substratet, och $Q_{teoretisk}$ är den teoretiska mängden elektronisk laddning som finns tillgängliga för strömproduktionen. Ett annat sätt att beräkna effektiviteten är genom att integrera strömmen som produceras över en viss tid, t_b , enligt

$$CE = \frac{M_{O_2} \int_0^{t_b} Idt}{FbV_{anod}\Delta COD} \quad (18)$$

där M_{O_2} är molmassan av syre (32 g/mol), b är antalet elektroner som frigörs vid reduktionen av en mol syre, V är volymen av vätskan i anodkammaren och ΔCOD är skillnaden i syreförbrukning för den kemiska nedbrytningen. COD beskrivs mer i 3.2. Den coulombiska effektiviteten kan även tolkas som ett mått på hur mycket av substratet som bakterierna förbrukar för att generera ström [7]. Den kan alltså användas för att visa verkningsgraden av en MFC. Ju högre värde på CE, desto högre effektivitet har MFC:n.

3 Tillämpning av den mikrobiella bränslecellen inom vattenrening

För att realisera en tillämpning av MFC-baserade sensorer inom vattenreningen är det essentiellt att förstå teknikens potential, hur den skulle kunna appliceras, utformas och operera. Det är dock även viktigt att ha en vetskap om reningsprocesserna inom ett avloppsreningsverk, dagens provtagningsmetodik av BOD och utsläppskrav rörande föroreningen. Detta för att förstå varför utvecklandet av ytterligare en metod kan anses nödvändig. Genom att stegvis förklara avloppsreningens mest fundamentala delar, vad BOD är, dess betydelse, beskriva utförandet av dagens metoder och dess krav hoppas insikten av en MFC-baserad sensors betydelse framhållas i detta kapitel. Alla dessa steg förenas sedan i en analys hur sensorn fungerar mer ingående, dess utformning, vad som gjorts under tidigare år samt dess utmaningar. Med hjälp av denna redogörelse från nutid till framtid hoppas fördelarna belysas med teknik, samt dess potential att bidra till att realisera det globala målet gällande vattenkvalité och sanitet på jorden [5].

3.1 Den grundläggande principen för avloppsrening

Årligen renar Sveriges reningsverk 1,5 miljarder m³ avloppsvatten med ursprung från varierande källor [45]. Det är i huvudsak tre stycken källor som ger upphov till avloppsvatten:

- Spillvattnen, kommer från industri, hushåll och andra typer av verksamheter.
- Dagvatten, avrinning av regn och smältvatten från till exempel gator och vägar.
- Dräneringsvatten, vatten som uppkommer då marken runt anläggningar och byggnader avvattnas genom exempelvis rörledningar eller diken för att motverka fuktskador.

Avloppsvattnet innehåller på grund av dess breda upptagning många olika sorters föroreningar [46]. Kombinationen av vattnen gör att reningsverket måste kunna rena olika typer av föroreningar för att därefter kunna återföra vattnet med god kvalitet till naturen. Innan vattnet är godkänt att föras tillbaka till naturen är det i huvudsak fyra typer av föroreningar som reningsverk ska ha reducerat:

- Större partiklar, fasta föremål och dylikt.
- Fosfor och kväve.
- Organiskt nedbrytbart material.
- Bakterier, virus och parasiter.

Dessa föroreningar avlägsnas genom olika reningssteg; mekanisk rening, biologisk rening och kemisk rening [46].

Den mekaniska reningen tar bort större partiklar och fasta föremål som exempelvis bomullstopps, toalettpapper och sand samt även primärslam [47]. Partiklarna och föremålen silas eller sedimenteras bort. Sedimenteringen sker i tankar med en anpassad flödes hastighet så att större organiska partiklar sedimenteras men inte de lättare. Primärslamet som innehåller lättare organiska partiklar avlägsnas istället i försedimenteringstankar med en lägre flödes hastighet och en längre uppehållstid än i tidigare steg.

Den biologiska reningens uppgift är att avlägsna lösta organiska ämnen samt kväve ur avloppsvattnet [47]. De organiska ämnena oxideras under denna process av mikroorganismer, som finns naturligt i avloppsvattnet, och tillfört syre, där produkten av reaktionen blir koldioxid och vatten. Processen för att ta bort lösta organiska ämnen ur vattnet skiljer sig från reningen av kväve. Under kväverening växlar istället syreförhållandena mellan syrerika och syrefattiga, för att tillgodose olika organismer. Detta resulterar i att kvävet omvandlas till kvävgas.

Vid kemisk rening är huvuduppgiften att avlägsna mindre partiklar och fosfor från avloppsvattnet [47].

Detta görs med hjälp av kemikalier som tillsätts i avloppsvattnet och resulterar i att mindre partiklar klumpas ihop för att sedan bilda större aggregat. Detta kallas koagulering respektive flockulering. Därefter avlägsnas de större aggregaten i speciella sedimenteringstankar med låg flödes hastighet på det genomgående vattnet. Fosfor tas bort i processen genom att det i stor utsträckning är bundet till de små partiklarna som aggregerar och avlägsnas under sedimenteringen.

Reningsverken har utsläppskrav som måste följas med avseende på föroreningar [48]. För att säkerställa att föroreningarna har reducerats i avloppsvattnet utförs provtagningar på det ingående och utgående vattnet från reningsverket, samt även på vatten som vid behov bräddats. Om för höga halter av organiska föroreningar släpps ut i naturen, leder det till bland annat övergödning som senare kan resultera i syrebrist i vattendraget [49].

3.2 BOD; karaktärisering, historia och påverkan

BOD redovisar ett värde på mängden syre som krävs för att mikroorganismer i vattnet ska oxidera det organiska materialet som bryts ned vid biologisk behandling. Utifrån det kända syrebehovet vid oxidationen kan mängden av dessa ämnen bestämmas i vattnet, det vill säga inte det totala innehållet av organiska ämnen utan bara det biologiskt nedbrytbara. De organiska ämnen som fortfarande finns kvar i vattnet efter reaktionen behöver oxideras med hjälp av kemikalier istället för mikroorganismer. Den kemiska oxidationen resulterar i mängden syre som krävs för att oxidera det kvarstående organiska materialet, och därmed kan det kemiskt organiska innehållet bestämmas i vattnet. Den kemiska syreförbrukningen för att oxidera de organiska ämnena benämns COD (från engelskans chemical oxygen demand).

Kontroller av BOD har utförts sedan början av 1900-talet, där den första metoden utvecklades i England [12]. Anledningen till att engelsmännen utvecklade en metod var på grund av att kunna undersöka hur stor kvantitet av syret i en flod som förbrukades när orenat avloppsvatten släpptes ut i den. När avloppsvatten med högt organiskt innehåll släpps ut i vattendrag resulterar det i övergödning och att koncentrationen löst syre i vattnet sjunker [49]. En för stor minskning av löst syre i vattnet får till följd att vattendraget blir syrefattigt, vilket medför att levande djur och växter dör [50].

Idag, tillskillnad mot i början av 1900-talet, ställs det krav på reningsverken hur hög halt BOD vattnet får innehålla efter reningsprocessen, innan det släpps ut i vattendragen [48][50]. Kontroller av det vatten som återförs hjälper till att förhindra de ovan nämnda miljöproblemen. Det är även viktigt att dricksvatten inte har för höga BOD-värden, då det kan medföra sjukdomar, samt att klor som desinficerar dricksvattnet konsumeras snabbare [50]. Om klor konsumeras för snabbt medför det att dricksvattnet förlorar sitt skydd mot bakterier och virus. Höga halter av organiskt material i samband med klor kan dessutom skapa cancerogena ämnen.

Ett klassificerat rent vatten ska ha ett BOD-värde lika med noll medan exempelvis ett vattenprov från ett avlopp kommer ha ett högt BOD-värde [51]. Det höga BOD-värdet är en följd av att avloppsvatten innehåller mycket organiskt material som kan brytas ner genom biologisk behandling. På grund av det faktum att det är mikroorganismer som används, kan avvikelser i BOD-mätningar förekomma [52]. Vattnet kan ibland innehålla bakteriedödande kemikalier som resulterar i att mikroorganismerna dör och försämrar oxidationen av organiska ämnen [51]. Därav kommer BOD-värdet vara lågt och indikera på att vattnet är rent från organiskt material, eftersom inget syre har förbrukats i processen, vilket inte överensstämmer med vattnets faktiska innehåll.

3.2.1 Standardiserad metoden för provtagning av BOD

Den standardiserade metoden som idag används vid mätningar av BOD innebär att ett prov innehållande avloppsvatten försluts under en bestämd tid [53]. Mätningar utförs för att bestämma mängden syre provet innehåller före respektive efter provtiden. Förbrukningen av den initiala mängden löst syre i vattnet då provtiden är slut motsvarar den mängd syre som krävs för den organiska nedbrytningen. Utförandet sker i laboratorium där det används en 300 ml flaska som fylls med det avloppsvattnet som ska kontrolleras. Mängden avloppsvatten som tillförs flaskan kan variera och beror av hur stor koncentrationen av organiskt material som antas finnas i avloppsvattnet.

Vattenprovet mäts upp för att den exakta mängd avloppsvatten ska vara känd. Vid ett underskott av mikroorganismer i avloppsvattnet tillsätts mer till provet för att de organiska näringsämnen i vattnet ska oxideras [53]. Vanligtvis behövs det inte tillsättas mikroorganismer till obehandlat eller icke klorerat avloppsvatten, då det antas finnas tillräckligt bestånd naturligt i avloppsvattnet.

Efter detta steg tillsätts ett maximalt syresatt vatten till provet samt en buffert av fosfat och icke-organiska näringsämnen [53]. Syreinnehållet ska vara tillräckligt för att oxidationen ska ske. Det är väsentligt att mängden syre i provet är känt från början, då det som tidigare nämnts är förändringen i syreinhåll som mäts vid provningen. Då vattnet är maximalt syresatt är det viktigt att koncentrationen organiskt material inte kräver en större mängd syre under provtiden än vad som finns tillgängligt i flaskan. Om en större syrekapacitet skulle krävas resulterar det i att syret blir begränsande för provet och BOD-värdet inte blir tillförlitligt. Flaskan inkuberas sedan under provtiden i en konstant temperatur på 20°C.

Olika provtider för BOD-mätningar gäller beroende på vilket regelverk som efterföljs. Den provtid som generellt används internationellt är BOD₅, vilket innebär att provet är förslutet i fem dagar innan syreinhållet mäts [12]. Sveriges provtid skiljer sig dock från denna fem dagars tidsrymd, då den ansågs vara ett försvårande av provtagandet. Beslutet om att ändra tidsperioden grundades i en önskan om att kunna ta in prov alla vardagar utan att slutmätningen hamnar på en helgdag. Det gjorde att Sverige under 1960-talet införde BOD₇, det vill säga en sju dagars förslutning innan syreinhållet mäts.

En förlängd inkuberingstid orsakar emellertid att oönskade reaktioner kan förbruka det syre som finns i provet [12]. Den icke önskvärda oxidationen är att ammonium oxideras till nitrit och därefter nitrat, vilket också är syreförbrukande reaktioner. Att syre förbrukas av denna reaktion medför att analysen av provet tyder på att en större mängd organiskt material oxiderats, vilket inte överensstämmer med sanningen. Den icke önskvärda oxidationen motverkas genom tillsats av kemikalier.

3.2.2 Krav på BOD₇

Som tidigare nämnts föreligger det krav på reningsverken angående BOD₇. De föreskrifter som reningsverken måste förhålla sig till är framtagna av Naturvårdsverket [48]. Bestämmelserna innefattar begränsningsvärden, vilket är värden som aldrig får överskridas, samt inom vilka tidsintervall provtagningar ska utföras. Det tillåtna värdet av BOD₇ i behandlat vatten som ska återföras till naturen beror av olika faktorer. En faktor är i vilken typ av vattendrag som det behandlade vattnet ska släppas ut och en annan är hur många personekvivalenter (pe) som är anslutna till reningsverket. Pe är en måttenhet som brukas för att uppskatta mängden förorening som exempelvis ger upphov till BOD₇ i avloppsvatten. En person genererar i genomsnitt en pe vilket motsvarar 70 gram BOD₇/dygn [48][54].

Det finns tre stycken olika alternativ av begränsningsvärden att förhålla sig till [48]. Av dessa tre är det upp till reningsverken att avgöra vilket begränsningsvärde som ska efterföljas. Begränsningsvärdena som anges i Naturvårdsverkets författningssamling beträffande BOD₇ beskriver:

- Högsta möjliga koncentration som årsmedel.
- Högsta koncentration per mättillfälle.
- Minsta procentuella reduktion per mättillfälle.

Reningsverken ska utföra regelbundna kontroller av begränsningsvärdet [48]. Kontrollerna utförs med den standardiserade provtagningsmetoden för BOD₇, där representativa mätningar ska kunna genomföras på bräddningsvatten, obehandlat och behandlat vatten. Det är därför viktigt att reningsverkets anläggning har en utformning som möjliggör dessa provtagningar.

Vid kontrollen av det behandlade vattnet ska provtagningen genomföras innan vattnet blivit desinficerat, det vill säga om desinficering är ett av stegen i reningsprocessen [48]. Hur regelbundet kontrollen ska utföras beror på hur många pe som är anslutna till reningsverket. Om ett reningsverk hanterar ett större antal pe innebär det att en frekventare provtagning krävs. Antalet prover som behöver genomföras kan skilja sig från veckovisa till årliga antal. Det är även en skillnad i provtagningsfrekvensen om det är ingående eller utgående vatten som ska kontrolleras.

3.2.3 Flaskhalsar vid provtagning av BOD₇ med standardiserade metoden

Som tidigare nämnts utförs den standardiserade metoden genom en mätning av hur mycket syre som har förbrukats under inkuberingstiden. Metoden innefattar former av begränsningar och nackdelar som redovisas nedan [52].

- Provresultatet av den standardiserade metoden kan variera utifrån olika aspekter, och således är metoden inte fullständigt tillförlitlig. Certifierade laboratorier kan vid olika provtagningstillfällen erhålla en differens på 20 procent på dess egna provresultat och en större variation kan påträffas vid jämförelse med andra laboratorier. Anledningen till att provresultat kan skiljas åt i denna utsträckning är bland annat på grund av egenskaperna och mängden av mikroorganismer i provet.
- Metoden kräver en ordentlig laborationslokal med särskilda krav på utformning och utrustning.
- Metoden är tidskrävande. En mer tidseffektiv process skulle medföra att åtgärder snabbare kan vidtas och att källan till problemet snabbare kan identifieras.
- Prov genomförda med den standardiserade metoden begränsas av mängden syre. Om mängden syre i provet inte uppnår den kvantitet som krävs kommer provet generera ett felaktigt resultat [53].

3.3 En mikrobiell bränslecells potential att sensorappliceras

Applikationen av MFC som biosensor är ett av de mest studerade områdena inom MFC-forskning, där bland annat BOD-mätningar läggs stort fokus på [4]. Vad som är önskvärt med forskningen är att skapa en biosensor som är portabel, reproducerbar och som tar fram snabba och noggranna resultat av de parametrar som mäts. Första biosensorn utformad som en MFC utvecklades 1977 av Karube et al., där ett värde på BOD kunde framställas på 30–40 minuter [4]. Sedan dess har åtskilliga undersökningar och utvecklingar gjorts i försök att optimera tekniken till sin fulla potential.

Att finna en metod som kan mäta ett värde på BOD under en kortare tid skulle vara väsentligt, i synnerhet för att ge reningsverk en möjlighet att agera efter tillfälliga innehåll, istället för veckovisa gamla värden. Här föreslår många forskare att MFC:er är ett potentiellt svar på frågan [4].

Fördelen med att använda en MFC som biosensor jämfört med tidigare framställda sensorer, är främst den långa hållbarhetstiden och det minimala underhållet som krävs, mestadels tack vare att biofilmen

inte behöver bytas ut i samma utsträckning som andra igenkänningsselement [4][55]. Detta kan förklaras genom att den mikrobiella populationen är reproducerbar, alltså att de har en självregenererande förmåga, samt att de har en självstartande egenskap, vilket även klassar en MFC som en fristående biosensor. En MFC är dessutom oftast ett mer ekonomiskt alternativ, där dyra beståndsdelar som behöver tillsättas i övriga biosensorer ersätts av redan befintliga delar i en MFC, såsom en strömomvandlare, vilket i en MFC ersätts av elektroderna [4][55].

Anledningen till att en MFC hade fungerat som sensor är att mängden organiskt ämne tillsatt anoden kan tolkas genom ett spänningsutfall som följd av de genererade elektronerna [4][55]. Detta då koncentrationen av det organiska materialet har visats vara proportionell mot de elektroner som frigörs. Då MFC:n är kopplad till en konstant resistans kan således utsignalen ses motsvara ett värde på BOD. Metoden genererar snabbt och enkelt ett BOD-värde, utan användandet av dyra prover [4].

3.3.1 Sensorappliceringens utveckling

De första MFC:erna avsedda som sensorer konstruerades med rena bakteriekulturer, vilket har visats resultera i felaktiga utslag, eftersom de i många fall inte kan oxidera allt organiskt material i provet [56]. Detta problem eliminerades 1993 då blandkulturer började användas, och 1999 rapporterades den första MFC:n driven på avloppsvatten med aktivt slam som kolkälla. Denna MFC uppehölls med stabil strömstyrka och spänning proportionell mot avloppsvattnets BOD-innehåll i 5 år, och kan ses som början till en MFC:s potential som BOD-sensor inom avloppsvattenrening.

Vad som sedan drivit tekniken framåt är en rad olika undersökningar och iakttagelser, som bland annat innefattar appliceringen av en potentiostat. En potentiostat kan användas för att tillföra en extern ström till systemet, i syfte att motverka de inre resistansförlusternas påverkan på systemets effektivitet, samt bibehålla en konstant cellpotential över anoden [55][57]. Således optimeras genereringen och överföringshastigheten av elektronerna, och ett noggrannare utfall av en BOD-mätning kan väntas, där ingen alstrad ström går till förlust. Viktigt har dock visats vara att endast en liten spänning får tillsättas, där för höga spänningar har en potential att starta oönskade reaktioner i systemet, såsom vattenoxidation vid anoden.

Ett flertal undersökningar har gjorts kring användandet av externa mediatorer i en MFC, inte minst vid sensorapplicering [4]. Mediatorer som har som syfte att transportera elektroner från cellerna till elektroderna har i många fall visats vara en gynnsam tillsatts för en förstärkt utsignal, men har också visats förkorta en MFC:s levnadslängd eftersom de är giftiga för vissa mikroorganismer [56]. Externa mediatorer är dock inget måste, då de även kan ersättas av interna som självskapas i biofilmen. Således rekommenderar flertalet studier att undvika tillsatts av externa mediatorer, speciellt vid praktiska applikationer [4].

3.3.2 Sensorappliceringens utmaningar

Den främsta nyckeln till en noggrann avkänning hos en MFC är en stabil och konsekvent biofilm, med en mikrobiell population som är resistent mot omgivningsfluktationer såsom pH, temperatur, konduktivitet, elektronacceptorer och toxiska ämnen vilka alla kan påverka mätningen [4]. Dessa faktorer är speciellt aktuella i realtidsmätning av avloppsvatten, vilket gör denna typ av mätning speciellt utmanande.

Vattnet inom avloppsreningsverk innehåller en stor mängd oönskade ämnen och partiklar som på olika sätt försämrar resultatet vid en sensorapplicering. Exempel på detta är toxiska ämnen, som med en ökad grad toxicitet korrelerar med en minskad strömtäthet i systemet [55]. Detta beror på att toxiska ämnen förhindrar EAB:ernas aktivitet och tillväxt, som ett högt BOD-innehåll främjar. Ett prov med högt

BOD-innehåll som även innehåller en stor mängd toxiska ämnen kan således resultera i ett oförändrat utfall, där en ökad genererad spänning egentligen hade förväntats.

Vidare kan MFC:ns alkalinitet påverka resultatet. En MFC med för låg alkalinitet föreligger större risk att anta för låga pH-värden, vilket försämrar bakteriernas funktion och utfallet blir då snarare beroende av alkaliniteten än BOD-koncentrationen [57]. För att minimera risken att pH-värdet sänks för mycket i en MFC, kan en buffert tillsättas, vars funktion just är att minska systemets känslighet mot pH-sänkningar [4].

Problem avseende pH-värdet kan även uppstå om ett membran används i cellen. Membran som annars har till syfte att gynna en protondiffusion, samt hindra syre från att diffundera till anoden, och substrat till katoden, kan här orsaka en pH-delning där vätskan på respektive sida om membranet antar olika egenskaper [4]. Flertalet studier syftar därför på att MFC:er utan membran vid sensorapplikering är att föredra, men kan bli problematiskt att frångå i celler av mindre storlek med anoden i närhet till luft.

När undersökning av MFC:ers respons på prover med olika BOD-koncentrationer gjorts, framkom det att en korrelation hos en MFC utan extern hjälp, av exempelvis en potentiostat, är stabil vid koncentrationer upp till 100 mg/l, varvid en mättnad nås [56]. Vid applicering inom avloppsvattenrening är detta en gräns som kan bli problematisk. Svenska reningsverk har utsläppskrav på 30 mg/l [48], men inflödet innehåller ofta avsevärt högre koncentrationer. En MFC med dessa egenskaper kan alltså ha potential att appliceras i slutet av reningsprocessen, men saknar full potential för användning i ett tidigt skede där koncentrationen är för hög.

3.3.3 Framgångsrika metoder för att optimera sensorapplikeringen

Tillvägagångssätt som visats vara framgångsrika för att effektivisera MFC:er för sensorapplikering ligger i stor del i konstruktionsvalet. Effektiviteten beror, som tidigare nämnts, på både anodens och katodens utformning, så förbättringar kan med fördel appliceras på båda dessa för att öka spänningsutvinningen [55].

En metod som visats vara speciellt effektiv för att öka sensitiviteten hos en MFC, och på så sätt ge noggrannare avkänning, är att applicera en så kallad *flow-through* anod. Här förs provet in i anodkammaren som därifrån flödar igenom elektroden, vilket kan appliceras istället för en *flow-by* anod, där provet flödar parallellt med anoden [55][58]. Detta underlättar protonernas diffusion samt mikroorganismernas tillgänglighet till substrat, och har visats kunna öka sensitiviteten upp till 40 gånger. Men, här kan andra problem uppkomma som behöver hanteras, till exempel tryckfall, som kan uppstå på grund av den höga porositeten som krävs hos elektroden [59].

Vid försök att minimera responstiden vid en MFC:s sensorapplikering har en förstoring av anodens yta visats vara en god lösning [56]. Volymen hos anodkammaren har dock visats vara mest optimal för responstiden när den varit så liten som möjligt. Således behövs en så stor elektrod omgiven av så lite volym som möjligt för att maximera responsen hos anoden [55].

Viktigt att ha i åtanke är att prover med högre BOD-koncentrationer kräver en lägre matningshastighet och längre reaktionstid för att generera ett noggrannare utfall [56]. Eftersom snabba responser är vad som oftast vill uppnås vid sensorapplikering, kan *model-fitting* användas när ett linjärt samband uppenbarats av de lägre koncentrationerna [56]. På så sätt möjliggörs att högre koncentrationers utfall kan approximeras, men till priset av en avtagen noggrannhet. För att istället höja detekteringssäkerheten vid BOD-avkänning, har studier visat att en parallellkoppling av olika MFC:er varit effektivt [55]. Detta är också en uppsättning som visats vara speciellt optimal för just vattenkvalitetsövervakning.

4 Hållbarhetsaspekter hos den mikrobiella bränslecellens tillämpningar som BOD-sensor

En ny teknik kan medföra ändringar i samhället och påverka människor och miljö både på ett positivt och ett negativt sätt. Det är därför viktigt att ifrågasätta vilka eventuella konsekvenser MFC-tekniken kan medföra ur en hållbarhetssynpunkt. Tre områden som hållbarhet kan delas upp i är sociala, ekonomiska och ekologiska aspekter. Det är dessa aspekter som kommer behandlas i kapitlet.

Den uppenbara nyttan av MFC är att det är ett alternativ som biobaserad energikälla, vilket kan bidra till en minskad användning av fossila bränslen. Denna aspekt kommer dock inte att diskuteras då uppskalning och effektivisering fortfarande är något som kräver mer forskning och försök. I detta kapitel kommer användningen av MFC som biosensor för BOD-mätning att ligga i fokus eftersom det har visats att tekniken kan tillämpas kommersiellt i denna form samt för att det pågår stor forskning om detta [60].

4.1 Sociala aspekter

Som tidigare nämnt är tidsbesparing en av de främsta fördelarna med MFC-baserade biosensorer. Att ersätta den traditionella mätningen av BOD med en onlinesensor som mäter i realtid medför färre arbetsuppgifter, och därmed krävs mindre arbetskraft, då stegen såsom syretillsättning och inkubering kan uteslutas. Användning av biosensorer kan därför ses som en robotisering av arbetet. Det kan diskuteras om automatiseringen leder till ett minskat behov av arbetare och därmed ha negativ påverkan på arbetsmarknaden, men enligt en rapport från World Economic Forum (WEF) kan automatiseringen skapa betydligt fler nya typer av jobb [61].

För att den framtida efterfrågan på arbetskraft ska ha en positiv påverkan krävs det att samhället förser arbetare med utbildning, samt ser över sin näringspolitik och arbetsmarknadspolitik för att främja deras kompetenser [62]. Om detta inte uppfylls kan automatiseringen istället leda till en ökad kompetenslucka, ojämlikhet och polarisering inom arbetsmarknaden [63]. Förändringen på grund av automatisering tros även påverka anställningsformen inom företagen. Andel heltidsanställda kommer nämligen att minska och högre krav på kvalifikation kommer ställas [62].

Den relativt låga kostnaden och möjligheten till mätning på plats med en portabel MFC-baserad BOD-sensor, kan dessutom vara en stor fördel för många U-länder, där vattenkvalitet är en viktig fråga [64]. Rent dricksvatten och bättre renhållning skulle öka befolkningens välbefinnande och livskvalitet markant. En *in-situ*-sensor bör kunna sända signaler trådlöst, och dess elbehov kan försörjas med den självgenererade elektriciteten från MFC:n. Denna fördel leder till att utrustningen kan användas i områden som är drabbade av energibrist. Detta leder också till en ökad tillgänglighet och möjlighet till en bättre mätning av vattnets kvalitet i perifera områden.

4.2 Ekonomiska aspekter

MFC-baserade biosensorer använder ett enkelt instrument, såsom en amperemeter, för att mäta flödet av elektroner. Detta är en skillnad från den konventionella metoden som kräver mycket utrustning. Den traditionella BOD-mätning kräver, som tidigare nämnts, en strömomvandlare och dyra avkännare, samt andra kostnader som uppkommer från konstruktion och underhåll av processen [4]. Dessutom behöver syrgas lösas i avloppsprov, vilket likaså bidrar till en ökad driftkostnad eftersom ren syrgas behöver köpas in. Användandet av en MFC-baserad biosensor medför att dessa kostnader kan uteslutas. Den lägre kostnaden beror även på att de flesta komponenter består av kolbaserad material och plast, till exempel

plexiglas, som är billiga att tillverka. Genom miniaturisering och 3D-printing kan kostnaden dessutom minskas ytterligare [64].

Trots den billiga materialtillverkningen för sensorerna, behöver katoden dopas med en dyr metall, som till exempel Pt, för att förbättra reduktionsreaktionens kinetik. Det behövs också vanligtvis en CEM såsom Nafion eller Ultrex, vilka är dyra och svåråtkomliga [64]. Kostnaden och tillgängligheten för tekniken skulle därför inte vara optimal om användningen syftas till U-länder. En membranlös MFC-baserad biosensor kan vara en lovande lösning, men det krävs i nuläget fortsatt vidareutveckling av sådana system [4].

Stabilitet och tillförlitlighet av sensorerna är också en fråga värd att diskuteras. Om sensorn skulle användas i ett reningsverk kan en rad olika faktorer påverka resultatet, såsom exempelvis pH-värdet i avloppet samt konduktiviteten och närvaron av toxiska inhibitorer som ändrar strukturen av biofilmen i anoden. På grund av detta kan storskaliga *in-situ* mätningar vara opraktiska och opålitliga vilket kan göra att det inte är lönsamt [4].

4.3 Ekologiska aspekter

Att kunna mäta BOD med hjälp av en MFC minskar, som nämnts i samband med de ekonomiska aspekterna, behovet av material och elektroniska komponenter, till exempel inkubatorer. Däremot är många komponenter i MFC:n fossilbaserade och tillverkningsprocessen av dessa material bidrar till global uppvärmning. Utvinning av metaller i berggrunden kan dessutom orsaka föroreningar och försurning i mark och grundvatten.

Plasten och metallen som används i en bärbar BOD-sensor kan hamna i miljön om det saknas god avfallshantering. Detta har stor betydelse särskilt för länder där avfallet inte tas hand om, eller där det inte finns möjlighet till återvinning. Ackumulation av plast och ökad koncentration av metaller i naturen har också en negativ påverkan på organismer och ekosystem.

Om BOD-sensorer blir mer utvecklade och kan börja användas i större skala, kommer BOD-mätningar kunna bli snabbare och säkrare, vilket leder till att snabbare åtgärder kan vidtas och därmed kan miljöpåverkan på vattenlevande organismer på grund av syrebrist minska.

5 Utförande av konstruktion och test med mikrobiella bränsleceller

Totalt byggdes tre MFC:er, som enligt projektets avgränsningar utformades som enkammars-MFC:er, med syrgas som elektronacceptator och utan pump. Alla tre utvärderades med olika verktyg och användes för att undersöka om en tillräcklig ström kunde produceras för att driva en eldriven leksak. Utöver detta användes de även för att testa MFC:ers potential till att användas som BOD-sensor inom vattenrening.

I detta avsnitt beskrivs det hur det resonerades när MFC:erna planerades, hur de byggdes och hur de användes i tester.

5.1 Resonemang inför konstruktion av mikrobiella bränsleceller

Då MFC:erna började planeras önskades det att MFC:n skulle byggas med en enkel behållare. Förslagen som lades fram var en hink eller en blomlåda. För- och nackdelar av båda behållarna vägdes mot varandra och en hink valdes, bland annat då dess runda utformning minskar risken för döda zoner där näringsämnen inte cirkulerar. Det beslutades även att inkludera en slang med hål i botten av hinken till att förse bakterierna med näringsämne, för att ytterligare minska risken för döda zoner. Ytterligare för- och nackdelar som diskuterades var att en fyrkantig utformning skulle bidra till en lättare form att jobba med vid konstruktion av anod och katod, men att det skulle krävas en ovanligt djup blomlåda för att kunna fördröja diffusionen av syre till botten, och därmed hålla det anaerobt vid anoden.

I hinken var tanken att ha anoden på botten och katoden vid vattenytan för att möjliggöra samtidig kontakt med luft och vatten och därmed få en sluten krets. Problematiken med att placera katoden vid vattenytan var ett behov att ta hänsyn till förändringar i vattennivå på grund av avdunstning för att garantera bibehållandet av katodens kontakt med både syre och vatten. Lösningen blev att låta katoden flyta på vattenytan, vilket föreslogs uppnås genom att använda pingisbollar fastbundna till katodplattan. Senare utvecklades dock idén till att använda provrör istället, för att underlätta fästningen till katoden.

Idéer på tillvägagångssätt för att uppnå ett anaerobt förhållande vid anoden var att täcka över anoden. Förslagen som kom upp var att använda antingen sand eller slam. Det valdes att använda sand på grund av dess lättillgänglighet. Med detta som bakgrund blev ett fungerande slangsystem för tillförsel av näring till bakterierna under anoden av större vikt.

När det gäller anoden och katoden beslutades det att använda stålnät för att stabilisera och underlätta dess form och hållbarhet. Dessutom var en tanke att stålnätet skulle bidra till en bättre ledningsförmåga hos materialet och möjliggöra fästpunkter till de ledare som skulle sammanbinda anod och katod.

5.2 Resonemang kring materialval

När det kommer till materialval för elektroderna diskuterades det fram att en kolbaserad anod och katod är lämplig. Detta på grund av de kolbaserade materialens höga konduktivitet, dess lättillgänglighet och att de dessutom är relativt billiga.

Som anod-material valdes en tjock, porös kolfiberfilt. Fördelarna med denna ansågs vara den stora tillgängliga arean för bakterierna, som dessutom var grov och därmed är fördelaktig för bildningen av biofilm. Som katod stod valet mellan att använda ett mjukt, tygliknande kolfibernet, eller ett kolpapper. Det beslutades att ta kolfibernet då det är mindre skört än kolpappret och därmed mer motståndskraftigt.

Katoden valdes att förses med en katalysator för att förbättra kinetiken för reduktionen av syre. Den

aktuella katalysatorn var kolpulver löst i polytetrafluoreten (PTFE), mer kommersiellt känd som teflon. Fördelarna med kolpulver som katalysator är dess höga konduktivitet och kemiska stabilitet, samt dess låga kostnad. PTFE:s funktion är att agera som bindemedel till kolpulvret. Dess lämplighet till detta motiveras med att det först smälter vid 350 °C, vilket gör det motståndskraftigt, och dessutom bidrar det till att hindra vattenläckage genom katoden tack vare dess hydrofoba egenskaper.

5.3 Metod för konstruktion av de mikrobiella bränslecellerna

Alla de tre MFC:er som byggdes utgick från likadana genomskinliga, fem liters plasthinkar. Framöver benämns de tre olika som MFC1, MFC2 och MFC3, där MFC1 var den första som byggdes och MFC2 samt MFC3 båda byggdes vid ett senare tillfälle.

De tre olika MFC:erna hade en del olikheter. Deras anodmaterial var olika tjocka och slangsystem under anoden var av två karaktärer. Dessutom hade MFC2 endast stål nät på ena sidan av katoden, och MFC3 kläddes med aluminiumfolie för att minska inläppet av ljus. I Tabell 1 visas skillnaderna mellan de tre MFC:erna.

Tabell 1: De tre MFC:ernas konstruktionsvariationer.

	MFC1	MFC2	MFC3
Anod	Tjock kolfiberfilt	Tjock kolfiberfilt	Tunnare kolfiberfilt
Katod	Kolfibernät	Kolfibernät	Kolfibernät
Stål nät	Båda sidorna på både anod och katod	Båda sidorna på anod och övre sidan katod	Båda sidorna på både anod och katod
Slangsystem	Spiralformat	S-format	S-format

5.3.1 Tillverkning av anod

Till anoden klipptes två plattor av stål nät ut. Till MFC1 var skivorna cirkulära med 14,5 cm i diameter och till MFC2 och MFC3 gjordes de lite mindre och mer likt kvadrater med rundade hörn och sidor på 13,5 cm för att förenkla utförandet. Slangen som skulle fördela näringslösningen till bakterierna under anoden förseddes med jämnt fördelade hål och fästes med hjälp av metalltråd (MFC1) eller små buntband (MFC2 och MFC3) på den ena stål nät plattan. På MFC1 fästes den i ett spiralmönster medan den på MFC2 och MFC3 fästes i ett S-mönster. För alla tre lämnades en marginal på slangen för att möjliggöra att den skulle nå upp till hinkens överkant. Slangen som gick åt till den S-formade anordningen mättes och dess volym beräknades till 6,5 ml.

När slangen var fast klipptes kolfiberfilt anpassad till hinkens storlek och form till. Viktigt var att filten inte blev för liten då detta skulle leda till oönskade effekter såsom inläpp av sand under anoden, utsläpp av substrat och aeroba förhållanden. Sedan placerades den på andra sidan av stål nät skivan som hade slangen fastbunden på sig. Den andra stål nät skivan lades på kolfiberfilten och de tre delarna syddes ihop med en metalltråd vars ände lämnades med en längd av cirka 30 cm. Undersidan av anoden för MFC1 med det spiralformade slangsystemet visas i Figur 4a) och undersidan för MFC2 och MFC3 visas i Figur 4b).



a) Spiralformade slangsystemet till MFC1.

b) S-formade slangsystemet till MFC2 och MFC3.

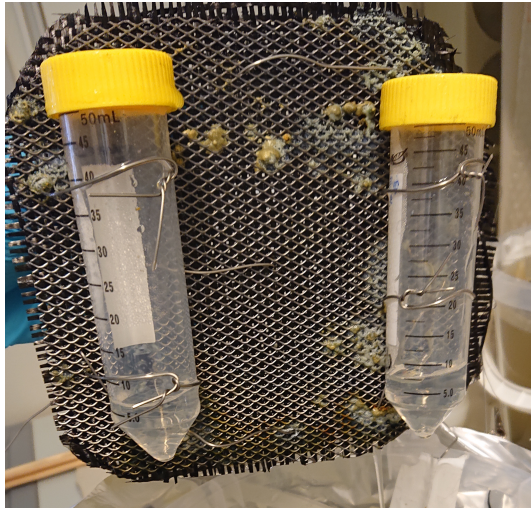
Figur 4: De två olika slanganordningarna på anodens undersida.

5.3.2 Tillverkning av katod

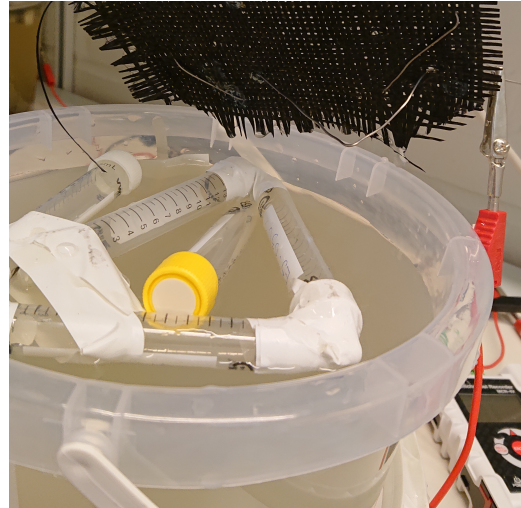
Likt till anoden klipptes det ut plattor av stål nät till katoden, till MFC1 och MFC2 gjordes två var medan det till MFC3 endast gjordes en. De till MFC1 gjordes runda med 15 cm i diameter och de till MFC2 och MFC3 gjordes till kvadrater med 15 cm långa sidor och rundade hörn. Stålnäten, en för varje MFC, ritades av på ett kolfibernet och detta penslades sedan med katalysator.

Katalysatorn förbereddes genom att 100 mg kolpulver, 100 mg PTFE och 5 ml etanol blandades i ett provrör. Det bereddes en omgång för MFC1 och en omgång för MFC2 och MFC3 tillsammans. Efter att kolfibernet penslats med detta, placerades de i en ugn med en temperatur på 340 °C i 20 minuter. Efter det klipptes kolfibernet till en passform likt stål nätet, som sedan fästes samman med hjälp av metalltråd.

På undersidan av katoderna fästes plastbaserade provrör med kork för att få dem att flyta. Vissa av provrören korrigerades med en tillsatts av vatten för att få katoden att flyta korrekt på ytan. I Figur 5a) illustreras MFC3:s katodundersida och i Figur 5b) visas den anordning som använts för MFC2. MFC1 hade en kombination av MFC2 och MFC3:s flytanordning; två provrör fästes till katoden och sedan kompletterades det med lösa provrör inunder. De fläckar som syns på MFC3:s katod i Figur 5a) kommer från att bilden är tagen efter att den varit i bruk i några dagar.



a) Undersidan av MFC3:s katod.



b) Flytanordningen till katoden för MFC2.

Figur 5: Två varianter på anordningar för att få katoden att flyta.

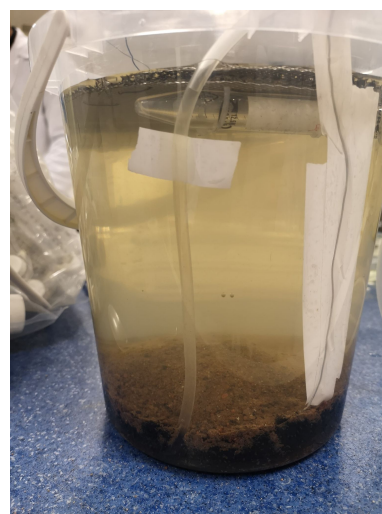
5.3.3 Montering av anod och katod

Anoden placerades på botten av hinken. Slangen och metalltrådens ände fästes längs hinkens sida med hjälp av eltejp. Sedan fylldes hinken med cirka 450 ml avloppsvatten taget från Ryaverket i Göteborg, så att anoden täcktes. På anoden lades sedan ett 3-4 cm lager av sand och resten av hinken fylldes upp med en näringsämnesblandning med sammansättning enligt Tabell 2.

När hinkarna var fyllda med näringslösning lades katoden på vattenytan och metalltråden från anoden och katoden kopplades ihop med fjärderklämmor som i sin tur anslöts med en 1 k Ω resistor. Över varje MFC:s resistor kopplades även en voltmeter som automatiskt registrerar spänningen varje minut, en *Multichannel Recorder MCR-4V*. Figur 6a) visar anoden och sandlagret och Figur 6b) visar MFC1 fullt ihopsatt. Den sistnämnda figuren visar även hur ledningen från anoden och slangen är fasttejpad på hinken.



a)



b)

Figur 6: a) Anod med sandlager på och b) MFC1 helt ihopsatt.

Näringslösningen som användes för att fylla upp hinken hade, som redan nämnts, en sammansättning som

listas i Tabell 2. Till MFC1 användes 4 liter av blandningen medan MFC2 och MFC3 endast fylldes med 2,2 liter vardera. De två sistnämnda spädades sedan ut med 1,1 liter avjoniserat vatten vardera.

Tabell 2: Innehåll, molmassa samt koncentration av ämnena i näringslösningen.

Ämne	Molmassa (g/mol)	Koncentration (mM)	Koncentration (mg/L)
Na ₂ HPO ₄	141,96	100,0	10097
HCl	-	28,87	14,4 (mL/L)
NH ₄ Cl	53,491	2	107
MgSO ₄ · 7H ₂ O	246,47	1	246
CaCl ₂ · 2H ₂ O	147,01	0,1	15
FeSO ₄ · 7H ₂ O	278	0,05	14
KCl	74,55	50	3728
Jästextrakt	-	-	500
NaCH ₃ COO	82,01	40	3280

5.4 Tester utförda med de mikrobiella bränslecellerna

När de tre MFC:erna var byggda och hade börjat påvisa en spänning inleddes tester med dem. Det konstruerades polariserings- och effektkurvor, dess verkliga cellpotential jämfördes med den teoretiska och dess verkningsgrad beräknades. De användes även för att se om det var möjligt att dra några slutsatser om hur väl en MFC hade fungerat som en BOD-sensor inom vattenrening. Slutligen testades det även om de tre tillsammans producerade tillräckligt mycket ström och spänning för att driva en leksak.

5.4.1 Datainsamling och konstruktion av polariserings- och effektkurvor

Efter att MFC1 hade stått i ungefär tre veckor gjordes en första polariseringskurva för den. För detta användes 13 olika externa resistorer för vilka alla den genererade spänningen noterades. Med hjälp av Ekvation (10) beräknades den motsvarande strömmen som sedan plottades mot spänningen för varje resistans. Den beräknade strömmen och den mätta spänningen användes även för att beräkna cellens genererade effekt enligt Ekvation (13). Denna användes för att konstruera en effektkurva genom att plotta strömmen mot effekten.

Två veckor senare utfördes tester för polariserings- och effektkurvor återigen. Denna gång för alla tre MFC:er, som belastades med samma resistorer som vid första tillfället.

5.4.2 Utvärdering av cellpotential och verkningsgrad

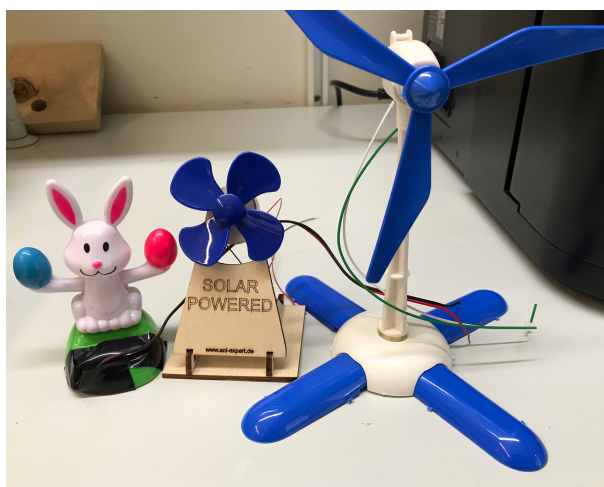
Cellpotentialen för MFC:erna kan jämföras med den teoretiskt maximala cellpotentialen som kan beräknas enligt Ekvation (4), (7), (8) och 9. Trycket för syrgas var 0,21 atm och trycket för koldioxid antogs vara 1 atm eftersom det inte kunde mätas. Det observerades att pH-värdena förändrades under tiden, vilket påverkade de teoretiska cellpotentialerna. Detta gjorde att två beräkningar utfördes, en vid startförhållande och en efter pH-förändring. Vid startförhållandet var koncentrationen av acetat 40 mM, och en pH-förändring observerades när koncentration av acetat var 100 mM. Vid beräkningen antogs det att koncentration vid start förbrukades helt innan en ny koncentration tillsattes. Den maximala spänningen som MFC:erna producerade inom 7 dagar från start, antogs vara under oförändrade pH-förhållanden, medan spänningen som mättes efter 7 dagar och framåt räknades med förändrat pH-värde. Resistorerna som var inkopplade i alla MFC:er hade resistansen 1 kΩ.

Verkningsgraden av MFC:n beräknades från den coulombiska effektiviteten (CE) enligt Ekvation (17).

Antal coulomb som producerades beräknades enligt Ekvation (15). Den totala strömmen som beräkningarna tog hänsyn till var för driftperioden 1033 timmar och 12 minuter för MFC1 medan det för MFC2 och MFC3, som byggdes vid senare tillfälle, var 479 timmar och 56 minuter. Driftperioden började från och med att MFC:erna var uppkopplade. Det teoretiska antalet coulomb som skulle kunna utvinnas i MFC:erna beräknades med hjälp av reaktionsformeln i anoden som visas i Reaktion 1, där en mol acetat producerade 8 mol elektroner. En mol elektron motsvarade en Faradays konstant och detta visas i Ekvation (16). På detta sätt kunde det teoretiska antal coulomb beräknas och verkningsgraden hos MFC:erna utvärderades.

5.4.3 Inkoppling av leksaken

För att testa om de tre MFC:erna tillsammans kunde producera tillräckligt stor ström, seriekopplades de. Det fanns tre olika leksaker tillgängliga, en propeller, en modell av ett vindkraftverk samt en påskhare som kunde dansa, se Figur 7.



Figur 7: De tre leksaker som testades att koppla in till de seriekopplade MFC:erna.

Alla tre leksakerna var från början kopplade till en solcell, denna kopplades bort och istället kopplades de i tur och ordning in i MFC:ernas krets. På den till propellern tillhörande solcell var det på baksidan specificerat spänningen 3,0 V och strömmen 70 mA.

5.4.4 Test för att undersöka potentialen som BOD-sensor

För att testa huruvida en MFC hade fungerat som sensor för BOD-mätning inom vattenrening, tillsattes näringsämne till MFC:erna upprepade gånger och i olika mängd. I Tabell 3 sammanställs de olika tillfällena som näringsämne tillsattes, till vilka MFC:er samt i vilken mängd och koncentration. Näringsämnet som användes var natriumacetat (NaAc) och det tillsattes med hjälp av en plastspruta till MFC:ernas slangar. Efter att näringsämne tillsatts fylldes slangen upp med vätska från MFC:n för att försäkra att allt som tillsattes sipprade ut i anodkammaren. Till MFC2 och MFC3, där slangvolymen var känd på 6,5 ml, tillsattes motsvarande volym, och till MFC1 som besitter längre slang tillsattes dubbel volym, 13 ml.

Tabell 3: De olika tillfällen då näringsämne tillsattes till MFC:erna.

Tillsatts	MFC:er	Mängd (ml)	Koncentration av NaAc (mM)
1	MFC1	40	100
2	MFC1	20	100
3	MFC1, MFC2, MFC3	20	100
4	MFC1, MFC2, MFC3	60	100
5	MFC1, MFC2, MFC3	40	200
6	MFC1	40	200
6	MFC2, MFC3	20	200

6 Resultat

Som resultat presenteras dels bilder och beskrivning av hur de tre MFC:erna förändrades och utvecklades med tiden, och även resultat från de tester och beräkningar som genomfördes.

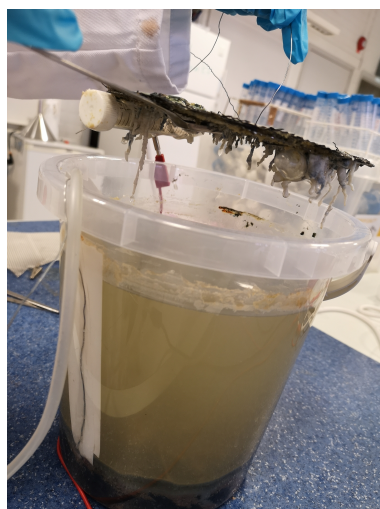
6.1 Förändringar hos de mikrobiella bränslecellerna under arbetets gång

Efter att MFC:erna stått ett tag, började olika förändringar observeras. Alla tre fick förr eller senare påväxter, samt rostutfällning på katoden, och deras lösningar ändrade färg. Dessutom bildades stora, vita påväxter under MFC1:s katod.

För MFC1 upptäcktes påväxterna ovan och under katoden för första gången efter 5 dagar. Ovansidan katoden visas i Figur 8 och påväxterna på undersidan visas i Figur 9. I Figur 9 syns det även att lösningen har blivit grumlig. Det beslutades att skrapa ner påväxten och utfällningarna i blandningen och att skölja katoden med vatten. Efter detta minskade uppkomsten av påväxter och utfällningar men de fanns ändå mer eller mindre kvar.



Figur 8: Förändringar på ytan av MFC1:s katod.



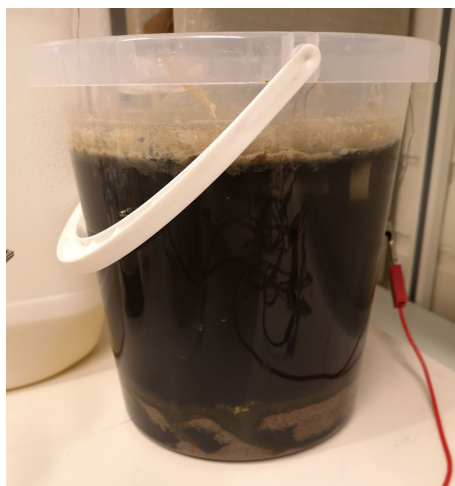
Figur 9: Utfällningar under katoden på MFC1.

Efter ytterligare två veckor, när MFC2 och MFC3 byggdes, flyttades MFC1 till ett rum dit inget solljus

når. Efter att den stått där i 1,5 vecka hade en ny svampliknande påväxt på katoden uppkommit, se Figur 10. Samma dag som detta upptäcktes hade MFC1 dessutom fått en mörkare nyans, se Figur 11.

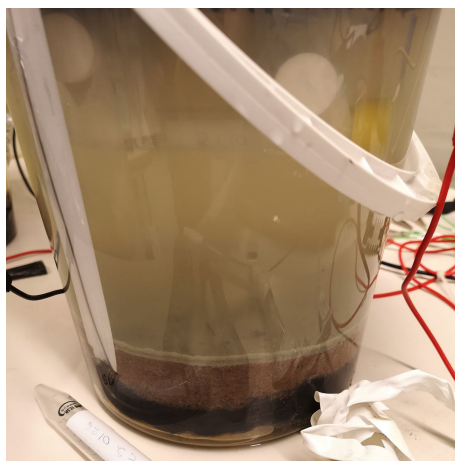


Figur 10: Påväxt på MFC1:s katod.



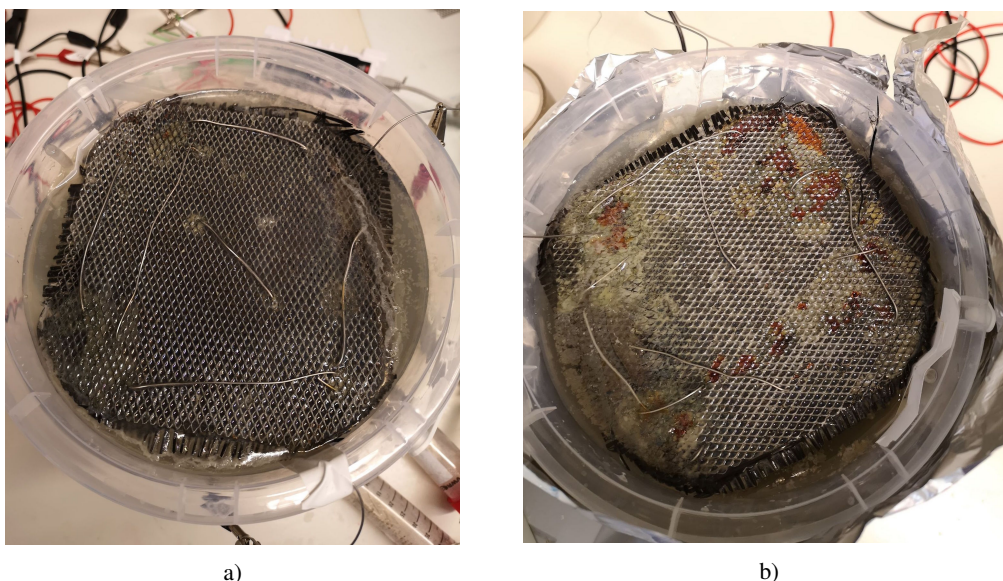
Figur 11: MFC1 då den genomgått ett färgskifte.

Då MFC2 hade stått i två dagar observerades dess vätska som grumlig. Figur 12 visar en bild på MFC2 vid denna tid.



Figur 12: MFC2 efter att ha stått i två dagar.

När MFC2 och MFC3 stått i totalt fem dagar började påväxter på dess katoder att synas, vilket visas i Figur 13. Figur 13a) visar MFC2:s katod och 13b) visar MFC3:s katod. Från figurerna framgår det att MFC3 fått mer synliga påväxter och rostutfällning än MFC2.



Figur 13: a) MFC2:s katod och b) MFC3:s katod med påväxter efter att ha stått i fem dagar.

6.2 Polariserings- och effektkurvor

I Tabell 4 presenteras de 13 resistorer som användes då datainsamling till polarisering- och effektkurvor gjordes. Tillsammans med resistorernas storlek redovisas den uppmätta spänningen och den beräknade strömmen från första tillfället då mätningarna genomfördes.

Tabell 4: Mätdata till första polariserings- och effektkurvan för MFC1.

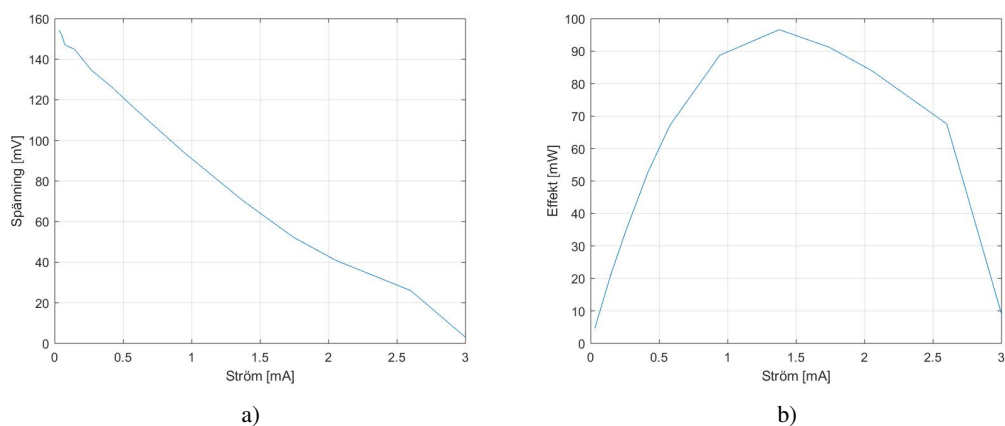
Resistor (Ω)	Spänning (mV)	Ström (mA)
1	3,00	3,00
10	26,00	2,60
20	41,00	2,05
30	52,30	1,74
51	70,20	1,38
100	94,20	0,94
200	116,00	0,58
300	126,10	0,42
510	134,80	0,26
1000	144,90	0,14
2000	147,10	0,07
3000	152,00	0,05
5110	154,30	0,03

De mätpunkter som erhöles från andra tillfället mätningarna genomfördes presenteras tillsammans med den beräknade strömmen i Tabell 5. Det var inte möjligt att erhålla data med sista resistansen för MFC1. För de båda tillfällena bifogas även i Bilaga A fullständig data för spänningsförändringen som registrerats under försökets gång.

Tabell 5: Mätdata till polarisering- och effektkurvor för alla tre MFC:erna.

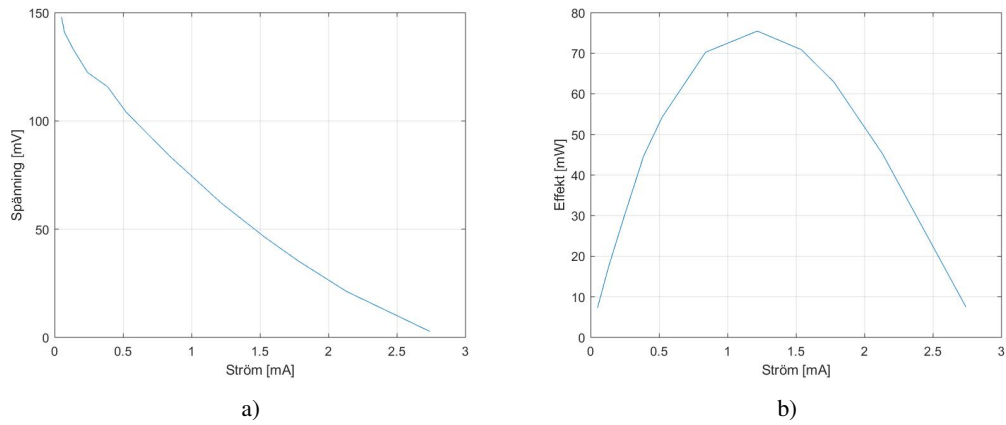
Resistor (Ω)	MFC1		MFC2		MFC3	
	Spänning (mV)	Ström (mA)	Spänning (mV)	Ström (mA)	Spänning (mV)	Ström (mA)
1	2,74	2,74	3,39	3,39	0,62	0,62
10	21,29	2,13	29,23	2,92	5,55	0,56
20	35,49	1,77	52,20	2,61	10,26	0,51
30	46,12	1,54	69,88	2,33	14,28	0,48
51	62,04	1,22	96,48	1,89	21,39	0,42
100	83,82	0,84	131,85	1,32	33,60	0,34
200	104,13	0,52	166,52	0,83	47,96	0,24
300	115,77	0,39	184,18	0,61	56,84	0,19
510	122,37	0,24	201,97	0,40	66,19	0,13
1000	133,30	0,13	218,60	0,22	75,84	0,08
2000	141,00	0,07	230,00	0,12	82,55	0,04
3000	147,96	0,05	233,50	0,08	86,37	0,03
5110	-	-	237,20	0,05	104,17	0,02

Polariseringskurvan för MFC1 som utgår från de punkter i Tabell 4 visas i Figur 14a). I Figur 14b) visas effektkurvan som utgår från samma mätpunkter. Från Figur 14a) framgår det att MFC1:s maximala spänning uppgick till dryga 150 mV och dess maximala ström uppgick till cirka 3 mA. Ur Figur 14b) framgår det att MFC:n hade en maximal effekt på cirka 95 mW.

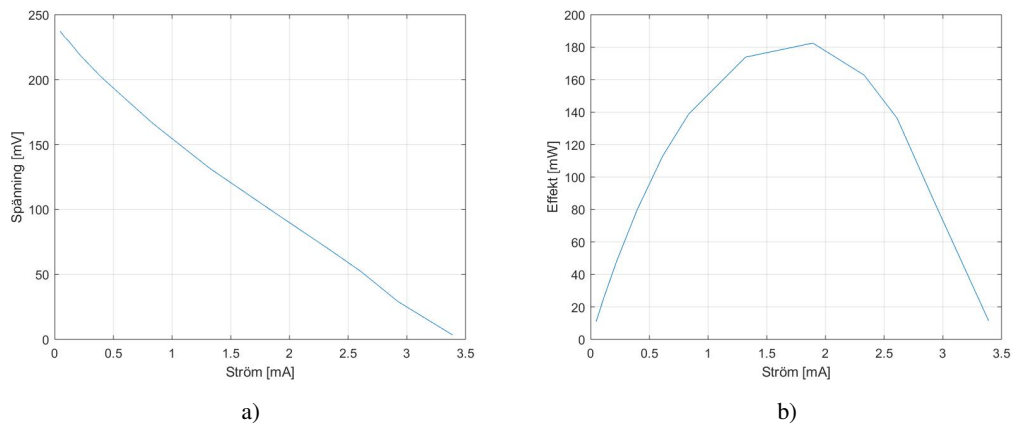


Figur 14: a) Polariserings- och b) effektkurva för MFC1.

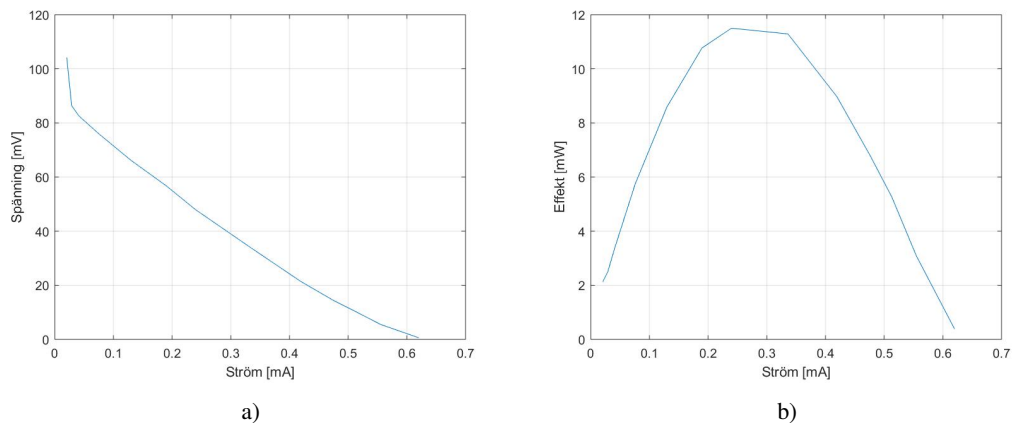
De polariseringskurvor och effektkurvor som baseras på värdena i Tabell 5 visas i Figur 15-17. Figur 15 visar polariserings- och effektkurvan för MFC1, Figur 16 visar kurvorna för MFC2 och Figur 17 visar de för MFC3.



Figur 15: a) Den andra polariserings- och b) effektkurvan för MFC1.



Figur 16: a) Polariserings- och b) effektkurva för MFC2.



Figur 17: a) Polariserings- och b) effektkurva för MFC3.

Även ur dessa polariserings- och effektkurvor kan MFC:ernas maximala spänning, ström och effekt avläsas likt det som gjordes för MFC1:s första kurva. Från Figur 15 avläses att MFC1 vid andra mättillfället hade en maximal spänning på nästan 150 mV, en maximal ström på cirka 2,7 mA och en maximal effekt på cirka 75 mW. Från Figur 16 går det att avläsa att MFC2 hade en maximal spänning på cika 240 mV, en maximal ström på nästan 3,4 mA och en maximal effekt på cirka 180 mW. Slutligen går det från Figur

17 att avläsa att MFC3 hade en maximal spänning på dryga 100 mV, en maximal ström på cirka 0,6 mA och en maximal effekt på omkring 11 mW.

I Tabell 6 sammanfattas mer exakta siffror på den maximala spänningen, strömmen och effekten som erhöles från de tre MFC:ernas polariserings- och effektkurvor. MFC1.2 syftar till den andra omgången av kurvor till MFC1. Den MFC som presterade bäst i alla avseenden var MFC2, MFC1 presterade bättre första gången testet utfördes jämfört med andra.

Tabell 6: Den maximala spänningen, strömmen och effekten baserat på polariserings- och effektkurvor för de tre MFC:erna.

MFC	Max spänning [mV]	Max ström [mA]	Max effekt [mW]
MFC1	154,30	3,00	96,18
MFC1.2	147,96	2,74	75,47
MFC2	237,2	3,39	182,52
MFC3	104,17	0,62	11,50

Resultaten från en linjär regression av polariseringskurvorna visas i Tabell 7 i form av lutning och R^2 -värde. Lutningen motsvarar som nämnt i Kapitel 2.7 den inre resistansen, vilken i sammanhanget får enheten Ω . För att få ett R^2 -värde som minst är 0,8 togs första och sista värdet bort för MFC1.2 och MFC3, i Figur 15a) och Figur 17a) går det att se att det är dessa värden som avvek mest. Av tabellen framgår det att MFC3 hade den största inre resistans medan MFC1 hade den lägsta.

Tabell 7: Lutningen och R^2 -värdet för den linjär regressionen av de fyra polariseringskurvorna.

MFC	Lutning	R^2
MFC1	50,73	0,987
MFC1.2	58,04	0,987
MFC2	69,74	0,995
MFC3	153,12	0,995

6.3 De mikrobiella bränslecellernas cellpotential

Det visade sig att pH-förhållandena för de olika MFC:erna ändrades kraftigt under en lång tid. Det initiala pH-värdet av alla MFC var 6,8-7,0, men det ökade med tiden upp till 8,0-9,0. Detta medförde att den teoretiska potentialskillnaden hos MFC:erna också ändrades. Den teoretiska spänningen av samtliga MFC:erna beräknades med hjälp av Nernst ekvation och formeln i Ekvation (4) där temperaturen var 19°C och de tre pH-förhållandena låg på sina respektive ursprungsnivåer. Värdena presenteras i Tabell 8.

Tabell 8: Teoretiska cellpotentialen för de olika MFC:erna vid olika ursprungliga pH-värdena.

	pH	E_{anod} (V)	E_{katod} (V)	$E_{MFC,teoretisk}$ (V)
MFC1	6,80	-0,028	0,899	0,926
MFC2	7,05	-0,015	0,884	0,899
MFC3	7,20	-0,007	0,875	0,883

Den teoretiska spänningen då pH-förhållande för de olika MFC:erna hade ändrats visas i Tabell 9.

Tabell 9: Teoretiska cellpotentialen för de olika MFC:erna vid förändrade pH-förhållanden.

	pH	E_{anod} (V)	E_{katod} (V)	$E_{MFC,teoretisk}$ (V)
MFC1	9,50	0,112	0,742	0,630
MFC2	7,83	0,027	0,839	0,811
MFC3	8,12	0,042	0,822	0,780

Tabell 8 och Tabell 9 visar att pH-förhållandet i MFC1 och MFC3 ökade särskilt mycket från sina initiala nivåer. MFC2 kunde motstå en pH-ändring något bättre än de två förstnämnda och hade högst förväntad cellpotential. Tabellerna visar också att den teoretiska spänningen minskade när pH-värdet ökade. MFC1, vars pH-värde ändrades mest, hade en avvikelse på 32% vilket var den största minskningen från den förväntade cellpotentialen. Där efterföljde MFC3 som hade en minskning på 11,7% och sist MFC1 som minskade med 9,8%.

Baserat på resultatet ovan kan de faktiska, maximala cellpotentialerna, $E_{cell,max}$, jämföras med de förväntade värdena både vid initialförhållandet och vid förändrat pH-värde. Resultatet visas i Tabell 10.

Tabell 10: Teoretisk och verklig cellpotential för de olika MFC:erna vid initiala pH-förhållanden.

	MFC1	MFC2	MFC3
Teoretisk E_{cell} vid start-förhållande (V)	0,926	0,899	0,883
Verklig $E_{cell,max}$ vid start-förhållande (V)	0,315	0,290	0,281
Avvikelse (%)	66,0	67,7	68,2

Tabell 10 visar att den maximala spänningen under oförändrat pH-värde för MFC1 och MFC3 hade minst respektive störst avvikelse från det teoretiska värdet vilka var 66,0% och 68,2%. Dessutom gav MFC1 högst spänning under 7 dagars driftperiod jämfört med de två andra MFC:erna. Vid oförändrade förhållanden i MFC:n skulle MFC1 därför fungera bäst.

Den verkliga spänningen hos alla MFC:er i jämförelse med den teoretiska spänningen vid förändrade pH-förhållanden visas i Tabell 11.

Tabell 11: Teoretisk cellpotential och verklig cellpotential för de olika MFC:erna vid förändrade pH-förhållande.

	MFC1	MFC2	MFC3
Teoretisk E_{cell} vid pH-ändring (V)	0,811	0,839	0,780
Verklig $E_{cell,max}$ vid pH-ändring (V)	0,227	0,242	0,096
Avvikelse (%)	72,0	71,2	87,7

Tabell 11 visar att MFC3, som var täckt med aluminiumfolie under driftperioden, gav särskilt låg spänning i jämförelse med de andra MFC:erna. MFC3 hade 87,7% avvikelse från det teoretiska värdet och är den största avvikelsen av alla. MFC2 hade minst avvikelse från den teoretiska spänningen (71,2%). Här gav MFC2, vars pH-värde ökade minst, högst spänning jämfört med de två andra MFC:erna vilket innebär att vid förändrad pH-förhållandet skulle MFC2 fungera bäst.

6.4 De mikrobiella bränslecellernas verkningsgrader

Verkningsgraden för de tre MFC:erna ges av den coulombiska effektiviteten, CE. Resultatet från beräkningarna presenteras i Tabell 12.

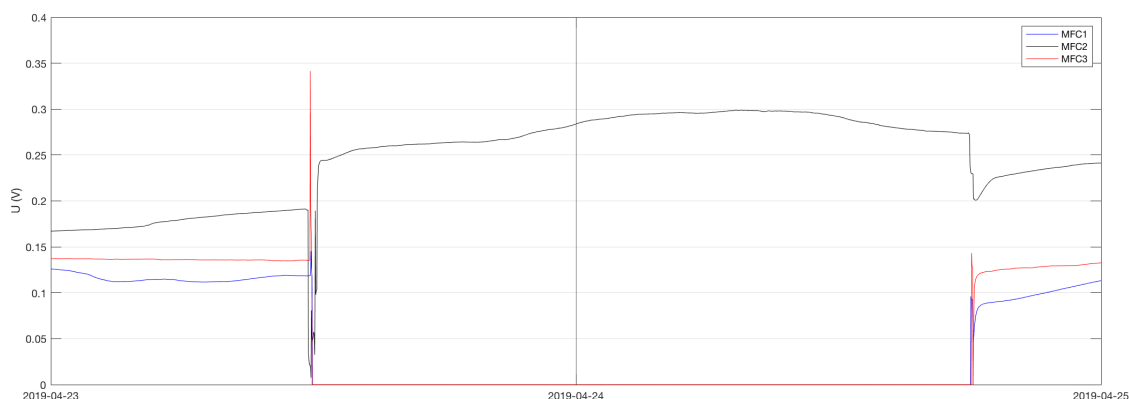
Tabell 12: coulombisk effektivitet för MFC1, MFC2 och MFC3.

	Antal producerade coulomb	Teoretisk antal coulomb	CE (%)
MFC1	499,145	127360,596	0,392
MFC2	181,862	80276,620	0,227
MFC3	103,442	80276,620	0,129

Tabell 12 visar att MFC1 hade högst CE på 0,392%. Därefter kom MFC2 som hade CE på 0,227% och sist kom MFC3 på 0,129%. Detta innebär att en större andel av substratet i MFC1 bidrog till att generera ström, som också ledde till att MFC1 fick en högre verkningsgrad i jämförelse med de andra MFC:erna. Det finns dock en högre relevans att jämföra verkningsgraderna för MFC2 och MFC3, då de hade samma antal maximala elektroner som skulle kunna omvandlas till ström, där MFC2 på grund av dess högre CE var mer effektiv.

6.5 Resultatet av leksakens inkoppling

MFC:erna producerade inte tillräckligt mycket ström för att få någon av leksakerna att röra på sig. Påskharen läts vara kvar i kretsen under ett dygn och datan kring hur spänningen utvecklades samlades in. Resultatet visas i Figur 18, där det går att se att spänningen steg då de kopplades samman.



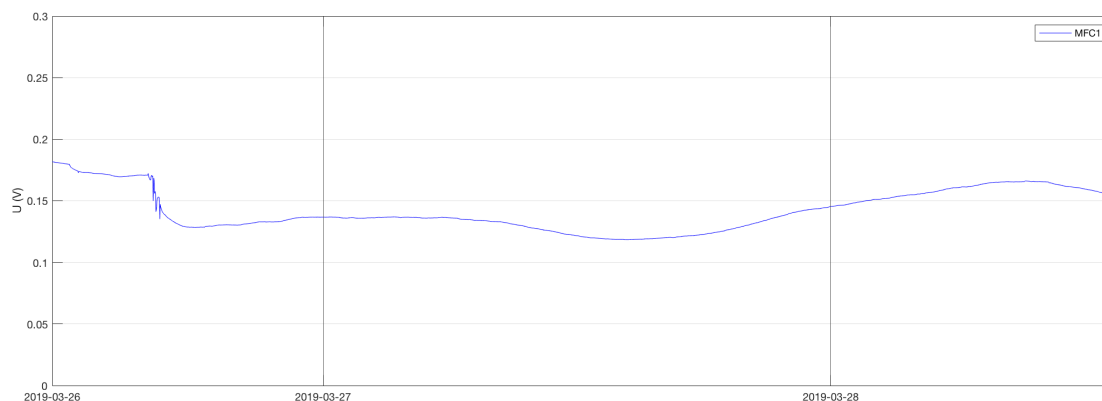
Figur 18: Förändring i spänning då MFC:erna är seriekopplade och har en leksak kopplad till sig.

I figuren framgår det att spänningen maximalt nådde 0,3 V, vilket är märkbart lägre i jämförelse med solcellens specificerade spänning på 3 V.

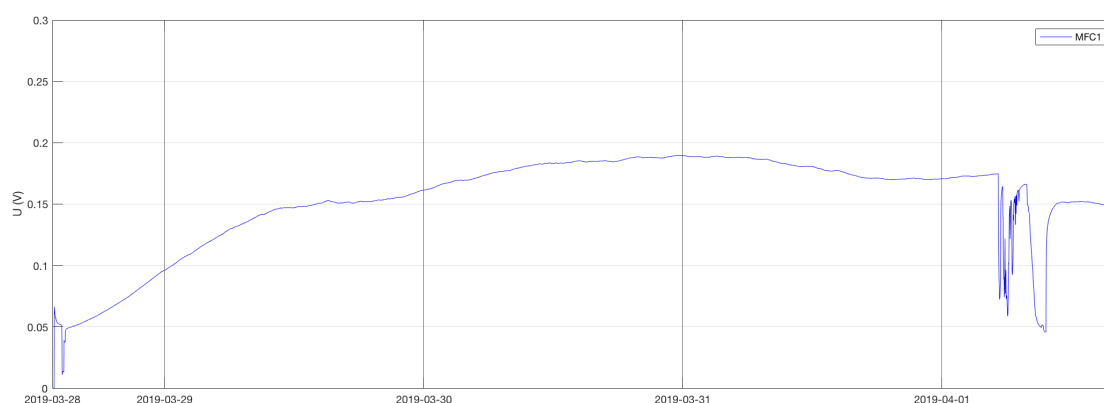
6.6 Test för sensorapplicering

Här presenteras figurer som visar hur spänningen ändrade sig efter en tillsatts av näringsämne. De tillsattser som gjordes presenterades i Tabell 3 och samma numrering som användes där tillämpas här. De sex tillfällena då tillsatts av natriumacetat gjordes och hur spänningen förändrades efteråt visas i Figur 19-24. Graferna börjar då tillsattsken skedde.

Figur 19 och Figur 20 visar första och andra tillsatts. Båda gångerna användes en 100 mM lösning av NaAc, första gången tillsattes 40 ml och andra gången 20 ml. Det är endast MFC1 som visas då de andra två MFC:erna inte var konstruerade i detta stadie. Vid första tillsattsens visas det hur spänningen började strax under 0,2 V och sedan sjönk medan det vid den andra tillsattsens var en initial spänning kring 0,05 V som efter tillsatts succesivt ökade mot 0,2 V.

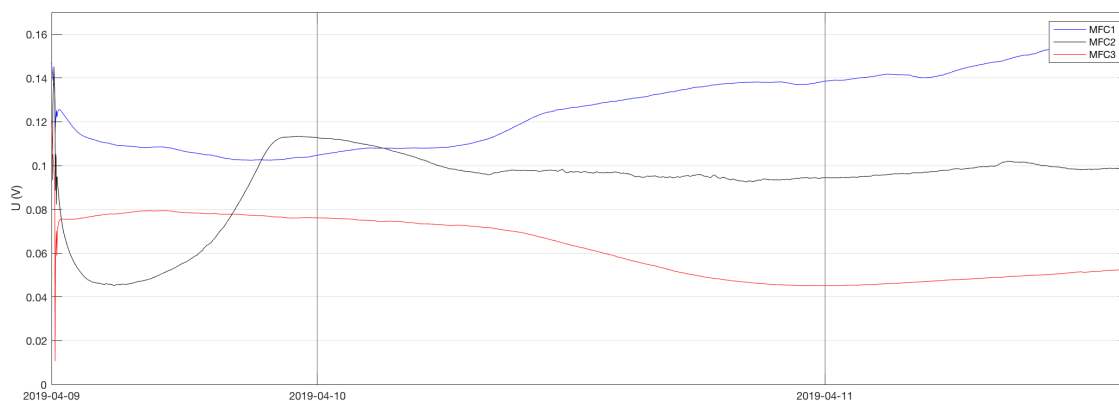


Figur 19: Förändring i MFC1:s spänning efter tillsatts 1.



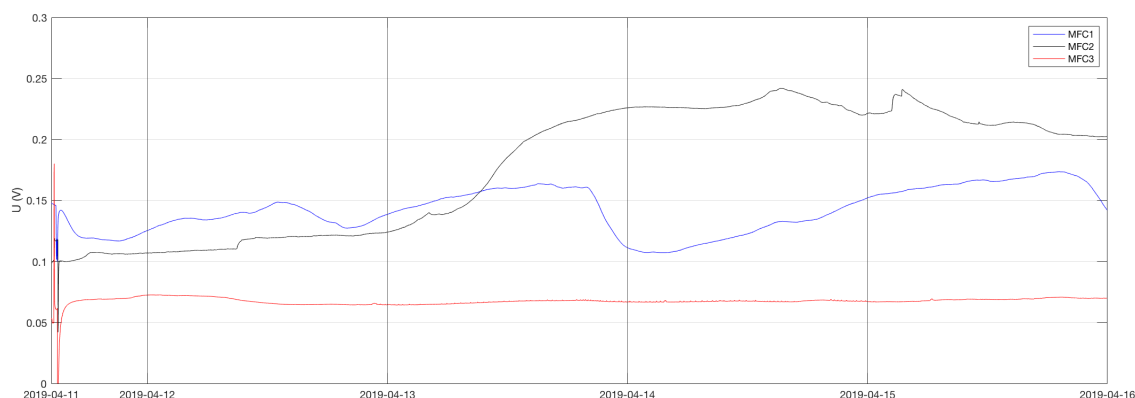
Figur 20: Förändring i MFC1:s spänning efter tillsatts 2.

Tillsatts 3 gjordes till alla tre MFC:er och hur deras spänning varierade efteråt visas i Figur 21. Tillsatts 3 bestod av 20 ml 100 mM NaAc. I figuren framgår det hur MFC1 och MFC2 efter tillsatts sjönk i spänning innan en ökning skedde. MFC2 gick ner till en spänning på 0,05 V och MFC1 till en spänning på 1,1 V. MFC2 hade sedan en topp på dryga 0,11 V medan MFC1 fortsatte stiga mot 0,16 V. MFC3 visade på en successiv sänkning från det att tillsattsens gjorts.

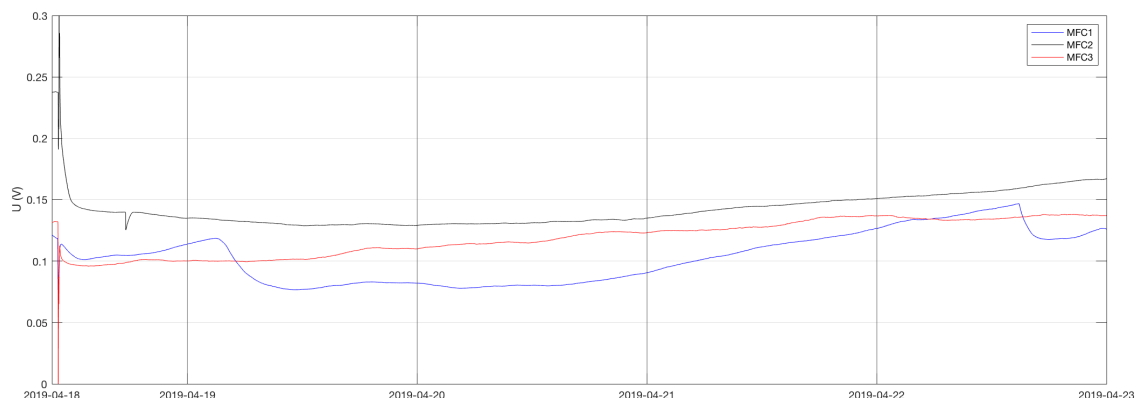


Figur 21: Förändring i MFC:ernas spänning efter tillsatts 3.

Tillsatts 4 och 5 bestod av en 200 mM lösning NaAc av storlek 60 ml respektive 40 ml. Figur 22 och Figur 23 visar hur de tre MFC:erna förändrades efter dessa tillsattser. I båda figurerna, samt i Figur 21 går det att se att spänningen pendlade precis vid tillsattsen. Vid fjärde tillsattsen kan det åter igen observeras att MFC1 och MFC2 steg i spänning efter tillsatts medan MFC3 hölls konstant. Efter tillsatts 5 erhöjll alla tre MFC:er en konstant spänning.



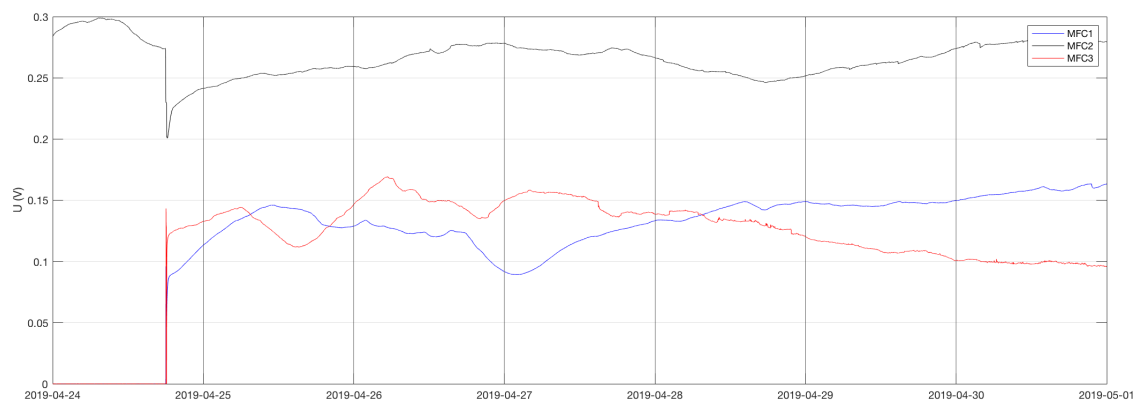
Figur 22: Förändring i MFC:ernas spänning efter tillsatts 4.



Figur 23: Förändring i MFC:ernas spänning efter tillsatts 5.

Den sjätte och sista tillsattsen gjordes med en 200 mM lösning. MFC1 doserades med 40 ml och MFC2 samt MFC3 med 20 ml. MFC:ernas spänningsförändring efter detta visas i Figur 24. Till vänster i figuren visas spänningen från när MFC:erna var seriekopplade. I samband med doseringen kopplades dessa isär,

som illustreras genom en uppdelning av signalen från en till tre. MFC1 steg något i spänning tills den nådde 0,27 V och sjönk därefter. MFC2 och MFC3 påvisade ett oregelbundet värde som pendlade mellan 0,09 V och 0,16 V.



Figur 24: Förändring i MFC:ernas spänning efter tillsatts 6.

7 Diskussion

I följande kapitel kommer en diskussion föras kring genomförande, resultat och tillämpning av MFC som BOD-sensor. Möjliga förbättringspunkter kommer också tas upp.

7.1 Utvärdering av de mikrobiella bränslecellernas prestation

Resultatet visade att konstruktionen av MFC:erna i detta experiment inte gav tillräckligt med spänning för att driva leksaken. Solcellen tillhörande leksaken hade en spänningskapacitet på 3 V, medan en seriekoppling av alla MFC:er gav en maximal spänning kring 0,3 V. Utvärderingar av prestationen hos MFC:erna diskuteras i följande avsnitt.

7.1.1 Problematiken med påväxter

Det laborativa arbetet inleddes med att MFC1 byggdes ihop utan några större avvikelser från den planerade konstruktionen. Det upptäcktes dock tidigt att pingisbollar inte var ett optimalt flytmateriel då det var svårt att hitta en optimal nivå. Istället användes provrör som justerades genom att fyllas med vatten för att hitta en optimal flytnivå, där katodens undersida hade kontakt med vattnet medan katodens övre del hade kontakt med luftens syre. Efter konstruktionen av MFC1 steg spänningen gradvis, innan den nådde sin maximala spänning. Att det tog några dagar tros bero på att bakterierna behövde växa till och biofilm behövde bildas.

Efter ytterligare dagar började påväxter och rostutfällning synas på katodens över- och undersida och även en minskning i spänningen. Vad som orsakat påväxterna, vad det bestått av, eller varför de har uppstått vid olika tidpunkter, har inga försök i syfte att finna förklaring utförts. Rimliga antaganden är att det kan vara alger, utfällningar eller svamp. För vidare test konstruerades MFC2 utan metallnät på undersidan av katoden för att se om metallen hade en påverkan på tillväxten. För MFC3 täcktes sidorna med aluminiumfolie för att förhindra ljusinsläpp, då ljus har en positiv inverkan på tillväxt av alger.

I MFC2 och MFC3 var händelseförloppet inte detsamma som vid uppstarten av MFC1. De vita påväxterna som först uppstod i MFC1 uppstod inte i de andra MFC:arna, utan den mer tjockflytande orangea och gröna påväxten som MFC1 fick i ett senare stadiet, uppstod tidigare hos MFC2 och MFC3. Detta skulle kunna bero på att den vita påväxten hos MFC1 berodde på bakteriernas tillväxt. De avloppsvatten som tillsattes hos MFC2 och MFC3 var framtaget samtidigt som det som användes i MFC1. Detta hade därmed stått ett tag, vilket kan ha medfört att bakterierna varit i en annan fas i sin tillväxt när de adderades till de nya MFC:erna.

MFC2 och MFC3 fick alltså aldrig den vita påväxten på undersidan av katoden, men om detta beror på metallnätet, avsaknaden av solljus eller bakteriernas tillväxtstadiet är svårt att säga. Dessutom skulle alla tre faktorer kunnat ha en gemensam inverkan. Vidare kan det i Figur 13 ses en klar skillnad mellan påväxten på katodens ovansida hos MFC2 och MFC3, där MFC3 har mer synliga påväxter. Det kan därför antas att MFC3:s ljusskydd inte hade någon större påverkan på tillväxten.

I ett senare stadiet kom MFC1 att förändras ytterligare genom att dess vätska antagit en stark svart färg samt att dess katod fått en ny typ av svampliknande påväxt. Orsaken till dessa förändringar saknas spekulationer om. Anmärkningsvärt är dock att MFC:ns spänning inte försämrades vid färgskiftningen.

Påväxterna har i ett första läge visats försämra MFC:ernas spänning, men de olika typerna av tillväxter har däremot inte påverkat spänningen på olika sätt. Dock har de inneburit problem då tillväxterna gjort katoden tyngre och medfört att en perfekt flytnivå har varit svår att uppnå, där hela eller delar av

katoden har hamnat under vattenytan. Med en bristande syrekontakt har spänningen påverkats avsevärt. Detta har också medfört att katoden vid flertalet tillfällen har behövts tas upp för att justera flytanordningen.

Eftersom MFC2 och MFC3 som startades samtidigt hade en liknande spänningsförändring varit att förvänta. Så har det dock inte varit, utan deras spänning har skiljt sig åt, likaså deras påväxter. En risk finns att MFC3 har fått kortslutning då aluminiumfolie placerades runt hinken. Dock har det regelbundet kontrollerats att aluminiumfoliet och ledningarna från anoden och katoden inte haft kontakt. Utan kortslutningsteorin är dock en förklaring av MFC3:s låga och ofta konstanta spänning svårfunnen. Detta leder till att dess pålitlighet behöver ifrågasättas.

7.1.2 Analys av polarisering- och effektkurva

I många fall kan lutningen av en polariseringskurva studeras över tre intervall. I detta fall är dessa tre intervall inte tydliga för någon utav MFC:erna, utan en mer linjär lutning uppvisas, vilket tyder på att systemets förluster dominerades av den inre resistansen. Genom att jämföra de tre MFC:erna kan det konstateras att dessa skiljer sig åt. MFC1 har den lägsta inre resistansen, MFC2 den nästa lägsta och MFC3 den högsta.

Den inre resistansen beror till stor del på de material som används i anod och katod, samt avståndet mellan dessa. Ett längre avstånd mellan anoden och katoden medför en högre inre resistans. Avståndet mellan anod och katod är dock detsamma i de tre MFC:erna och borde därför inte vara en faktor som påverkar skillnaden mellan dem. Än en gång är MFC3 mycket avvikande från de övriga två, medan skillnaden mellan MFC1 och MFC2 är relativt liten. Skillnaden mellan dessa skulle kunna bero på tillfälliga faktorer så som att en katod legat något under vattenytan. Svårare är dock att förklara MFC3 avvikelse, då den borde följt MFC2:s beteende.

Utifrån polariseringskurvan kan en effekt beräknas och därmed kan en effektkurva skapas. I Tabell 6 presenteras respektive MFC:s maximala spänning, ström och effekt, där MFC2 i alla tre fallen besitter det högsta värdet och är den MFC som är mest effektiv. Intressant är dock att jämföra skillnaden mellan MFC1 vid första och andra testet. Vid första testet presterade MFC1 bättre vilket tyder på att den har försämrats med tiden. Tydliga förändringar för denna period är ett förhöjt pH-värde och en mer omfattande påväxt som tros ligga bakom det försämrade resultatet.

7.1.3 Utvärdering av cellpotentialen och den coulombiska effektiviteten

Två spänningar hos MFC:erna som uppmättes vid olika händelseförlopp jämfördes med de teoretiska värdena. Detta är för att den teoretiska spänningen beräknas baserat på koncentrationen av vätejoner som fås från pH-värdet i MFC:erna. Resultatet från beräkningarna och jämförelserna leder till samma slutsats som dragits från analysen av polariseringskurvan och effektkurvan, vilket var att MFC2 hade bäst prestation med högst spänning, medan MFC3 var minst effektiv. Resultatet visade således att MFC2, vars pH-värde hade förändrats minst, hade en mindre avvikelse mellan den teoretiska och den faktiskt uppmätta högsta spänningen än MFC1 och MFC3. Spänningen som MFC2 uppnådde var också högst i jämförelse med MFC1:s och MFC3:s spänning. MFC3 som hade lägst spänning visade sig också ha störst avvikelse från sitt teoretiska värde på 87,7 %.

Medan resultatet och beräkningarna pekar mot att ökade pH-värden har stor påverkan på cellpotentialen uppvisade dock MFC1, vars pH-värde ökade mest, en bättre prestation än MFC3 som hade ett lägre pH-värde. Detta innebär att det finns andra faktorer som påverkar MFC:ernas prestation.

Beräkningen av den coulombiska effektiviteten visade att samtliga MFC:er hade en verkningsgrad under 0,5 % vilket stödjer resultatet om MFC:ernas låga strömproduktionen. MFC1 hade större effektivitet än de två andra MFC:erna. Detta kan bero på att MFC1 hade ett mer stabilt tillstånd när den startades och kunde producera en något högre spänning och ström under en ganska lång tid. Detta resulterade i att andelen elektroner som gick till strömproduktionen ökade. När pH-värdet i MFC1 började stiga, avtog spänningen och därmed strömproduktionen. Detta minskade antalet elektroner som släpptes från oxidation av substratet. Trots detta medförde det höga antalet elektroner som producerades vid starten av MFC1 att dess coulombiska effektivitet blev större än de två andra MFC:ernas.

MFC2, som påverkades minst av förändringen av pH-värdet, hade lägre spänning än MFC1 när den startades, men spänningen ökade med tiden. Detta gjorde att MFC2 hade lägst avvikelse från den teoretiska spänningen vid förändrat pH-värde. Dock eftersom den ökande spänningen hos MFC2 var lägre än den spänningsnivå MFC1 hade vid start och värdena inte upprätthölls lika länge som MFC1, ledde det till att färre elektroner producerades och därmed var den coulombiska effektiviteten hos MFC2 lägre än för MFC1. Den avtagande spänningen hos MFC1 och stigande spänningen hos MFC2 när pH-värdet ökade förklarar även skillnaden i avvikelsen från de teoretiska värdena av de två MFC:erna.

Utöver pH-värden, påväxter, vattenläckage och inre resistans kan det finnas andra faktorer som skulle kunna påverka MFC:ernas prestation. Syrediffusion till anoden kan ha stor påverkan på hur snabbt substratet förbrukas och hur mycket elektroner som frigörs. Alger har möjligtvis bildats vid anoden vilket skulle leda till ökad syremängd som därmed förstör det anaeroba förhållandet som anoden behöver. Detta kan också leda till lägre coulombisk effektivitet. Avdunstning av vatten och näringslösning påverkar volymen och därmed koncentrationen av acetatet, vilket gör att det kan försämra effektiviteten. Dessutom kan en avdunstning göra så att katoden till slut fastnar i hinkens innervägg på grund av att hinken har en avsmalnande diameter. Detta skulle medföra att katoden inte längre får kontakt med vattnets yta, och kan alltså hindra reduktionen från att ske.

Den teoretiska cellpotentialen hos MFC:erna beräknades med antagandet att trycket av CO₂ var 1 atm på grund av att det inte kunde mätas exakt. Detta antagande kan vara för lågt eller för högt, vilket gör att den faktiska avvikelsen kan se annorlunda ut. Koncentrationen av acetat som användes vid beräkningen av den teoretiska spänningen gjordes dessutom under antagandet att substratet vid initialförhållandet (40 mM) förbrukats helt av bakterierna, och ledde till att en ny koncentration (100 mM) användes i beräkning vid förändrat pH-förhållande. Detta kan vara felaktigt och till viss del påverka resultatet.

7.1.4 Resultat av sensorapplicering

Utifrån de experimentella testerna kan inga slutsatser dras om att MFC skulle kunna tillämpas som sensor för BOD, men det kan inte heller uteslutas. Detta då resultaten varit mycket svårtolkade och många faktorer har kommit att spela stor betydelse för MFC:ernas prestation, som nämnts i tidigare avsnitt. Huruvida konstruktionen av MFC:erna var optimal för test utav sensorapplicering kan ifrågasättas, då en precis koncentration av kolkälla inte kunde fastställas. Vid ny tillsatts fanns det alltid en okänd initial koncentration vilket bidragit till svårtolkade resultat. Det gick heller inte att veta med säkerhet att all näringslösning lämnat slangen, men detta antas då en mängd vätska sprutades in efter tillsatts av kolkälla.

En stor anledning till att tillämpningen av MFC som sensor inte kan fastställas är att MFC:erna vid de olika tillsatserna av kolkälla fått väldigt olika utfall. Dels har de tre MFC:ernas spänningsförändring skiljt sig åt sinsemellan men också har samma MFC visat olika utfall vid olika tillfällen. I Figur 19 visas hur spänningen efter tillsatts av 40 ml 100 mM näringslösning sjönk drastiskt efter ett tag och låg på en lägre spänning i över ett dygn. Jämförs denna tillsatts med tillsatsen i Figur 20 då 20 ml 100 mM näringslösning tillsattes, syns en stor skillnad i MFC:ns beteende då spänningen i detta fall succesivt stiger från att näringslösningen tillsatts. Märkbart i dessa två fall är att spänningen i Figur 19 redan låg strax

under 0,2 V, medan den i Figur 20 startade kring en spänning på 0,05 V och ökade till strax under 0,2 V. Detta påvisar att MFC:n i fallet i Figur 19 redan hade en hög koncentration kolkälla och var i detta fall eventuellt redan mättad. Idealt hade dock spänningen legat kvar på samma nivå och inte sjunkit. Utefter fallet i Figur 20 skulle detta kunna vara ett första steg till MFC som sensor för BOD, då detta fall visar på hur MFC:n idealt skulle reagera.

I resterande tester med tillsatts av kolkälla reagerade MFC:na mycket olika. I Figur 21 visas hur MFC1 först sjunker något för att sedan succesivt öka mot en högre spänning än den som rådde innan tillsatsen, medan MFC2 sjunker kraftigt för att sedan stiga kraftigt, även här till en spänning högre än den initiala. MFC3:s spänning behålls däremot någorlunda konstant, innan den sjunker. Att förhöjningarna i spänning inte blir så stora kan bero på att startkoncentrationen varit för hög. Sänkningen som först observeras kan möjligen bero på förändringen som en tillsatts av kolkälla innebär för bakterierna, där dessa behöver anpassa sig till de nya förhållandena. MFC3:s beteende är även svårt att analysera, då det skiljer sig från MFC1 och MFC2. Spänningen tyder på att MFC3 redan var mättad, men en jämförelse med de andra två tyder motsatsen.

I Figur 22 och Figur 23 beter sig de tre olika MFC:erna sig olika varandra likaså, och inget generellt mönster följs. I Figur 22 kan det observeras att MFC2 ytterligare en gång har en höjning av spänning efter tillsatt kolkälla. Mönstret är dock inte likt det som visas i Figur 21, där det i detta fall inte sker någon initial sänkning innan höjningen, och förhöjningen sker här betydligt långsammare. Önskvärt hade MFC2 betett sig likadant i Figur 21 och 22, för att kunna dra slutsatser om MFC:ns tillämpning som sensor för BOD, men båda dessa fall visar att en ökning av spänning sker vid tillsatts av kolkälla. Således kan slutsatsen om att MFC inte skulle kunna fungera som sensor inte heller dras. I Figur 23 beter sig alla tre MFC:er likt varandra och i detta fall antas alla tre vara mättade, vilket den knappt stigande spänningen tyder på.

Vid varje tillsatts av kolkälla kan initialt stora variationer i grafen ses där värdena pendlar kraftigt. Mätinstrumentet kom därför att ifrågasättas, och i vissa fall misstänks glapp i strömkablarna varit bakgrunden. Detta styrks även av att värden för MFC1 vid andra testet för polariseringskurvan plötsligt började variera mellan noll och värden upp mot hundra, se Figur 2 i Bilaga A. Skiftningarna upphörde efter att strömkablarnas placering kontrollerats och justerats. Utefter testerna som gjorts för att se MFC:ernas potentiella användning som BOD-sensor tyder det i vissa fall, som de med MFC2 och det andra testet för MFC1, på att en potential finns, medan andra resultat inte följer det förväntade mönstret.

Det tvivelaktiga resultat som genererats från den experimentella delen med hänsyn på sensorappliceringen kan även hänvisas till frågeställningarnas skiljaktighet i arbetet, det vill säga utförandet av både lämplighet som sensor och elektrisk utvinning. Detta innebär att prototypernas konstruktion även behövs anpassas för att tillgodose den elektriska utvinningen, vilket eventuellt inte varit fördelaktigt för sensortesterna.

På grund av de frånskilda frågeställningarna genomfördes inga omfattande svältperioder då det inte ville riskeras att bakterierna dog vilket hade motverkat genereringen av ström. Svältperioder måste därav vidare undersökas för sensorn, då BOD-värden kan skifta tillika höga som låga värden och bakteriernas kompatibilitet med dessa förhållanden bör studeras. Avsaknaden av kraftigare svältperioder i studien resulterar i att endast förändringar av ett ökat näringsinnehåll undersökts vid relativt stora populationer av bakterier. Det utelämnar hur bakterierna skulle reagerat då näringsämnen tillförts en svagare och betydligt mindre koloni. Skulle kolonin kunnat återhämta sig till samma styrka som innan svältperioden och påvisat en liknande spänningsförändring förblir därmed obesvarat.

7.2 Kommersiell sensorapplicering av mikrobiella bränsleceller

En av drivkrafterna för en applicering av sensorer med hjälp av MFC:er som presenteras i teorikapitlet, är den tidskrävande process som dagens standardiserade metod innebär beträffande BOD. I olika litteraturer som studerats framhålls det ett samband där implementeringen av BOD-sensorer leder till ett snabbare resultat av mängden organiskt material i vattnet. Det sambandet kan delvis visas utifrån de experimentella resultat som redovisats, då en förändring i spänning skett efter en betydligt kortare tid än sju dagar vid tillsats av näringsämnen till MFC:erna. Detta samband kan dock inte bekräftas fullständigt då det användes tre likartade prototyper av MFC:er vid experimenten och alla inte uppvisat överensstämmande resultat vid samma tillfälle. Det skulle eventuellt kunna bero på att MFC:erna nått den mättnadspunkt med avseende på näringsämnen som beskrivs i Kapitel 3.3.3 och därav genererat de tvivelaktiga resultaten.

Om det nu fränses de experiment som genomförts och den relation som påvisas i teoridelen om snabbare resultat visar sig förenlig med storskaligare tillämpning av sensorer, skulle detta kunna förse reningsverk med snabbare information om avloppsvattnets innehåll. Informationen om BOD skulle då kunna beaktas i en större utsträckning, vilket leder till att åtgärder mot förhöjda BOD-värden eventuellt skulle kunna vidtas [65]. Denna möjlighet att vidta åtgärder existerar inte i samma utsträckning idag då provresultaten erhålls sju dagar efter provtagningens genomförande. Den utdragna tidsperioden leder till att det analyserade BOD-värdet eventuellt redan hunnit förändrats igen med hänsyn till de mängder avloppsvatten som reningsverken årligen behandlar enligt Kapitel 3.1, vilket gör att åtgärden är mindre gynnsam. Mer realtidsbaserad information och övervakningsteknik skulle dessutom ge reningsverken bättre förutsättningar för att öka kunskapen om varför BOD-värdena förändras samt ge möjligheten att utveckla effektivare åtgärder för reningssystemet.

En total ersättning från den standardiserade metoden till BOD-sensorer som beskrivs i Kapitel 4.1 är svårt att se i Sverige inom den närmaste framtiden eftersom det idag föreligger krav på att BOD₇ ska prövas och utföras med den standardiserade metoden. Detta krav på BOD₇ leder till att en troligare användbarhet för sensorerna är som ett komplement till den standardiserade metoden istället för att fullständigt ersätta den [65].

Tillämpning som komplement till BOD₇-kravet kanske är det mest realistiska som kan förväntas av en MFC-baserad BOD-sensor på kort sikt. Anledning till detta är dess brister som belyses i Kapitel 3.3 och 4.2 rörande pH-värden och svag tolerans mot toxiska ämnen, vilket medför opålitliga mätvärden. Dock ska det förtydligas att den standardiserade metoden också innefattar brister och fluktuationer i tillförlitligheten hos dess resultat, som påpekas i Kapitel 3.2.3. Eftersom den standardiserade metoden också innefattar brister möjliggörs ett tänkbart scenario att metoden kan ersättas av sensorer på längre sikt om en större driftsäkerhet kan uppnås.

För att öka pålitligheten hos sensorerna, vilket skulle krävas för ett ersättande, eller i minst fall för en bra produkt, måste tekniken utvecklas och komma till rätta med de nackdelar som tidigare presenterats. Detta är essentiellt för appliceringen eftersom dagens avloppsvatten har en stor spridning av upptagning och innehåll som nämnts i Kapitel 3.1, vilket medför att sensorerna måste inneha förmågan att fungera under påverkan av olikartade föroreningar.

Om de prototyper som byggts i studien skulle förbättras till kvalitativa sensorer och bli av med de brister som presenterats, innehar konstruktionen en stor materiell styrka. Detta på grund av att konstruktionerna huvudsakligen består av relativt enkla och lättillgängliga material. Det enklare materialvalet ger en utökad potential för att producera sensorer av lägre prisklass. En billigare sensor skulle därav kunna brukas i delar av världen där ekonomiska förutsättningar för att köpa in dyrare utrustning eller bruka den standardiserade metoden saknas, som nämns i Kapitel 4. Implementeringen av billigare sensorer skulle

därigenom förmå att ge dessa länder förutsättningar att förbättra sina vattenreningstekniker och på sikt kunna uppnå de globala målen om rent vatten och sanitet på jorden [5].

7.3 Utvärdering av metod

Vid utvärdering av det laborativa arbetet finns flertalet saker som skulle gjorts annorlunda om arbetet påbörjats idag. När konstruktionen planerades saknades kunskap som var av stor betydelse. Påväxternas stora utbredning och dess konsekvenser för katodens flytförmåga förutsågs inte. Lösning på problemet med sjunkande eller delvis sjunkande katod har diskuterats under arbetets gång men någon lösning har inte funnits. Det kan därför diskuteras om konstruktionen var den mest passande för test utav MFC som sensor för BOD, då faktorer utöver tillsats av kolkälla har haft stor inverkan på MFC:ns prestation.

Om samma test hade gjorts idag, hade även tillsatsen av kolkälla utförts på annat vis. Utefter de resultat som producerats är det svårt att dra slutsatser och att låta MFC:erna nå en lägre spänning innan tillsatts gjordes, hade varit fördelaktigt för att kunna få ut mer lättolkade resultat. Det hade även varit fördelaktigt att göra fler försök med tillsats av kolkälla, då resultaten idag är något bristande i kvantitet för att en säker slutsats ska fastställas. För att kunna genomföra dessa utökade undersökningar hade mer tid krävts.

Ytterligare en aspekt som hade varit intressant att undersöka, är hur en MFC skulle reagerat om dess totala mängd vätska skulle bytts ut. Detta är väsentligt att undersöka innan det kan konstateras att konstruktionen är ändamålsenlig som sensor, då en applicering skulle innebära att mer än endast näringsinnehållet skulle förändras i vätskan. För att testa detta hade dock en annan typ av konstruktion av MFC behövts då de byggda MFC:erna inte var kompatibla med detta.

För att minska den inre resistansen hos MFC:erna skulle möjligtvis andra material har använts och avståndet mellan anod och katod minskats dock med risken att syre lättare kunnat diffundera till anoden. Att utföra ett materialbyte hade också varit intressant, då det besitter den huvudsakliga påverkan för MFC:ns prestation, och i de MFC:er som konstruerats har konfigurationen av material i princip varit densamma. Bakteriernas härkomst skulle också vara ett intressant område att för vidare studier. Med en ren bakteriekultur, eller en blandkultur härstammande från annan miljö, är det möjligt att resultatet hade förändrats, både i avseende att en annan bakteriekultur skulle kunna ha en högre elektrogen aktivitet, men också att de många påväxterna kanske inte hade uppstått.

Om projektet hade fortlöpt, skulle det varit intressant att testa vad de olika påväxterna bestod av och kanske finna ett sätt att motverka dem. pH-värdets betydliga påverkan har också fastställts under arbetets gång och att i ett nästa steg börja reglera detta för att hitta ett optimalt förhållande, hade kunnat föra arbetet framåt.

8 Slutsats

Arbetet syftade till att göra en fördjupning kring den mikrobiella bränslecellen och dess potentiella tillämpning som sensor för mätning av BOD inom vattenrening. Den litterära studien som genomfördes resulterade i en positiv inställning till att kunna applicera en MFC som BOD-sensor. Utifrån de experimentella resultat detta arbete genererat kan dock inga slutsatser kring applicering av en MFC som sensor dras. Den bristfälliga kontinuiteten i MFC:ernas respons på tillsatts av näringsämne och dess känslighet mot förändringar i omgivningen talar emot en potentiell applicering. Det har inte varit möjligt att besvara hur snabbt en förändring efter tillsatts av näringsämne kan förväntas iakttas.

För att vidare undersöka och utveckla en prototyp av en MFC-baserad sensor hade en alternativ utformning av en MFC velat testats. Förslagsvis en utformning där koncentrationen av näringsämnet hos bakterierna kan mätas. Ett problem med den genomförda studien tros vara tidsbrist och de frånskiljaktiga frågeställningarna, som ledde till att stora tillsatser näringsämnen gjordes för tätt inpå varandra och därmed höll MFC:ernas bakterier mättade.

Arbetet hade även som målsättning att lyckas driva en eldriven leksak med hjälp av MFC:er. Det konstaterades att de tre MFC:er som byggdes inte räckte för att tillsammans driva leksaken. Faktorer som påverkat MFC:ernas prestation är pH-värdet och de olika påväxterna som försämrat katodens prestation. Beräkning av cellpotentialen vid två olika pH-värden visar för alla tre MFC:er att potentialen sjunker vid högre pH och att ett neutralt värde verkar mest optimalt. Det hade i framtida undersökningar varit intressant att undersöka vad påväxterna består av för att eventuellt kunna motverka dem.

Sammanfattningsvis är vidare studier och en utveckling av metoden nödvändig för att kunna besvara frågeställningarna i större utsträckning och med större säkerhet.

Referenser

- [1] J. L. Varanasi och D. Das, "Bioremediation and Power Generation from Organic Wastes Using Microbial Fuel Cell", i *Microbial Fuel Cell: A Bioelectrochemical System that Converts Waste to Watts*, D. Das, utg. Cham, Schweiz: Springer International Publishing, 2018, kap. 15, ss. 285-306. [Online]. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-66793-5_15, hämtad: 2019-03-11.
- [2] V. Muthunarayanan och et al., "Biologically Renewable Resources of Energy: Potentials, Progress and Barriers", i *Microbial Fuel Cell Technology for Bioelectricity*, V. Sivasankar, P. Mylsamy och K. Omine, utg. Cham, Schweiz: Springer International Publishing, 2018, kap. 1, ss. 1-19. [Online]. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-92904-0_1, hämtad: 2019-03-12.
- [3] B. E. Logan, "Introduction", i *Microbial fuel cells*. Hoboken, N.J, United States of America: Wiley-Interscience, 2008, kap. 1, ss. 1-11. [Online]. URL: <http://proxy.lib.chalmers.se/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cat06296a&AN=clc.b2113038&site=eds-live&scope=site>, hämtad: 2019-03-15.
- [4] R. Veerubhotla och D. Das, "Application of Microbial Fuel Cell as a Biosensor", i *Microbial Fuel Cell: A Bioelectrochemical System that Converts Waste to Watts*, D. Das, utg. Cham, Schweiz: Springer International Publishing, 2018, kap. 20, ss. 389-402. [Online]. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-66793-5_20, hämtad: 2019-03-15.
- [5] United Nation Development Programm, "Globalamålen- Rent vatten och sanitet", u.å. [Online]. URL: <https://www.globalamalen.se/om-globala-malen/mal-6-rent-vatten-och-sanitet/>, hämtad: 2019-04-24.
- [6] V. G. Gude, "Wastewater treatment in microbial fuel cells – an overview", *Cleaner Production*, vol. 122, ss. 287-307, maj. 2016. [Online]. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.02.022. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652616001670>, hämtad: 2019-03-11.
- [7] P. Priya och V. Sivamurugan, "The Performance of Microbial Fuel Cells in Field Trials from a Global Perspective", i *Microbial Fuel Cell Technology for Bioelectricity*, V. Sivasankar, P. Mylsamy och K. Omine, utg. Cham, Schweiz: Springer International Publishing, 2018, kap. 13, ss. 251-282. [Online]. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-92904-0_13, hämtad: 2019-03-12.
- [8] B. Kumar, K. Agrawal, N. Bhardwaj, V. Chaturvedi och P. Verma, "Advances in Concurrent Bioelectricity Generation and Bioremediation Through Microbial Fuel Cells", i *Microbial Fuel Cell Technology for Bioelectricity*, V. Sivasankar, P. Mylsamy och K. Omine, utg. Cham, Schweiz: Springer International Publishing, 2018, kap. 11, ss. 211-239. [Online]. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-92904-0_11, hämtad: 2019-03-11.
- [9] M. Rahimnejad, A. Adhami, S. Darvari, A. Zirepour och S.-E. Oh, "Microbial fuel cell as new technology for bioelectricity generation: A review.", *Alexandria Engineering Journal*, vol. 54, nr 3, ss. 745-756, sept 2015. [Online]. DOI: 10.1016/j.aej.2015.03.031. URL: <http://proxy.lib.chalmers.se/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsgao&AN=edsgcl.484507861&lang=sv&site=eds-live&scope=site>, hämtad: 2019-03-20.
- [10] D. A. Jadhav, M. M. Ghangrekar och N. Duteanu, "Recent Progress Towards Scaling Up of MFCs", i *Microbial Fuel Cell: A Bioelectrochemical System that Converts Waste to Watts*, D. Das, utg. Cham, Schweiz: Springer International Publishing, 2018, kap. 23, ss. 443-457. [Online]. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-66793-5_23, hämtad: 2019-03-11.

- [11] S. Berchmans, "Microbial Fuel Cell as Alternate Power Tool: Potential and Challenges", i *Microbial Fuel Cell: A Bioelectrochemical System that Converts Waste to Watts*, D. Das, utg. Cham, Schweiz: Springer International Publishing, 2018, kap. 21, ss. 403-419. [Online]. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-66793-5_21, hämtad: 2019-03-12.
- [12] P. Balmér, "Parametrar för organiskt material i avloppsvatten och slam och något om deras användning," Svenskt Vatten AB, Bromma, Sverige, 2015-11, 2015. [Online], URL: http://vav.griffel.net/filer/SVU-rapport_2015-11.pdf, hämtad: 2019-02-20.
- [13] T. Zhou, H. Han, P. Liu, J. Xiong, F. Tian och X. Li, "Microbial Fuels Cell-Based Biosensor for Toxicity Detection: A Review.", *SENSORS*, vol. 17, nr 10, u.å. [Online]. DOI: 10.3390/s17102230. URL: <http://proxy.lib.chalmers.se/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edswsc&AN=000414931500072&site=eds-live&scope=site>, hämtad: 2019-03-20.
- [14] B. E. Logan, "Other MFC technologies", i *Microbial fuel cells*. Hoboken, N.J, United States of America: Wiley-Interscience, 2008, kap. 10, ss. 162-170. [Online]. URL: <http://proxy.lib.chalmers.se/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cat06296a&AN=clc.b2113038&site=eds-live&scope=site>, hämtad: 2019-03-20.
- [15] F. R. Atkins P de Paula J, *Physical Chemistry: Quanta, Matter, and Change*, uppl.2. Oxford University Press ss.741, 2013.
- [16] S. Pandit och D. Das, "Principles of Microbial Fuel Cell for the Power Generation", i *Microbial Fuel Cell: A Bioelectrochemical System that Converts Waste to Watts*, D. Das, utg. Cham, Schweiz: Springer International Publishing, 2018, kap. 2, ss. 21-41. [Online]. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-66793-5_2, hämtad: 2019-03-11.
- [17] C. Santoro, C. Arbizzani, B. Erable och I. Ieropoulos, "Microbial fuel cells: From fundamentals to applications. A review.", *Journal of Power Sources*, vol. 356, ss. 225-244, juli. 2017. [Online]. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2017.03.109. URL: <http://proxy.lib.chalmers.se/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsgao&AN=edsgcl.492520858&lang=sv&site=eds-live&scope=site>, hämtad: 2019-03-15.
- [18] S. D. Chicas, V. Sivasankar, K. Omine, J. Valladarez och P. Mylsamy, "Plant Microbial Fuel Cell Technology: Developments and Limitations", i *Microbial Fuel Cell Technology for Bioelectricity*, V. Sivasankar, P. Mylsamy och K. Omine, utg. Cham, Schweiz: Springer International Publishing, 2018, kap. 3, ss. 49-65. [Online]. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-92904-0_3, hämtad: 2019-03-13.
- [19] N. Dubey, R. Singh, A. K. Sharma, S. Basu-Modak och Y. Singh, "The Survivors of the Extreme: Bacterial Biofilms", i *Microbial Factories: Biodiversity, Biopolymers, Bioactive Molecules: Volume 2*, V. C. Kalia, utg. New Delhi, Indien: Springer India, 2015, kap. 11, ss. 161-182. [Online]. URL: https://doi.org/10.1007/978-81-322-2595-9_11, hämtad: 2019-03-13.
- [20] L. B. Bruno, D. Jothinathan och M. Rajkumar, "Microbial Fuel Cells: Fundamentals, Types, Significance and Limitations", i *Microbial Fuel Cell Technology for Bioelectricity*, V. Sivasankar, P. Mylsamy och K. Omine, utg. Cham, Schweiz: Springer International Publishing, 2018, kap. 2, ss. 23-48. [Online]. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-92904-0_2, hämtad: 2019-03-19.
- [21] S. Kondaveeti, R. Kakarla och B. Min, "Physicochemical Parameters Governing Microbial Fuel Cell Performance", i *Microbial Fuel Cell: A Bioelectrochemical System that Converts Waste to Watts*, D. Das, utg. Cham, Schweiz: Springer International Publishing, 2018, kap.8, ss.189-208. [online]. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-66793-5_10, hämtad: 2019-04-23.
- [22] R. Rudra, V. Kumar och P. P. Nandy A. Kundu, "Performances of Separator and Membraneless Microbial Fuel Cell", i *Microbial Fuel Cell: A Bioelectrochemical System that Converts Waste to Watts*, D. Das, utg. Cham, Schweiz: Springer International Publishing, 2018, kap.7, ss.125-140. [online]. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-66793-5_7, hämtad: 2019-04-23.

- [23] D. Das, "Introduction", i *Microbial Fuel Cell: A Bioelectrochemical System that Converts Waste to Watts*, D. Das, utg. Cham, Schweiz: Springer International Publishing, 2018, kap. 1, ss. 1–19. [online]. DOI: 10.1007/978-3-319-66793-5_1. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-66793-5_1, hämtad: 2019-04-23.
- [24] B. E. e. a. Logan, "Microbial Fuel Cells: Methodology and Technology", *Environmental Science & Technology*, vol. 40, nr 17, ss. 5181-5192, juli 2006, [Online]. DOI: 10.1021/es0605016. URL: <https://doi.org/10.1021/es0605016>, hämtad: 2019-02-21.
- [25] S. Kondaveeti, R. Kakarla och B. Min, "Physicochemical Parameters Governing Microbial Fuel Cell Performance", i *Microbial Fuel Cell: A Bioelectrochemical System that Converts Waste to Watts*, D. Das, utg. Cham, Schweiz: Springer International Publishing, 2018, kap. 10, ss. 189–208. [online]. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-66793-5_10, hämtad: 2019-04-23.
- [26] G. Mohanakrishna, S. Kalathil och D. Pant, "Reactor Design for Bioelectrochemical Systems", i *Microbial Fuel Cell: A Bioelectrochemical System that Converts Waste to Watts*, D. Das, utg. Cham, Schweiz: Springer International Publishing, 2018, Kap. 11, ss. 209–227. [online]. DOI: 10.1007/978-3-319-66793-5_11. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-66793-5_11, hämtad: 2019-04-23.
- [27] P. C. et al., "Biological Denitrification in Microbial Fuel Cells", *Environmental Science & Technology*, vol. 41, nr 9, ss. 3354-3360, mars 2007, [Online]. DOI: 10.1021/es062580r. URL: <https://doi.org/10.1021/es062580r>, hämtad: 2019-02-21.
- [28] F. R. Atkins P de Paula J, *Physical Chemistry: Quanta, Matter, and Change*, uppl.2. Oxford University Press s.736, 2013.
- [29] L. L. P. W. Atkins L Jones, *Chemical Principles: The quest for insight*, uppl.6. W.H. Freeman ss.351, 2012.
- [30] —, *Chemical Principles: The quest for insight*, uppl.6. W.H. Freeman ss.472, 2012.
- [31] J. L. Varanasi och D. Das, "Characteristics of Microbes Involved in Microbial Fuel Cell", i *Microbial Fuel Cell: A Bioelectrochemical System that Converts Waste to Watts*, D. Das, utg. Cham, Schweiz: Springer International Publishing, 2018, ss. 43–62. DOI: 10.1007/978-3-319-66793-5_3. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-66793-5_3.
- [32] P. Kenneth Todar. (). Nutrition and Growth of Bacteria, URL: <http://textbookofbacteriology.net/nutgro.html>. hämtad: 2019-05-07.
- [33] Z. A. W. Kumar R Singh L och I. H. F, "Microbial fuel cell is emerging as a versatile technology: a review on its possible applications, challenges and strategies to improve the performances", *International Journal of Energy Research*, vol. 42, ss. 369-384, juni 2017, [Online]. DOI: 10.1002/er.3780. URL: <https://onlinelibrary-wiley-com.proxy.lib.chalmers.se/doi/epdf/10.1002/er.3780>.
- [34] J. Malmquist, "biofilm", i *Nationalencyklopedin*. [Online]. URL: <https://www-ne-se.proxy.lib.chalmers.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/biofilm>, hämtad: 2019-05-07.
- [35] "riboflavin", i *Nationalencyklopedin*. [Online]. URL: <https://www-ne-se.proxy.lib.chalmers.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/riboflavin>, hämtad: 2019-05-07.
- [36] S. Nordlund, "cytokromer", i *Nationalencyklopedin*. [Online]. URL: <https://www-ne-se.proxy.lib.chalmers.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/cytokromer>, hämtad: 2019-05-07.
- [37] "koenzym", i *Nationalencyklopedin*. [Online]. URL: <https://www-ne-se.proxy.lib.chalmers.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/koenzym>, hämtad: 2019-05-07.
- [38] E. L. B, "Exoelectrogenic bacteria that power microbial fuel cells", *nature reviews microbiology*, vol. 7, ss. 375-381, mars 2009, [Online]. URL: <https://www-nature-com.proxy.lib.chalmers.se/articles/nrmicro2113>.

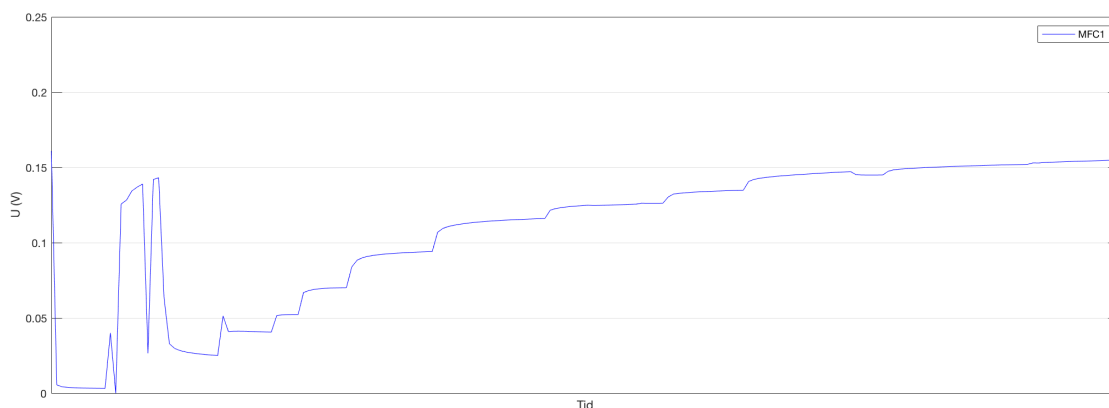
- [39] J. M. Sonawane, A. Yadav, P. C. Ghosh och S. B. Adeloju, "Recent advances in the development and utilization of modern anode materials for high performance microbial fuel cells", *Biosensors and Bioelectronics*, vol. 90, ss. 558 - 576, april 2017, [Online]. DOI: 10.1016/j.bios.2016.10.014. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956566316310107>, hämtad: 2019-02-21.
- [40] T. H. Han, S. Y. Sawant och M. H. Cho, "Development of Suitable Anode Materials for Microbial Fuel Cells", i *Microbial Fuel Cell: A Bioelectrochemical System that Converts Waste to Watts*, D. Das, utg. Cham, Schweiz: Springer International Publishing, 2018, ss. 101 - 124 [Online]. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-66793-5_6, hämtad: 2019-02-21.
- [41] M. Zhou, M. Chi, J. Luo, H. He och T. Jin, "An overview of electrode materials in microbial fuel cells", *Journal of Power Sources*, vol. 196, nr 10, ss. 4427 - 4435, maj 2011, [Online]. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2011.01.012. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877531100084X>, hämtad: 2019-02-21.
- [42] S. Khilari och D. Pradhan, "Role of Cathode Catalyst in Microbial Fuel Cell", i *Microbial Fuel Cell: A Bioelectrochemical System that Converts Waste to Watts*, D. Das, utg. Cham, Schweiz: Springer International Publishing, 2018, ss. 141-163. [Online]. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-66793-5_8, hämtad: 2019-03-12.
- [43] J. L. Varanasi, R. Veerubhotla och D. Das, "Diagnostic Tools for the Assessment of MFC", i *Microbial Fuel Cell: A Bioelectrochemical System that Converts Waste to Watts*, D. Das, utg. Cham, Schweiz: Springer International Publishing, 2018, ss. 249-268. [Online]. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-66793-5_13, hämtad: 2019-03-25.
- [44] "coulomb", i *Nationalencyklopedin*. [Online]. URL: <http://www.ne.se.proxy.lib.chalmers.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/coulomb>, hämtad: 2019-05-12.
- [45] Svenskt vatten, "Avloppsfakta", 2016. [Online]. URL: <http://www.svensktvatten.se/fakta-om-vatten/avloppsfakta/>, hämtad: 2019-02-22.
- [46] Svenskt vatten., "Hur renas avloppsvattnet", 2016. [Online]. URL: <http://www.svensktvatten.se/fakta-om-vatten/avloppsfakta/hur-renas-avloppsvattnet/>, hämtad: 2019-02-22.
- [47] O. Modin, "Avloppsvattenrening", 2018. [Online]. URL: <http://omvatten.se/vattenteknik/12.html>, hämtad: 2019-02-22.
- [48] NFS 2016:6, *Naturvårdsverkets författningssamling: Naturvårdsverkets föreskrifter om rening och kontroll av utsläpp av avloppsvatten från tätbebyggelse*. [Online]. URL: <https://www.naturvardsverket.se/Documents/foreskrifter/nfs2016/nfs-2016-6.pdf>, hämtad: 2019-02-23.
- [49] P. Cronholm, "Avloppsvattnets miljöpåverkan", 2017. [Online]. URL: <https://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Vatten/Avloppsvatten/>, hämtad: 2019-02-22.
- [50] O. Modin, "Syre och syretärande ämnen", 2017. [Online]. URL: <http://omvatten.se/vattenkvalitet/2.html>, hämtad: 2019-02-15.
- [51] "Biokemisk syreförbrukning", i *Nationalencyklopedin*. [Online]. URL: <http://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/biokemisk-syref%C3%B6rbrukning>, hämtad: 2019-02-15.
- [52] S. Jouanneau et al., "Methods for assessing biochemical oxygen demand (BOD): A review", *Water Research*, vol. 49, ss. 62 - 82, feb. 2014. [Online]. DOI: 10.1016/j.watres.2013.10.066. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135413008920>, hämtad: 2019-02-20.
- [53] W. Viessman, M. J. Hammer, "Biochemical and chemical oxygen demands" i *Water supply and pollution control*, uppl. 7. Upper Saddle River, N.J, United states of America : Pearson Prentice Hall, 2005, ss. 317-322.

- [54] "Personekvivalent", i *Nationalencyklopedin*. [Online]. URL: <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/personekvivalent>, hämtad: 2019-02-22.
- [55] R. Kumar, L. Singh, A. W. Zularisam och F. I. Hai, "Microbial fuel cell is emerging as a versatile technology: a review on its possible applications, challenges and strategies to improve the performances", *International Journal of Energy Research*, vol. 42, nr 2, ss. 369-394, jan 2018, [Online]. DOI: 10.1002/er.3780. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/er.3780>. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/er.3780>, hämtad: 2019-03-01.
- [56] I. S. Chang, J. K. Jang, G. C. Gil, M. Kim, H. J. Kim, B. W. Cho och B. H. Kim, "Continuous determination of biochemical oxygen demand using microbial fuel cell type biosensor", *Biosensors and Bioelectronics*, vol. 19, nr 6, ss. 607 - 613, jan 2004, [Online]. DOI: 10.1016/S0956-5663(03)00272-0. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956566303002720>, hämtad: 2019-03-01.
- [57] O. Modin och B.-M. Wilén, "A novel bioelectrochemical BOD sensor operating with voltage input", *Water Research*, vol. 46, nr 18, ss. 6113 - 6120, nov 2012, [Online]. DOI: 10.1016/j.watres.2012.08.042. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135412006422>, hämtad: 2019-03-01.
- [58] Y. Jiang, P. Liang, C. Zhang, Y. Bian, X. Yang, X. Huang och P. R. Girguis, "Enhancing the response of microbial fuel cell based toxicity sensors to Cu(II) with the applying of flow-through electrodes and controlled anode potentials", *Bioresource Technology*, vol. 190, ss. 367 - 372, aug 2015, [Online]. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.04.127. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852415006616>, hämtad: 2019-05-03.
- [59] S. A. M. Shaegh, N.-T. Nguyen, S. H. Chan och W. Zhou, "Air-breathing membraneless laminar flow-based fuel cell with flow-through anode", *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 37, nr 4, ss. 3466 - 3476, feb 2012, [Online]. International Conference on Renewable Energy (ICRE 2011). DOI: 10.1016/j.ijhydene.2011.11.051. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319911025493>, hämtad: 2019-05-04.
- [60] G.-K. M. (). Development of Microbial Fuel Cell (MFC) based sensors, URL: <https://helloscience.io/theme/help-us-bring-clean-water-world/solution/development-of-microbial-fuel-cell-mfc-based-sensors>. hämtad: 2019-03-29.
- [61] W. E. Forum. (). Workforce Trends and Strategies for the Fourth Industrial Revolution, URL: <http://reports.weforum.org/future-of-jobs-2018/workforce-trends-and-strategies-for-the-fourth-industrial-revolution/>. hämtad: 2019-03-29.
- [62] M. M. (). AI och robotar tar miljoner jobb – men skapar ännu fler, URL: <https://computersweden.idg.se/2.2683/1.707286/ai-robotar-skapar-jobb>. hämtad: 2019-03-29.
- [63] W. E. Forum. (). Preparing the future workforce: introduction, URL: <http://reports.weforum.org/future-of-jobs-2018/introduction/>. hämtad: 2019-03-29.
- [64] M. D. L. J. Chouler, "Water Quality Monitoring in Developing Countries; Can Microbial Fuel Cells be the Answer?", *Biosensors*, vol. 5,3, ss. 450-70, juli 2015, [Online]. DOI: 10.3390/bios5030450. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4600167/>.
- [65] M. Neth, privat kommunikation, april 2019.

Bilagor

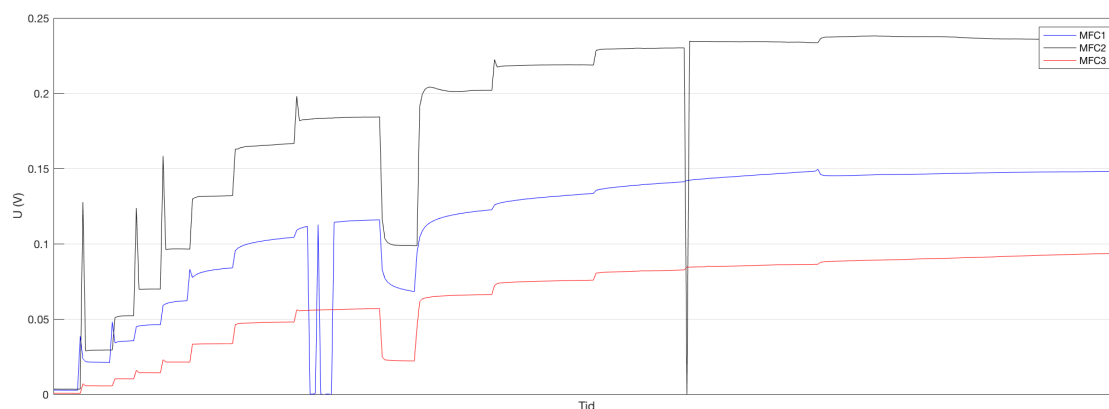
A Fullständig data för polariseringskurvor

I Figur 1 visas det hur spänningen i MFC1 varierade med tiden då det första försöket för att skapa polariseringskurvor genomfördes. Varje plattå motsvarar en resistans. De två högre topparna i början beror på fel i genomförandet då fel resistans kopplades på.



Figur 1: Spänningsförändringen för MFC1 under första tillfället då data samlades in till en polariseringskurva.

Spänningsvariationen för alla tre MFC:er under andra tillfället då mätningarna för polariseringskurvor genomförde visas i Figur 2. Även här motsvarar varje plattå en resistans. Det är okänt varför den vid byte av resistans ibland sticker iväg uppåt eller nedåt, förmodligen beror det på att störningar uppstår kring mätutrustningen.



Figur 2: Spänningsförändringen för de tre MFC:erna under andra tillfället då data samlades in till polariseringskurvor.