



**CHALMERS**  
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

---

# Mikrobiella bränsleceller för energiutvinning

Kandidatrapport 2019

FOLKE ARVIDSSON

VERONICA FALK

FANNY FRÄNDBERG

BOVIE HONG

JOHANNA PÅLSSON

# Mikrobiella bränsleceller för energiutvinning

Kandidatarbete 2019

ACEX10-19-70

Detta kandidatarbete undersöker hur mikrobiella bränsleceller drivna av det organiska material som finns i avloppsvatten kan generera energi. Detta undersöks genom byggande och mätningar av bränsleceller. Undersökningen baseras på relevant litteratur.

Folke Arvidsson, Veronica Falk, Fanny Frändberg, Bovie Hong, Johanna Pålsson

Institutionen för Arkitektur och Samhällsbyggnad  
Vatten Miljö Teknik  
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
Göteborg 2019

# Mikrobiella bränsleceller för energiutvinning

Kandidatarbete 2019

ACEX10-19-70

Författare: Folke Arvidsson, Veronica Falk, Fanny Frändberg, Bovie Hong, Johanna Pålsson

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

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

Institutionen för Arkitektur och Samhällsbyggnad  
Vatten Miljö Teknik  
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
Göteborg 2019

# Mikrobiella bränsleceller för energiutvinning

Kandidatarbete 2019

ACEX10-19-70

Stort tack till handledare Oskar Modin för stöd vid idéer och stöttning under arbetets gång. Vi vill även tacka Amir Saeid Mohammad med tillhörande personal för hjälp i labbet och tillhandahållning av materiel.

© Folke Arvidsson, Veronica Falk, Fanny Frändberg, Bovie Hong, Johanna Pålsson, 2019.

Institutionen för Arkitektur och Samhällsbyggnadsteknik, Göteborg 2019.

# Mikrobiella bränsleceller för energiutvinning

## Sammanfattning

Rening av avloppsvatten är en samhällsfunktion som idag kräver mycket energi. Genom att istället implementera mikrobiella bränsleceller (MFC) i reningsprocessen kan avloppsvattnet ses som en resurs för energiproduktion. De mikrobiella bränslecellerna kan därför betraktas som en del av lösningen på energiproblemet.

Syftet med detta arbete är att tillverka en mikrobiell bränslecell som drivs av det organiska material som finns i avloppsvatten. Den framtagna bränslecellen ska kunna producera tillräckligt mycket energi för att kunna driva en mindre leksak. Syftet är även att den byggda bränslecellen ska visa upp forskningsfältet genom att fungera som ett verktyg i undervisningen på Chalmers tekniska högskola.

För att genomföra studien har relevant litteratur sammanställts. Denna sammanställning har legat till grund för de två olika konstruktioner av bränsleceller som byggdes, en kubisk och en cylindrisk. Efter utvärdering togs beslut om att vidareutveckla den cylindriska modellen, där två av denna modell byggdes och seriekopplades. Med den ström som erhöles från de två seriekopplade cellerna kunde viss antydning till rörelse hos leksaken observeras men inte så tydlig som förväntat. Efter att ha analyserat den mätdata som cellerna gav drogs slutsatsen att ytterligare fyra cylindriska bränsleceller skulle behövas för att generera tillräckligt mycket energi för att kunna driva leksaken kontinuerligt i högsta hastighet. Sammanlagt hade det alltså behövts sex seriekopplade bränsleceller. Trots åtgärder var det svårt att få bränslecellerna helt täta vilket kan vara ytterligare en orsak till att syftet inte uppfylldes.

En konsekvens av läckaget var att påfyllning av cellerna var nödvändigt vilket resulterade i ojämna mätresultat samt en osäkerhet kring cellernas prestanda. Detta arbete har inte undersökt den framtagna bränslecellens reningseffektivitet vilket hade varit intressant att studera i framtida studier.

Folke Arvidsson, Veronica Falk, Fanny Frändberg, Bovie Hong, Johanna Pålsson

Institutionen för Arkitektur och Samhällsbyggnad  
Vatten Miljö Teknik  
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
Göteborg 2019

Nyckelord: MFC, rening av avloppsvatten, energiproduktion.

# Microbial fuel cells for energy generation

## Abstract

Wastewater treatment is a factor in society that today requires a lot of energy. By implementing microbial fuel cells (MFC) in the treatment, the wastewater can instead be used as a resource in energy generation. The microbial fuel cells can therefore be viewed as a part of the solution to the energy crisis.

The purpose of this thesis is to construct a microbial fuel cell which converts the organic matter present in wastewater into energy. The developed fuel cell should generate enough energy to operate a smaller moving toy. The purpose is also that the fuel cell can be used as a prototype to show the research field in the education on Chalmers University of Technology.

In order to conduct the study, relevant literature has been compiled. This compilation has been the foundation for the two different types of fuel cells developed, one cubic and one cylindrical. After further evaluation of the fuel cells, the decision was made to continue developing the cylindrical model where two models were built and coupled in a series circuit. The current from the coupled fuel cells gave the toy a hint of movement which was not as clear as expected. After analysing the data from the fuel cells, the conclusion was that four additional cylindrical fuel cells were needed to generate enough energy to move the toy continuously at full speed. Therefore, a total number of six fuel cells in a series circuit would have been needed. Despite several attempts to caulk, the fuel cells were leaking which can be a reason that the purpose was not fulfilled.

A consequence of the leakage was that filling the fuel cells again was necessary. This resulted in uneven data and an uncertainty on the overall performance of the fuel cells. The thesis has not further examined the wastewater treatment of the developed fuel cells' which would be interesting to investigate in future studies.

The thesis is written in Swedish.

Folke Arvidsson, Veronica Falk, Fanny Frändberg, Bovie Hong, Johanna Pålsson

Institution of Architecture and Civil Engineering  
Water Environment Technology  
CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY  
Gothenburg 2019

Keywords: MFC, wastewater treatment, waste water treatment, energy generation.

# Innehållsförteckning

<b>1. Förkortningslista</b> .....	1
<b>2. Inledning</b> .....	2
<b>2.1. Syfte</b> .....	2
<b>2.2. Avgränsningar</b> .....	2
<b>3. Teori</b> .....	3
<b>3.1. Mikrobiella bränsleceller</b> .....	3
<b>3.2. Mikroorganismer</b> .....	4
<b>3.3. Miljöförhållande i cellen</b> .....	5
<b>3.4. Material på elektroder</b> .....	5
<b>3.4.1 Anod</b> .....	5
<b>3.4.2. Katod</b> .....	6
<b>3.5. Prestanda</b> .....	7
<b>3.5.1. Mäta prestanda</b> .....	7
<b>3.5.2 Effekt- och polariseringskurvor</b> .....	8
<b>3.5.3 Effektuttag ur MFC</b> .....	8
3.5.3.3. Beräkning av Coulombiska effektiviteten .....	9
<b>3.5.4. Påverka prestanda</b> .....	10
<b>3.6. Tillämpning i samhället</b> .....	11
<b>3.6.1. Rening av vatten</b> .....	11
<b>3.6.2. Biosensorer</b> .....	11
<b>3.6.3. Inom sjukvården</b> .....	12
<b>4. Laboration</b> .....	13
<b>4.2. Mätning av strömstyrka och belastning på MFC</b> .....	13
<b>4.3. Mätmetod på MFC</b> .....	14
<b>4.4. Cellförhållanden</b> .....	14
<b>4.4.1. Blandning av avloppsvatten och näringslösning</b> .....	14
<b>4.4.2. pH och temperatur</b> .....	15
<b>4.4.3. Vattenflöde</b> .....	15
<b>4.5. Byggnad av kubisk enkammarcell</b> .....	15
<b>4.5.1. Katod</b> .....	15
<b>4.5.2. Anod</b> .....	16

<b>4.6. Byggande av cylindrisk bränslecell</b> .....	16
<b>4.6.1. Katod</b> .....	16
<b>4.6.2. Anod</b> .....	16
<b>4.6.3. Igångsättning av cylindrisk bränslecell</b> .....	17
<b>5. Resultat</b> .....	18
<b>5.1. Spänning och ström från leksak</b> .....	18
<b>5.2. Kubisk MFC</b> .....	18
<b>5.3. Cylindrisk bränslecell</b> .....	20
<b>5.3.1. Ström och spänning över tid</b> .....	22
<b>5.3.2. Inkoppling till leksak</b> .....	23
<b>5.4. Coulombisk effektivitet</b> .....	23
<b>6. Diskussion</b> .....	24
<b>6.1. Problem och utveckling av vår design</b> .....	24
<b>6.2. Reflektion över metod</b> .....	24
<b>6.3. Utvärdering av resultat</b> .....	25
<b>6.3.1. Leksakens egenskaper</b> .....	25
<b>6.3.2. Resultat från MFC</b> .....	25
6.3.2.1 Jämfört med tidigare studier.....	26
<b>6.4. Användning av cylindrisk MFC i vattenreningsverk</b> .....	26
<b>6.4.1. Andra tillämpningar i samhället</b> .....	27
<b>7. Slutsats</b> .....	28
<b>Referenser</b> .....	29



## **1. Förkortningslista**

BOD – Biological Oxygen Demand

CE– Coulumbisk Effektivitet

COD – Chemical Oxygen Demand

MFC – Microbial Fuel Cell

O.C. – Open Circuit

OCV - Open Circuit Voltage

ORR – Oxygen Reduction Reaction

PGM – Platinum Group Metal

## 2. Inledning

Energi i form av olja och kol har sedan industriella revolutionen använts till att bygga det samhälle vi lever i idag, med välfärd, utbildning och teknikutveckling. Baksidan vittnar dock om global uppvärmning, massutrotning av biologisk mångfald samt luft- och markföroreningar, att hitta en ersättare för olja och kol är en utmaning. Dels för att tekniken har utvecklats under lång tid av människan, dels för att de är effektiva råvaror.

Lösningen till att minska koldioxidutsläppen ligger i att utveckla flera förnybara energikällor i mindre skala, samtidigt som elkonsumtionen minskar. En stor andel av den globala elförbrukningen, 3%, går åt till avloppsvattenrening (Li, Yu och Rittmann, 2015). Att använda avloppsvattnet som en energikälla med hjälp av mikrobiella bränsleceller kan vara en del av lösningen.

Ett kommunalt reningsverk består idag av tre reningssteg, mekanisk, biologisk och kemisk rening. I den biologiska reningen är syftet att ta bort lösta organiska ämnen samt rena vattnet från kväve genom att omvandla det från ammonium till kvävgas. (Modin, 2017). En vanlig men energikrävande metod är att använda aktivt slam. Syre pumpas in via luftning och stora mängder slam pumpas tillbaka till början av processen (Lindvall, 2016).

Avloppsvattnet börjar dock ses som en resurs och nya tekniker utvecklas för att ta tillvara på denna. MFCs kan användas inom det biologiska reningssteget där organiska ämnen oxideras av mikroorganismer, elektroner frigörs och elektrisk energi kan utvinnas. Parallellt med energiutvinningen sker även rening av kväve (Lindvall, 2016).

När jordens befolkningmängd ökar ställer det höga krav på teknik och utveckling för att säkerställa god levnadsstandard för alla människor. Att då ta tillvara på varje resurs är av yttersta vikt när klimatproblem är ett faktum. Studien som redovisas i denna rapport är en del av den forskning som görs om mikrobiella bränsleceller vilka förhoppningsvis kan utvecklas och bli en del av framtidens energikällor.

### 2.1. Syfte

Det huvudsakliga syftet med studien är att tillverka en mikrobiell bränslecell som ska drivas av organiskt material i avloppsvatten. Detta för att utvinna tillräckligt med energi för att kontinuerligt driva en leksak och för att användas som verktyg i undervisning på Chalmers tekniska högskola samt visa upp forskningsfältet. Studien skall undersöka olika designalternativ för bränslecellen samt tillämpningsområden med hjälp av en sammanställning av relevant litteratur.

### 2.2. Avgränsningar

Konstruktionen av bränslecellen avgränsas sålunda att vi enbart skall få en fungerande bränslecell som skall kunna driva leksaken kontinuerligt (under en tid, inte bara momentant). Arbetet innefattar således inte en lösning som är direkt uppskalningsbar, har fokus på reningseffektivitet, driftskostnad, tillverkningskostnad eller nödvändigtvis mobilitet.

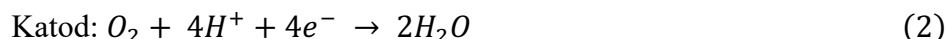
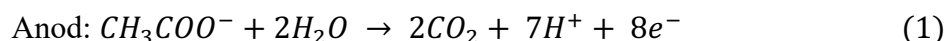
### 3. Teori

Det första avsnittet är en sammanställning av befintlig litteratur vilken ligger till grund för studien. Här beskrivs hur en mikrobiell bränslecell fungerar, samt hur anod, katod och miljöförhållanden i cellen påverkar funktionaliteten hos denna. Dessutom beskrivs hur prestanda kan mätas.

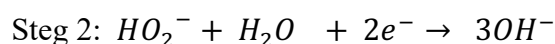
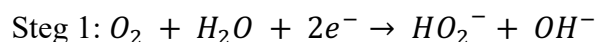
#### 3.1. Mikrobiella bränsleceller

MFC kan delas upp i en-kammarsystem och två-kammarsystem. I ett två-kammarsystem (Figur 1) finns en anod i ena kammaren och en katod i den andra med ett permeabelt membran mellan som släpper igenom protoner (vätejoner) eller en saltbrygga som går över de båda kamrarna. I anodkammaren oxideras substrat (kolkällor, som exempelvis acetat och glukos) av mikrober som frigör elektroner och protoner. Dessa protoner transporteras genom membranet/saltbryggan till katoden och reagerar med tillfört syre (eller en annan elektronacceptor) till vatten. Elektronerna som rör sig genom systemet utvinns som energi (Xu, Zhao, Doherty, Hu et al., 2015).

Reaktionerna som sker vid respektive elektrod om acetat används som substrat visas i ekvationerna (1) och (2) (Du, Li och Gu, 2007):



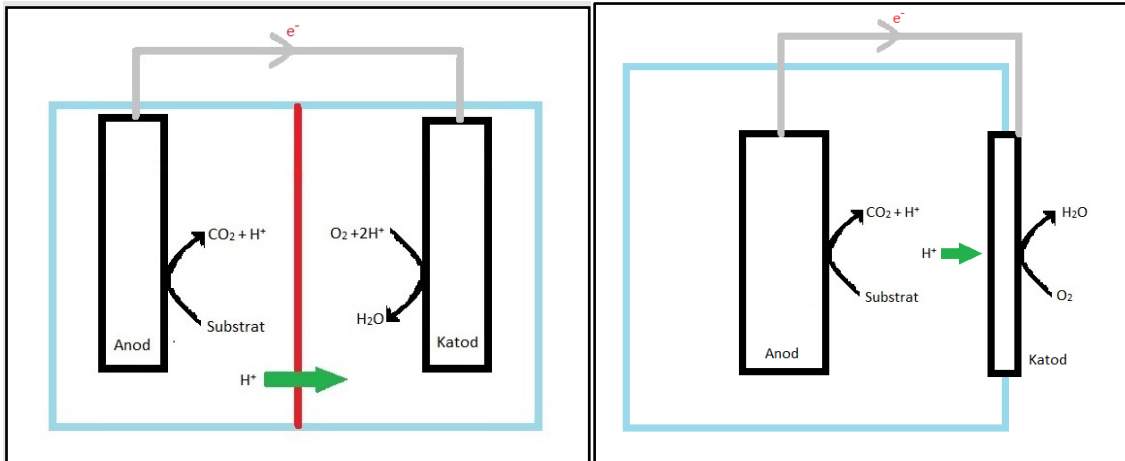
Det finns även en alkalisk reaktionsväg som sker i två steg (Logan, Hamelers, Rozendal, Schröder et al., 2006):



Med slutresultatet:



Numera är det vanligare med en-kammarsystem (Figur 2) på grund av materialkostnader. Det involverar en luftkatod som utgör en av väggarna i kammaren och består av kolfiberväv. Denna väv kan släppa in syre till katodreaktionen med fördelen att inget syre behöver lösas i vatten utan kan tas direkt från luften (Lindvall, 2016).



Figur 1. Tvåkammarcell.  
Författarnas egen bild.

Figur 2. Enkammarcell.  
Författarnas egen bild.

### 3.2. Mikroorganismer

Att organismer kunde frambringa spänning och leverera ström visades år 1910 av Michael Cresser Potter som använde sig av organismerna *Escherichia coli* samt *Saccharomyces cerevisiae* (Shukla, Suresh, Berchmans och Rajendran, 2004). Idag är det känt att det finns flertalet mikroorganismer som kan producera spänning från olika substrat vilket utnyttjas i en mikrobiell bränslecell. Detta sker genom att elektroner, efter oxidation av kolkällan överförs till anoden.

Många mikroorganismer har ett yttre lager som del av sin cellstruktur som hindrar denna överföring av elektroner till anoden och då kan en så kallad elektronöverförare användas. Elektronöverföraren är ett ämne som kan oxideras och reduceras. Exempel på sådana ämnen är grundämnet svavel, aminosyran cystein och metalljonen  $\text{Fe}^{2+}$ . Elektronöverföraren kan således reduceras av mikroorganismen, förflyttas till anoden och släpper ifrån sig elektronerna. Den oxideras då återigen och kan repetera den här processen (Du et al., 2007).

Ett genombrott för utvecklingen av bränsleceller var upptäckten att det finns vissa mikroorganismer som själva är kapabla till att överföra elektronerna från den biofilm de bildat till anoden (Du et al., 2007). *Geobacter*-släktet är ett exempel på en sådan typ av bakterie (Bond, Strychartz-Glaven, Tender och Torres, 2012). De skapar en biofilm på anodytan som elektronerna förs igenom med hjälp av konduktiva pili. Pili är hårliknande strukturer på cellväggen som bakterierna använder för att överföra genetisk information eller för transport, men som *Geobacter* överför elektroner igenom biofilmen med.

*Geobacter sulfurreducens* kan öka effektiviteten på en MFC tiofalt (Poddar och Khurana, 2011) gentemot vad en konventionell kultur av mikroorganismer. Förutom effektiviteten så reducerar mikroorganismer som själva kan överföra elektroner till anoden ytterligare kostnader för bränslecellen. En blandad kultur med flera sorters mikroorganismer är dock att föredra, vilket även är vad som finns i vanligt avloppsvatten (Du et al., 2007). Hypotesen till hur det kommer sig att en blandad kultur är bättre än en ren är att mikroorganismerna samarbetar genom att en typ bryter ner

biomassan till biprodukter som en annan typ kan producera elektricitet ifrån (Deval, Bhagwat och Dikshit, 2014).

### 3.3. Miljöförhållande i cellen

Vilket substrat som används i kombination med vilken mikroorganism påverkar prestandan i bränslecellen. Det har i teorin visats att energiuttaget ökar med en högre koncentration substrat upp till en viss gräns, för att sedan avstanna (Chang, Gil, Kim B., Kim M. et al., 2003; Park och Zeikus, 2002). Trots detta har det i praktiken visat sig att elektriciteten ofta ökar redan vid en relativt låg mängd substrat för att sedan sluta öka succesivt. Detta kan bero på att bakterierna växer ojämnt och att de jäsande bakterierna växer snabbare och således konsumerar mer energi jämfört med de elektrokemiska (Kim, B., Park, Kim, H., Kim, G., et al., 2004; Moon, Chang och Kim, B., 2006; Rabaey, Lissens, Siciliano, och Verstraete, 2003).

I teorin är ofta koncentrationen löst syre det största problemet för katoden, då reaktionen är beroende av syre (Gil et al., 2003; Oh, Min och Logan, 2004; Pham, Jang, Chang och Kim, 2004). I praktiken har dock inga skillnader i prestanda uppstått vilket framgår i en studie där syrgas och mättat syre i vatten jämfördes. Studier har visat att en bättre elektronacceptor ger markant bättre effekt, t.ex. Ferrocyanid som ger 7200 mW/m<sup>2</sup> jämfört med syre som ger <1000 mW/m<sup>2</sup> (Gil et al., 2003; Oh et al., 2004; Pham et al., 2004). Ferrocyanid är dock för farligt vid normal användning vilket gör att syre ofta används.

### 3.4. Material på elektroder

För att gynna mikroorganismernas arbete är även materialvalet för anod och katod av yttersta vikt. De ska ha god ledningsförmåga samt vara motståndskraftigt mot oxidation. Detta behandlas i följande avsnitt.

#### 3.4.1 Anod

Vid anoden sker en oxidation av kol, för reaktionsformel se kapitel 3.1. Anodens viktigaste egenskaper är elektrisk ledningsförmåga, korrosionsbeständighet, hög mekanisk hållbarhet, biokompatibilitet, miljövänlighet och inköpskostnad (Santoro, Arbizzani, Erable och Ieropoulos, 2017).

Anodmaterialen väljs i de flesta fall från en av två huvudgrupper: kolbaserad eller metall. Kol är ett material som kan anta en mängd olika former från allt mellan sådant som är billigt men har liten tillgänglig yta, till dyra material med stor tillgänglig yta (Santoro et al., 2017).

Ett exempel på ett kolmaterial som har mycket hög ledningsförmåga och stor yta men är både dyrt och ömtåligt är kolskum. Exempel på billigare material men med mindre tillgänglig yta är fibrer, ark, och även kombinationsmaterial där titan eller wellpapp belagts med kol (Santoro et al., 2017).

De vanligaste metaller som används för anoder är rostfritt stål, silver, nickel, koppar, guld och titan vilka alla kännetecknas av god ledningsförmåga och korrosionsresistens. Även metaller förekommer i strukturer med förstorad tillgänglig yta vilket är vanligt för rostfritt stål som har använts i form av nät och ull. Övriga metaller är vanligast som plattor (Santoro et al., 2017).

Trots att tredimensionella strukturer med högre specifik yta genererar mer ström än tvådimensionella är detta inte i proportion till den större ytan, vilket antyder att tillväxten inne i strukturerna inte är lika effektiv (Santoro et al., 2017). I en större skala är dock ytans morfologi avgörande för den strömproducerande ytan och biofilmstillväxten. Det är möjligt att ytterligare påverka effekten genom att lägga på ett styrt flöde av elektrolyt genom anodmaterialet (Cheng, Liu och Logan, 2006).

Rätt ytkemi mellan biofilm och anod är en viktig aspekt eftersom biofilmen ska växa på anodytan. Det finns en mängd olika försök att påverka ytkemin för detta ändamål. Vissa metaller, som nickel och koppar, är giftiga för mikrobiella organismer i jonform (Santoro et al., 2017).

### 3.4.2. Katod

Vid katoden reduceras syre till vatten, se reaktionsformel 2 under kapitel 3.1. Detta är vanligen den reaktion som i första hand hämmar cellens prestanda eftersom syrehalten i omgivningen begränsar. Elektrodens ytmaterial väljs så att reaktionen underlättas med hjälp av en katalysator. Detta ytmaterial appliceras vanligen på samma basmaterial som används för anoden, d.v.s. kol eller en metall (Santoro et al., 2017).

För MFCs är abiotiska katalysatorer att föredra, det vill säga en reaktion som drivs av icke-levande ämnen (Nationalencyklopedin, 2019). Santoro et al. delar in katalysatorerna i tre huvudgrupper: platinabaserade material, kolbaserade metallfria material samt metaller utanför platinagruppen (PGM-fria) som beläggs på kol. Andra katalysatorlösningar som använder enzymer eller mikrober kan också användas för Oxygen Reduction Reaction (ORR) (Santoro et al., 2017).

ORR med abiotiska katalysatorer kan ske vid både sur och basisk miljö, där katalysen av ORR gynnas av hög koncentration av vätejoner eller hydroxidjoner då fyra elektroner överförs vid båda reaktionerna (se ekvation 2 och 3). Detta utgör en utmaning för bränslecellerna som på grund av biofilmens funktion måste operera nära neutralt pH och därför är de mindre lämpade för MFC (Santoro et al., 2017).

Platinas reduceringsegenskaper gör det möjligt att erhålla större elektropotentialer (Schroder, Nieben och Scholz, 2003). Schroder et al. uppmätte en ökning av strömstyrkan på 2-4 mA med kolfiberväv beklädd med platina jämfört med 0 mA för den utan platina. För att påskynda katodreaktionen kan järnjoner ( $\text{Fe}^{3+}$ ) och/eller manganjoner ( $\text{Mn}^{4+}$ ) tillsättas och detta kan fyrdubbla strömstyrkan (Park och Zeikus, 1999, 2000, 2003).

Som tidigare nämnt har platinabaserade material använts längst för att katalysera ORR. Dock har de höga kostnader och förhållandet mellan ström och effekt är lågt. Platina är dessutom känsligt för förgiftning av svavelanjoner som är vanligt förekommande i avloppsvatten (Santoro et al., 2017).

Kolbaserade katalysatormaterial, t.ex. kol eller grafen, är båda prisvärda material. Generellt så bygger tekniken på att skapa en stor och aktiv yta och både kol och grafen uppfyller detta samt tillåter en lång driftstid under svåra förhållanden, vilket betyder att prestandan inte försämras nämnvärt vid lång direktkontakt med avloppsvatten (Santoro et al., 2017). Ett material som har både god ledningsförmåga samt motståndskraft, och

är ett vanligen använt material i en MFC är kolfiberväv, helst klädd i platina (s.k. "Platinum Black") (Park och Zeikus, 1999, 2000, 2003).

De PGM-fria materialen är inom utveckling. De utgörs av en övergångsmetall, vanligen mangan, järn, kobolt eller nickel, i förening med kol och kväve. I en alkalisk miljö når PGM-fria katalysatorer högre prestanda än platinabaserade katalysatorer. Dock saknas en entydig bild av hur stabil en elektrods prestanda skulle vara för en MFC i fråga om driftsstabilitet (Santoro et al., 2017).

### 3.4.3. Förhållande mellan storlek på elektroder

Olika bränsleceller där enbart katodytan eller anodytan varierades har studerats. En liten katodyta framstår som en större begränsning än en liten anodyta (Ueoka, Sese, Sue, Kouzuma et al., 2016)

## 3.5. Prestanda

I kommande avsnitt beskrivs tre sätt att mäta prestanda på: effekt- och polariseringskurvor samt Coulumbisk effektivitet (CE). Därefter beskrivs olika sätt att beräkna samt påverka bränslecellens prestanda.

### 3.5.1. Mäta prestanda

Logan et al. (2006) anger följande sätt att karakterisera och mäta prestanda på en MFC, några av dem presenteras nedan:

*Polariseringskurvor* presenterar cellspänning mot strömstyrka i form av en graf. En ofta förekommande metod som presenteras mer ingående längre ner i avsnittet.

*Effektkurvor* beräknas ur polariseringskurvan där effekt presenteras mot strömstyrka.

*Elektrodpotential* mäts i volt som skillnaden i spänning mellan anoden eller katoden gentemot en referenselektrod som har en känd potential vid en bestämd temperatur, oftast 25°C.

*Effekt:*

$$P = \frac{E_{cell}^2}{R_{ex}} \text{ [W]} \quad (4)$$

$E_{cell}$  = elektrodpotential

$R_{ex}$  = fast motstånd

Effekt per ytenhet ges av:

$$P_{An} = \frac{P}{A_{An}} \text{ [W/ m}^2\text{]} \quad (5)$$

Om katodens yta är effektbegränsande kan även den användas för att beräkna effekt.

Effekt per cellens totala volym beräknas:

$$P_V = \frac{P}{V_{cell}} \text{ [W/m}^3\text{]} \quad (6)$$

Vid effekt per yta eller effekt per volymenhet är det viktigt att ange hur ytan eller volymen har beräknats.

*Coulombisk effektivitet (CE)* anger hur stor andel av de elektroner som finns i substratet som har genererat elektrisk ström. CE presenteras mer ingående längre ned i avsnittet.

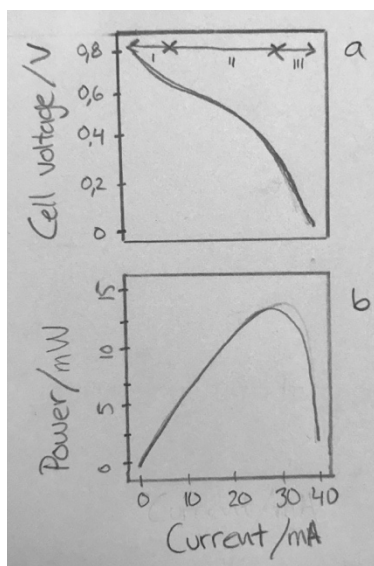
*Strömstyrka* är strömmen av elektroner. För MFC mäts strömstyrka ofta i  $[mA/m^2]$

### 3.5.2 Effekt- och polariseringskurvor

Polariseringskurvan visar spänningen som funktion av strömmen och används för att analysera och karakterisera bränslecellen. Spänning och ström bestäms från obelastad till kortsluten cell med lämpliga steg och där det är jämvikt vid varje punkt. Strömmen beräknas med hjälp av Ohms lag (Logan et al., 2006).

Kurvan har ofta ett typiskt utseende och består ofta av tre zoner: den första zonen som startar vid obelastad cell i OCV kännetecknas av brant fall av spänningen som motsvarar fallet i överspänning. Nästa zon sjunker spänning långsammare och orsakas av cellens inre resistens. I den tredje zonen där spänningen återigen sjunker snabbt begränsas spänningen av masstransporter i cellen vid högt effektuttag (Logan et al., 2006).

Effektkurvan beräknas ur polariseringskurvan och ger istället förhållandet mellan effektdensiteten och strömstätheten. Där polarisationskurvan visar hur spänningen hela tiden sjunker med ökat strömutflytt, visar effektkurvan vid vilken spänning maximal effekt kan tas ut, som är där kurvans topp ligger (Figur 3) (Logan et al., 2006).



Figur 3. a) Polariseringskurva, där de tre zonerna illustreras som i, ii och iii. b) Effektkurva. Inspirerad av: (Logan et al., 2006).

### 3.5.3 Effektuttag ur MFC

Om bränslecellen har en eller två kammare och hur den är designad ger stora spridningar i prestanda i form av spänning, ström och effekt. Nevin, Richter, Covalla, Johnson et al. (2008) har sammanställt prestandan från flera olika bränsleceller och jämfört olika parametrar. En parameter är den Coulombiska effektiviteten som visar hur stor andel av de oxiderade elektroner som producerar el, alltså bränslecellens ”verkningsgrad” (Liu och Logan, 2004). Den Coulombiska effektiviteten uttrycks i procent och är således jämförbar, oavsett storlek på bränslecellen.



Enligt Cheng, Liu och Logan (2006) samt Min och Logan (2004) har en traditionell enkammarcell av plexiglas en effektivitet på 32 % medan en motsvarande tvåkammarcell har en effektivitet på 65 %. Cellerna bestod inte av samma anod- respektive katodmaterial men var av jämförbar typ både med avseende på material och utseende. Katoden i två-kammarcellen innehöll 10 % platina vilket är fördelaktigt gällande prestandan. Enkammarcellen som presenterades i studien av Nevin et al. (2008) hade ett effektuttag på 19,1 W/m<sup>3</sup> och två-kammarcellen hade motsvarande effektuttag på 77 W/m<sup>3</sup>, detta då avloppsvatten användes som källa. Volymen i sammanhanget syftar på vätskan i cellen.

Ett problem med bränsleceller är uppstartstiden som ofta sträcker sig över några dagar, vilket skapar en fördröjning i användningen (Rabaey, Clauwaert, Aelterman och Verstraete, 2005). I studien utförd av Rabaey et al. (2005) tog det 100 timmar innan erforderlig spänning erhöles. Studien innefattar en enkammarcell i form av en kolfibercylinder vilken agerar katod och anoden bestod av fina kolpartiklar vilka vätskan rinner igenom. Prestandan i denna cell var god, vilket framgår i tabell 1, enligt studien beror detta troligtvis på den stora ytan på anoden och katoden. Även förhållandet mellan arean på katoden och volymen av vätskan är mer jämt än för en traditionell enkammarcell, vilket borde vara fördelaktigt. Vid användning av avloppsvatten utvinns en maxeffekt på 48 W/m<sup>3</sup> där volymen på bränslecellen var 330 cm<sup>3</sup>. Den producerade en spänning på ca 0,6 V och en strömstyrka på ca 31 mA vid 20 Ω, vilket ger en indikation på prestandan som en MFC driven på avloppsvatten kan ha.

Genom att veta ungefär hur mycket effekt en MFC kan producera ges en uppfattning om vad den kan användas till, se tabell 1. Detta framgår senare i rapporten under avsnitt 5.1 där leksakens egenskaper mätts, vilket bränslecellen i denna studie avser att driva.

*Tabell 1.* Effektuttag samt coulombisk effektivitet ur cylindrisk MFC på 330 ml. Notera skillnaden mellan olika substrat. Volymen är volymen vätska i cellen (Rabaey et al., 2005).

Substrat	Medel (max) effekt [W/m <sup>3</sup> ]	Medel (max) Coulombisk effektivitet [%]
Acetat	52 ± 10 (90)	75 ± 7 (98)
Glukos	49 ± 8 (66)	43 ± 9 (74)
Avloppsvatten från sjukhus	8 ± 5 (48)	22 ± 5 (36)

### 3.5.3.3. Beräkning av Coulombiska effektiviteten

Den Coulombiska effektiviteten beräknas genom ekvation 7 (Forrestal, Haeger, Dankovich, Cath et al., 2016):

$$C_E = \frac{M_S \int_0^{t_b} I dt}{F * b * V_{An} * \Delta COD} \quad (7)$$

M<sub>S</sub> = Molmassan av syre = 16 g/mol

F = Faradays konstant = 9,65 \* 10<sup>4</sup> Coulombs/mol elektroner.

$b$  = motsvarar antalet elektronutbyten per mol syre

$V_{An}$  = volym vätska i anodkammaren

$I$  = Strömstyrka

$\Delta COD$  = skillnaden i COD över tid, d.v.s.  $\Delta COD = COD_{in} - COD_{ut}$

#### 3.5.4. Påverka prestanda

Den obelastade spänningen reduceras vid belastning av överpotentialen vid elektroderna och cellens inre resistens, enligt:

$$\Delta E = OCV - \Delta E_{\eta} - \Delta E_{\Omega} \quad (8)$$

$\Delta E$  - skillnad i spänning mellan elektroderna vid belastning [V]

OCV – Obelastad spänning, d.v.s. när ingen ström flyter genom cellen [V]

$\Delta E_{\eta}$  - överpotentialen [V]

$\Delta E_{\Omega} - I \cdot R_{int}$ , d.v.s. summan av alla interna förluster hos enheten [V]

Överpotentialen som vanligtvis beror på strömuttaget bestäms huvudsakligen av aktiveringsförluster, förluster från mikroorganismernas cellandning och förluster orsakade av masstransport eller koncentrationsgradienter (Logan et al., 2006).

Eftersom alla spänningsförlusterna är beroende av strömuttaget följer den uppmätta cellspänningen ett rätlinjigt samband enligt:

$$E_{cell} = OCV - I \cdot R_{int} \quad (9)$$

Där  $E_{cell}$  - Bränslecellens uppmätta cellspänning [V]

OCV – Obelastad spänning, d.v.s. när ingen ström flyter genom cellen [V]

$I$  - Strömstyrka [A]

$R_{int}$  - internt motstånd [ $\Omega$ ]

$I \cdot R_{int}$  - summan av alla interna förluster hos enheten vilket avspeglas i den så kallade polariseringskurvan (Logan et al., 2006).

### **3.6. Tillämpning i samhället**

Mikrobiella bränsleceller har flera möjliga användningsområden och i följande avsnitt behandlas hur de kan komma att användas inom vattenrening, som biosensorer samt inom viss sjukvård.

#### **3.6.1. Rening av vatten**

I det biologiska reningssteget ingår förutom borttagning av lösta organiska ämnen samt kväve i vissa fall även rening av fosfor (Modin, 2017). Eftersom aktiv slam-processen kräver att syre pumpas in via luftning samt att stora mängder slam pumpas tillbaka till början av processen, blir processen energikrävande. Om en högre kväverening än 50–70% ska uppnås krävs även att omfattande mängder av etanol, metanol eller glykos tillförs som kolkälla (Lindvall, 2016).

Om det biologiska reningssteget utgörs av bränsleceller produceras mindre slam vilket minskar energiåtgången för pumpning samtidigt som syre direkt når katoden vilket eliminerar behovet av luftning. Detta i kombination med att en MFC själv producerar elektricitet gör tekniken till ett hållbart alternativ ur energisynpunkt. Tekniken visar goda resultat när det gäller mängden producerad elektricitet samt ur flertalet reningsaspekter och är effektiv mot lösta föroreningar. Efter behandling innehåller däremot det behandlade avloppsvattnet höga halter av COD vilket förklaras av att vissa organiska partiklar består efter behandling. Detta gör att viss efterbehandling är nödvändig (Ren, Yongtae och Logan, 2014).

#### **3.6.2. Biosensorer**

BOD beskriver organiska föroreningar som kan brytas ner biologiskt och är en av de viktigare parametrarna när det gäller övervakning och rening av avloppsvatten. Koncentrationen av BOD beskrivs i milligram syre per liter vatten och kan mätas med hjälp av en biosensor (Sun, Kingori, Si, Zhai et al., 2015).

Eftersom en MFC drivs av organiska föroreningar så påverkar halten av dessa den elektiska energi som erhålls (Sun et al., 2015). För ett brett spann av BOD-koncentration finns ett starkt samband mellan Coulombisk effekt och halten av BOD i vätskan vilket gör det möjligt att använda MFCs som biosensorer (Du et al., 2007). MFC-baserade biosensorer ger snabba och noggranna mätresultat, deras responstid varierar från fem minuter till tio timmar (Sun et al., 2015). Höga BOD-halter kräver en längre responstid då BOD-halten måste sjunka innan den Coulombiska effekten kan beräknas. För att få en kortare responstid kan vätskan i vissa fall spädas ut (Du et al., 2007).

Då ingen strömkälla behövs för att driva övervakningen av en biosensor bestående av en MFC så är dessa fördelaktiga när det gäller övervakning under längre tid (Sun et al., 2015). Vidare så kan en biosensor i form av en MFC hållas funktionsduglig utan omfattande underhåll i upp till fem år, vilket även detta gynnar mätningar under längre perioder (Du et al., 2007). Flera typer av biosensorer kräver kompletterande utrustning som omvandlar dess utdata till elektriska signaler men då bränslecellen direkt ger elektrisk ström och därför inte kräver kompletterande utrustning så är sensorn portabel (Sun et al., 2015).

### **3.6.3. Inom sjukvården**

Små designade biologiska bränsleceller, endast 0,07 cm<sup>2</sup> kan även implementeras i blodådror. Tekniken används för patienter som är i behov av regelbunden medicinering såsom AIDS-patienter. Den implementerade bränslecellen drivs av det glukos som finns i blodet för att generera leverering av medicin ut i kroppen (Haselkorn, 2002).

## 4. Laboration

Nästkommande avsnitt beskriver den praktiska delen av studien. Inledningsvis presenteras leksakens egenskaper, sedan faktorer som legat till grund för konstruktionen från teorin och följande av näringslösningens sammansättning. Därefter beskrivs de två konstruktionslösningarnas utformning och funktion.

### 4.1. Leksakens egenskaper

Leksaken som användes är en liten plastleksak i form av en dansande figur (bild t.h.). En solcell matar en spole och på leksaken sitter en magnet vilket skapar induktion som får den att röra på sig. Istället för att använda solcellen kopplas den byggda bränslecellen in vilken driver samma spole.

Maximala spänningen som solcellen kan leverera togs fram genom att belysa den med en stark lampa på ca två centimeters avstånd. För att veta hur hög spänning leksaken kräver för att börja röra sig användes ett spänningsaggregat. Det bör tilläggas att detta gjordes efter val av design samt konstruktion av bränslecellen.

Eftersom leksaken drivs av strömpulser från den uppladdade kondensatorn betyder det att kontinuerlig strömtillförsel inte behövs, utan endast för att ladda upp kondensatorn. Strömstyrkan varierar då tydligt och snabbt vilket resulterar i att den maximala strömstyrkan endast uppstår i någon tiondels sekund.

Olika variationer av spänning testades för att se hur mycket leksaken rörde sig beroende på hög eller låg spänning. Vid varje spänning mättes även strömstyrkan. Se tabell 4 i under avsnitt 5.1 för variationer i spänning, ström samt rörelsegrad (hur mycket leksaken ”dansar”). Se figur 7 under avsnitt 5.1 över hur strömstyrkan varierar med tiden.



Figur 4. Leksaken som skulle kunna drivas med en MFC. 40x70 mm (BxH) Författarnas egen bild.

### 4.2. Mätning av strömstyrka och belastning på MFC

Genom att plotta ett ström-resistans-diagram åskådliggörs en tydlig bild över hur hög strömstyrka bränslecellen kan leverera och var strömförsörjningen blir instabil. Detta ligger till grund för anpassning för bränslecellen till leksaken och om parallellkoppling är aktuellt eller ej.

Om leksaken drar 30 mA och bränslecellen kan högst ge 33 mA (troligt värde) kan två bränsleceller parallellkopplas för att ge en pålitlig strömförsörjning. Då det troligtvis är små strömstyrkor är det viktigt att få en precis strömkurva för att se var den sjunker. Däremot om spänningen visar sig vara den begränsande faktorn måste bränslecellerna seriekopplas istället.

Detta åstadkoms genom att koppla de byggda bränslecellerna till en potentiometer (16-1000  $\Omega$ ) som troligtvis ger rimlig strömstyrka, dimensionerat efter en liknande bränslecell som ger 0,5 V och 31 mA som framgår i en studie av Rabaey et al. (2005), se avsnitt 3.5.2.

### 4.3. Mätmetod på MFC

Hur spänningen varierade över tid studerades genom att en spänningslogger kopplas in till bränslecellerna. En multimeter har använts vid kortare mätningar vilken har en fördröjning som kan inverka på resultaten. Vid uppstart kopplades bränslecellerna till ett motstånd på 500  $\Omega$  under ca en vecka, detta för att få en biofilm att växa på anoden. Ju större motstånd desto fler mikroorganismer oxiderar substratet i näringslösningen vilket påskyndar processen.

Olika mätningar uppdelade på två olika områden gjordes. Den ena mäter korta pulser, d.v.s. belastningstid på <0,5 s, för att se bränslecellens lämplighet för att driva leksaken. Flertalet mätningar gjordes för att ta reda på hur mycket ström cellen kan lämna momentant för olika belastningar (4000–9,8  $\Omega$ ). Det gjordes också längre pulsbelastningar på ca tio sekunder för att se hur mycket spänningen sjunker innan den stabiliseras någorlunda. Detta visas i figur 10 och 11 under avsnitt 5.3.

Den andra mätningen handlar om längre belastningstider för applicering av tekniken i verkligheten. För att studera bränslecellens kapacitet användes ett motstånd på 1000  $\Omega$  detta för att se under hur lång tid bränslecellen kan leverera en stabil spänning. Spänningen mättes varje minut under ett par dagar. Detta visas i figur 12 under avsnitt 5.3.1.

### 4.4. Cellförhållanden

Följande avsnitt behandlar näringslösningen, pH, temperatur och vattenflöde i MFC.

#### 4.4.1. Blandning av avloppsvatten och näringslösning

Samtliga MFC fylldes med en blandning av 50% avloppsvatten från Ryaverket som hämtades en regnig dag, vilket betyder att det är utspätt. 50% av blandningen bestod av näringslösning enligt handledare Oskar Modins recept som visas nedan i tabell 2. De tre första gångerna användes denna blandning men vid senare påfyllningarna användes endast näringslösning för att "mata" bakterierna som från första påfyllning kom från avloppsvattnet. Kemikalierna till näringslösningen blandades ut i kranvatten som innehåller vissa spårmetaller och mineraler som gynnar mikroorganismerna.

Tabell 2. Recept för näringslösning.

Kemikalie	Rationellt namn	Mängd (mg/l)	Syfte
Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	Dinatriumvätefosfat	10097	Buffer
HCl	Saltsyra	14,4 (ml/l)	Sänka pH
NH <sub>4</sub> Cl	Ammoniumklorid	107	Kvävekälla
MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	Magnesiumsulfathydrat	246	Magnesiumkälla samt svavelkälla
CaCl <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O	Kalciumkloridhydrat	15	Kalciumkälla
FeSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	Järnsulfathydrat	14	Järnkälla och svavelkälla
KCl	Kaliumklorid	3728	Kaliumkälla
-	Jästextrakt	500	Källa till vissa spårämnen som gynnar mikroorganismerna
NaCH <sub>3</sub> COO	Natriumacetat	3280	Substratkälla

#### 4.4.2. pH och temperatur

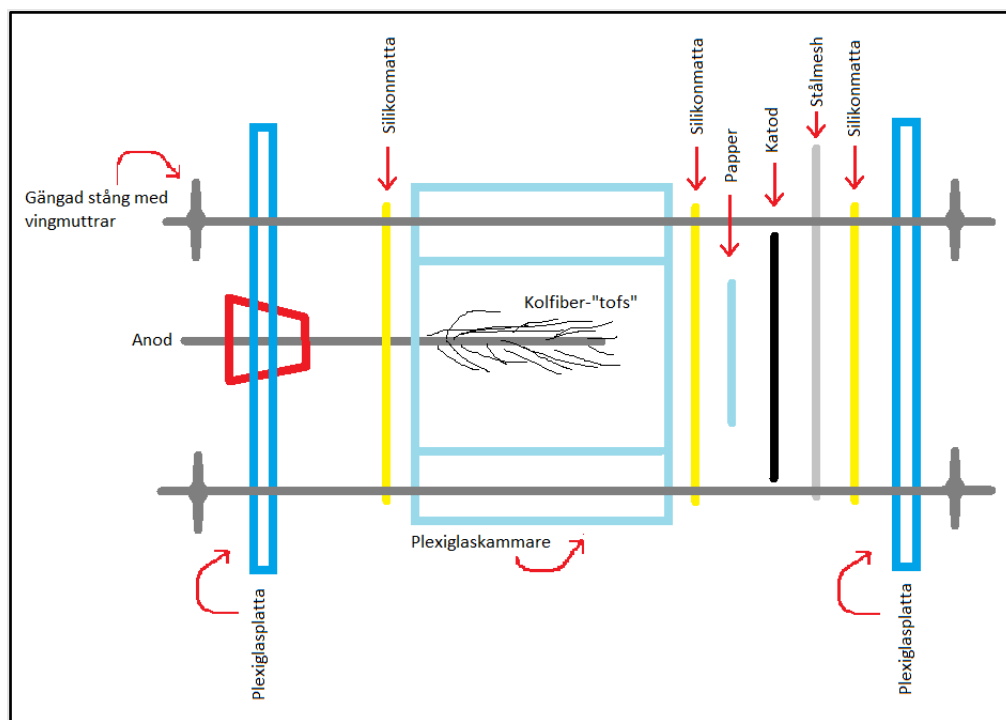
Vattnet har varit i rumstemperatur och pH har försökts hållas stabilt genom att näringslösningen har en buffert. Detta är dock inget som har kontrollerats.

#### 4.4.3. Vattenflöde

Hur och om blandningen av näringslösningen och avloppsvattnet ska kunna bytas ut i bränslecellerna har diskuterats, men när studien endast gick ut på att driva leksaken ansågs det för komplicerat att bygga en automatisk påfyllnadsfunktion. Ofrivilligt läckage av bränslecellen har dock gjort rum för ny lösning som fyllts på under mätningarnas gång.

#### 4.5. Byggande av kubisk enkammarcell

Två en-kammarceller av plexiglas, 10x10 cm, byggdes för att kunna jämföra hur en katod innehållande platina påverkar effektiviteten jämfört med en katod av enbart kol. Anoden utgörs av en grafitstav beklädd med koltrådar för att skapa en större yta för bakterierna att växa på, och katoden utgörs av kolpapper. I mitten fanns avloppsvatten som anoden sänktes ner i och hölls fast med hjälp av en gummiplugg. Se figur 5.



Figur 5. Sprängskiss över konventionell enkammarcell. Författarnas egen bild.

#### 4.5.1. Katod

Kolpapprets storlek för de båda cellerna är utformat till 5x5 cm och de är båda målade med en blandning av Nafion (vattenavstötande polymer som ersätter Teflon) samt 20 mg kolpulver vilket till den ena cellen innehöll 1% platina. 1,5 mg kolpulver per cm<sup>2</sup> kolpapper ingick i blandningen, alltså användes 37,5 mg kolpulver för respektive cell. Blandningen togs fram med hjälp av handledare Oskar Modin och målades på

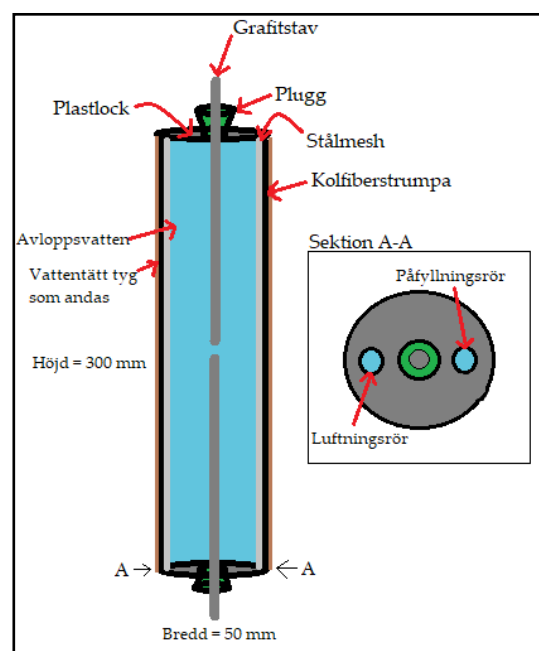
kolpapprena. De lämnades sedan för att torka i rumstemperatur i 20 timmar. Total aktiv katodyta (ytan som hade kontakt med syre) uppgick till ca 7 cm<sup>2</sup>.

#### 4.5.2. Anod

För att förstora den yta som mikroorganismerna odlar biofilm på är anodens grafitstavar i de båda cellerna försedda med koltrådar vilka knöts på stavarna. För att få en större anodyta separerades koltrådarna från varandra, likt en tofs. Total aktiv anodyta (ytan som hade kontakt med vätskan) uppskattas till ca 100 cm<sup>2</sup>, varav grafikstaven är ca 10 cm<sup>2</sup>.

### 4.6. Byggnad av cylindrisk bränslecell

Målet var att tillverka en mer optimerad bränslecell som är enklare att implementera i t.ex. vattenreningsverk jämfört med en MFC i plexiglas. Genom att ha ett rör i kolfiber som kan agera katod och är sammansatt med återslutande lock ihopsatta med varsin anod i vardera ända resulterar det i en påtagligt större katodyta. Detta medför att förhållandet mellan ytan på katoden och volymen på reaktionskammaren blir större än med en MFC i plexiglas. Den cylindriska bränslecellen har ca 8 cm<sup>2</sup> katod/cm<sup>3</sup> vätska jämfört med 0,1 cm<sup>2</sup> katod/cm<sup>3</sup> för en kubisk enkammare-celler – d.v.s. 80 gånger mer katodyta per volym vätska. Detta medför troligtvis att katodytan inte längre begränsar effektuttaget. Två anoder används för att även här kunna utnyttja full potential hos katoden som sedan kopplas samman vid användning. Vid påfyllning av vätska används ett hål i ena ändan av cylindern och när detta har skett kan reaktionskammaren luftas genom en ventil, på så sätt uppnås mer syrefria förhållanden, se sektion A-A i figur 6.



Figur 6. Schematisk bild över cylindrisk bränslecell.

Bränslecellen är utformad som en cylinder enligt figur 6. En kolfiberstrumpa som är träd på ett fint stålnät har ett tyg fäst på utsidan, vilket är vattentätt. Tyget andas och släpper därför igenom syre till katoden. Detta så att den även fungerar under vatten som också har löst syre, vilket gynnas vid användning i vattenbassänger i reningsverk. Cylinderns kortsidor är förslutna med plastlock vilka det är borrarat hål i för att grafitstaven ska kunna stickas in. För att få det tätt så finns det en plugg fäst på de båda grafitstavarna. Bränslecellen har en höjd på 300 mm samt en bredd på 50 mm.

#### 4.6.1. Katod

Bränslecellens katod är målad med en blandning av kolpulver (200 mg), teflonpulver (200 mg) samt etanol (10 ml). För den andra cylinderformade bränslecellen användes samma ämnen bortsett från kolpulvret som innehöll 1 % platina. Total aktiv yta på katoden är ca 940 cm<sup>2</sup>.

#### 4.6.2. Anod

Anoden består av två grafitstavar, 15 cm långa och 5 mm i diameter. Från början var tanken att endast ha en grafitstav men för att få större yta används två grafitstavar. För att kortslutning ska undvikas, det vill säga att anod och katod kommer i kontakt med



varandra, så är avskalade plastpluggar fästa på stavarnas nedre del. Total aktiv yta på anoden är därmed ca 47 cm<sup>2</sup>.

#### **4.6.3. Igångsättning av cylindrisk bränslecell**

Även de cylindriska bränslecellerna fylldes först med kranvatten för att upptäcka eventuella läckage samt för att ta reda på volymen. Volymen mättes till 600 ml. Ett omfattande läckage uppmärksammades för den ena cellen vilket delvis. Samma blandning av avloppsvatten samt näringslösning användes för dessa bränsleceller, se tabell 2 under avsnitt 4.4.1.

## 5. Resultat

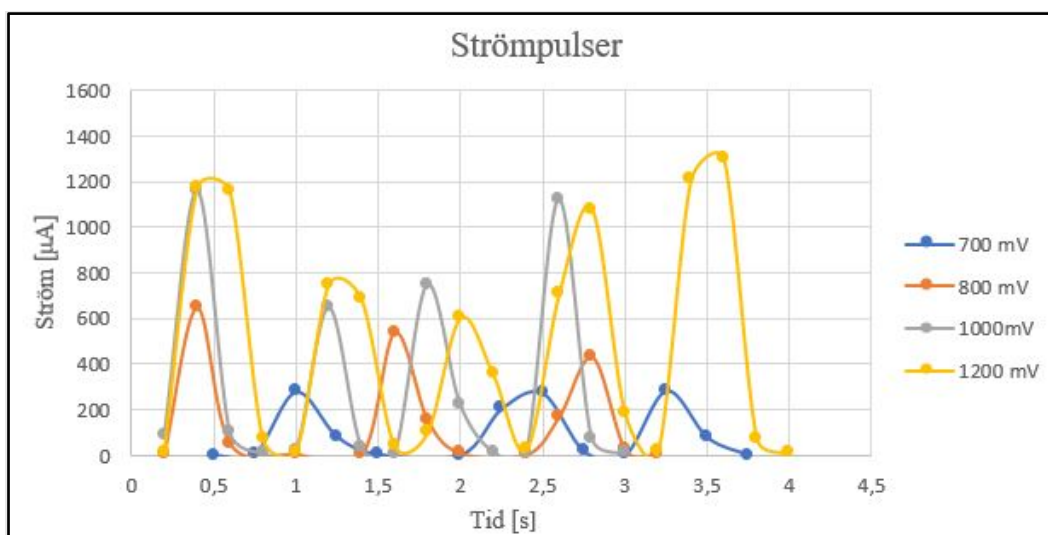
Detta avsnitt redovisar uppmätta resultat från de MFC som har använts i studien.

### 5.1. Spänning och ström från leksak

Den maximala spänningen som solcellen, och därmed leksaken, gav var 1660 mV. Vid 700 mV började leksaken att röra sig och vid spänningar över 1200 mV syntes ingen ytterligare förändring i rörelse, vilket gör att 1200 mV får anses som maximal spänning. Hur spänningen och strömstyrkan för solcellen varierar med rörelse framgår i tabell 3.

Tabell 3. Mätresultat på spänning och ström från leksaken.

Spänning [mV]	Max strömstyrka [ $\mu$ A]	Rörelsegrad [-]
700	285	Antydning till liten rörelse
800	649	Antydning till rörelse
1000	1162	Tydlig rörelse
1200	1303	Mycket tydlig rörelse (max)

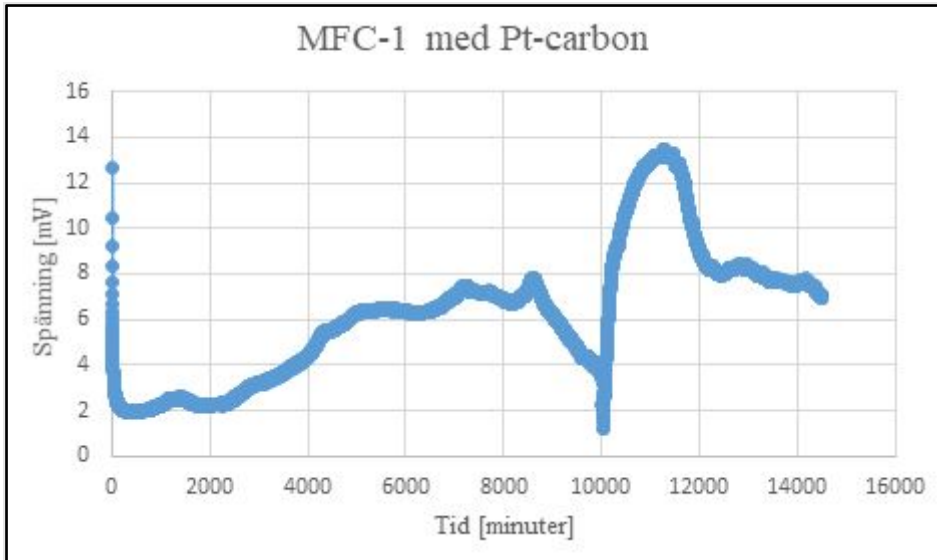


Figur 7. Hur strömstyrkan varierar med tiden.

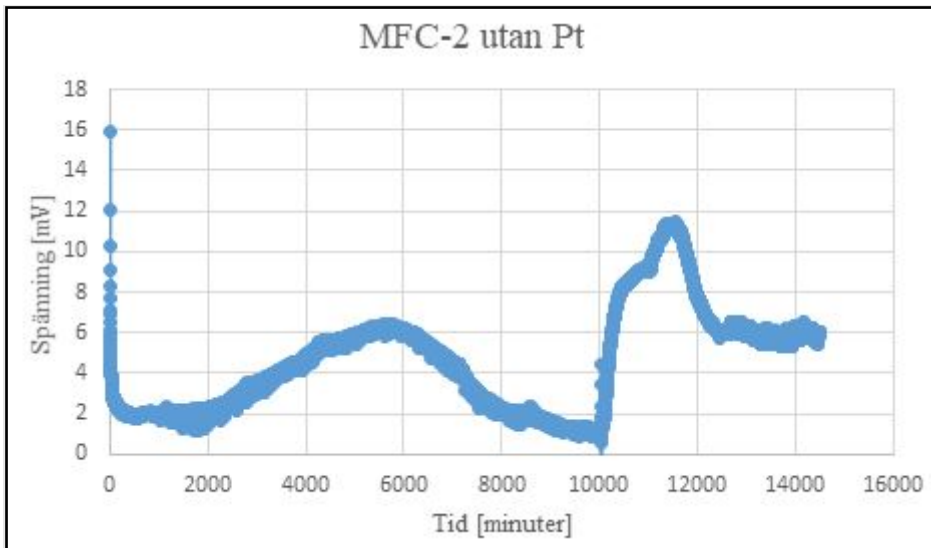
Som framgår ovan (Figur 7) varierar strömmen kontinuerligt likt en sinusvåg med ungefär en halv sekund mellan topparna. Strömstyrkan varierar snabbt och maximal strömstyrka uppstår endast i någon tiondels sekund.

### 5.2. Kubisk MFC

I figur 8 och 9 kan spänningen för de kubiska bränslecellerna avläsas. Den stora minskningen/ökningen vid 10 000 minuter är p.g.a. byte och påfyllning av näringslösning.



Figur 8. MFC i plexiglas med Pt-carbon, mätt med en resistor på 1000  $\Omega$ .



Figur 9. MFC i plexiglas med vanligt kolpulver, mätt med en resistor på 1000  $\Omega$ .

Tabell 4. Mätresultat över 10 dagar med en resistor på 1000  $\Omega$ . Volymen avser cellvolymen (reaktionskammaren).

	Effekt [ $\text{W}/\text{m}^3$ ]	Spänning [ $\text{V}/\text{m}^3$ ]	Ström [ $\text{mA}/\text{m}^3$ ]
Medel MFC-1 (med Pt)	7,8	88,7	88,7
Max MFC-1 (utan Pt)	37	192,5	192,5
Medel MFC-2	4,4	66	66
Max MFC-2	51,7	227	227

### 5.3. Cylindrisk bränslecell

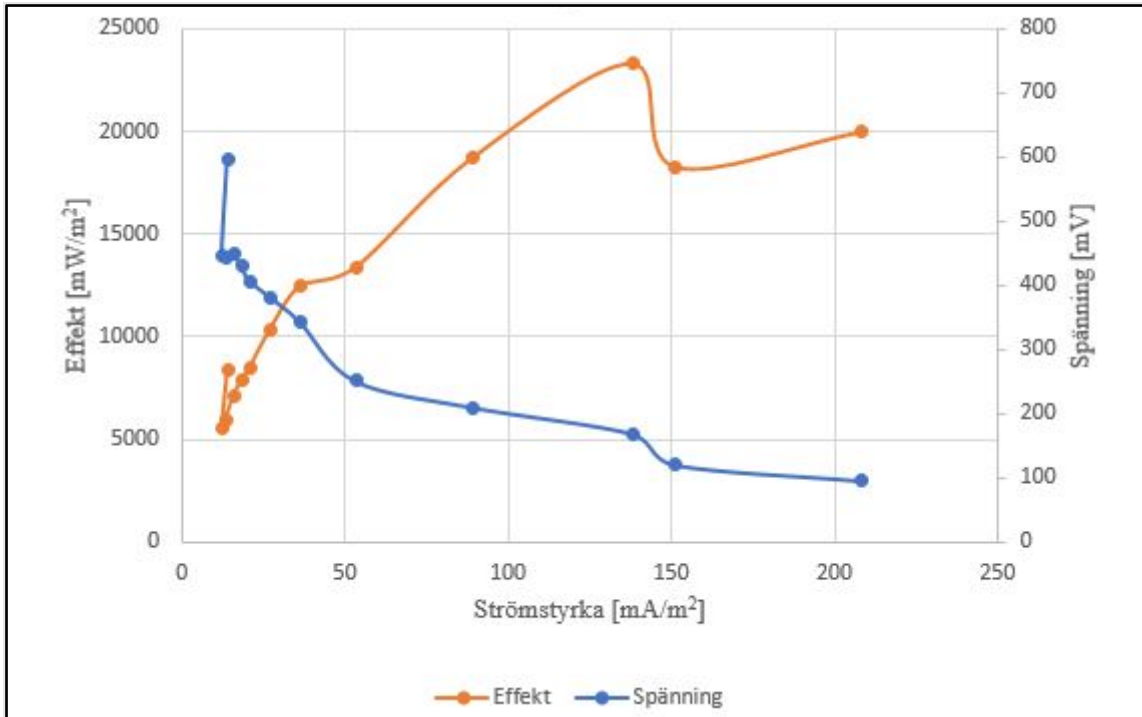
Två olika mätningar gjordes och de presenteras både i tabeller och i polariseringskurvor (Tabell 5 och 6) och (Figur 10 och 11). Alla redovisade strömstyrkor är beräknade med Ohms lag, spänningen är uppmätt.

Den första mätningen (Tabell 5) gjordes för att ta reda på om bränslecellerna kan driva leksaken och då är endast den initiala strömpulsen relevant eftersom det är denna som sätter igång leksaken. Värdena i tabell 5 är direkt jämförbara med leksakens värden i tabell 3, därmed framgår det att bränslecellen inte kan driva leksaken då den levererar 310  $\mu\text{A}$  vid 620 mV eller 175  $\mu\text{A}$  vid 700 mV. Detta kan jämföras med leksakens värden på 285  $\mu\text{A}$  vid 700 mV (Tabell 3).

Tabell 5. Initial spänning och ström ur seriekopplade bränsleceller vid pulsbelastning. 750 mV i O.C.

Resistans [ $\Omega$ ]	Ström [ $\mu\text{A}$ ]	Spänning [mV]
$\infty$	-	750
4000	175	700
2000	310	620
900	663	597
800	583	446
700	633	443
600	746	448
500	860	430
400	983	407
300	1273	382
200	1710	343
100	2510	251
50	4200	210
26	6500	169
17	7117	121
9,8	9800	96

Figuren nedan beskriver hur effektuttaget och strömstyrkan varierar med spänningen.

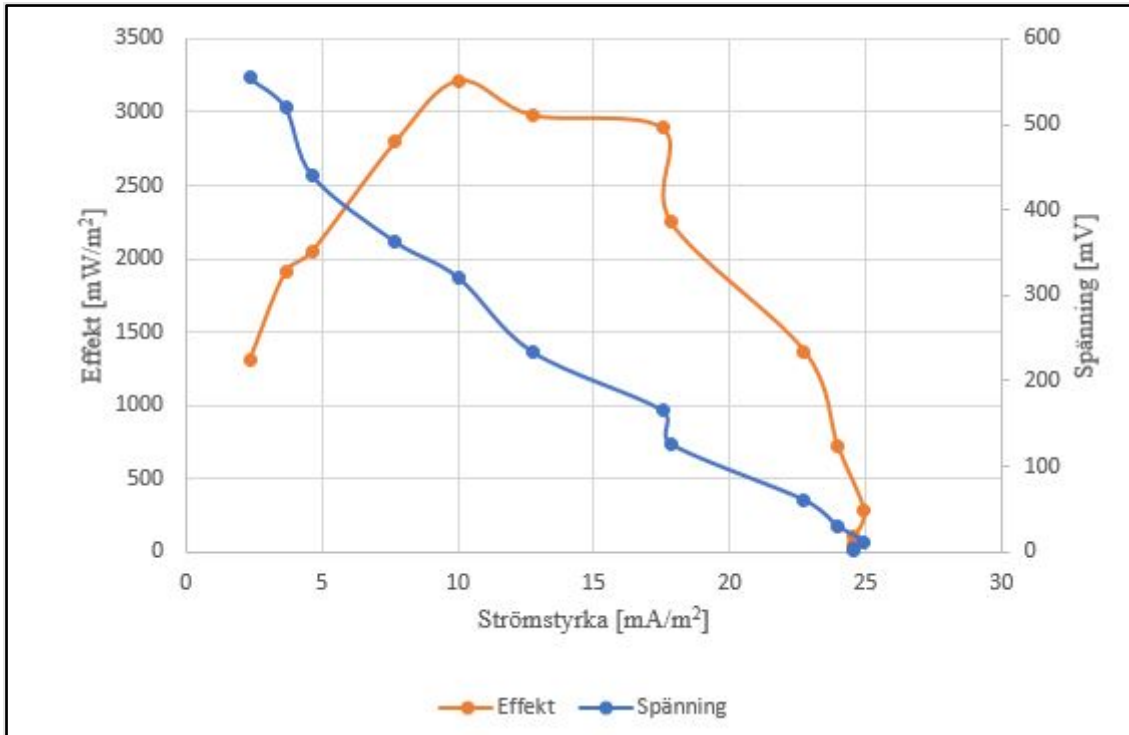


Figur 10. Polariseringskurva för två seriekopplade bränsleceller vid kort pulsbelastning (<math><0,5\text{ s}</math>). 750 mV i O.C. där arean är katodytan.

En andra mätning gjordes för att ta reda på hur stabil strömmen är och om bränslecellerna kan användas för andra ändamål som kräver ett mer kontinuerligt ström uttag. Spänningen mättes efter några sekunders belastning med motstånd på 1,9-5000  $\Omega$ . Tabell 6 och figur 11 visar resultaten över detta.

Tabell 6. Uttag av strömstyrka och spänning vid långvarig pulsbelastning. Två seriekopplade bränsleceller, 750 mV i O.C.

Resistans [ $\Omega$ ]	Ström [ $\mu\text{A}$ ]	Spänning [mV]
$\infty$	-	750
5000	111	555
3000	173	520
2000	220	440
1000	363	363
680	472	321
390	600	234
200	825	165
150	840	126
56	1071	60
26,6	1128	30
9,8	1173	11,5
3,8	1158	4,4
1,9	1158	2,2



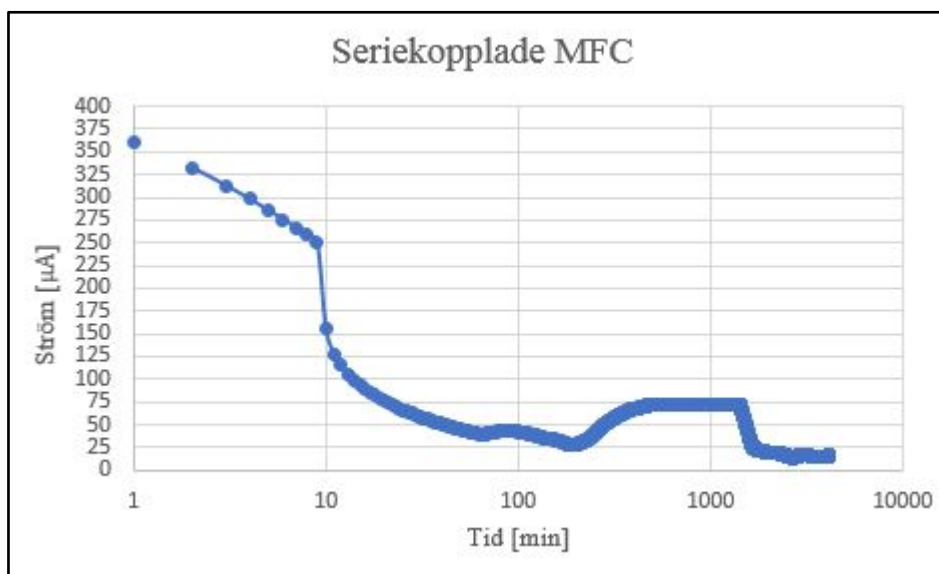
Figur 11. Polariseringskurva för två seriekopplade bränsleceller vid lång pulsbelastning (10 s). 750 mV i O.C. där katodytan är arean i m<sup>2</sup>.

Det erhålls ett mer stabilt effektuttag vid kort (puls)belastning gentemot lång belastning vilket illustreras i figur 10 och 11. Framförallt är det en stor skillnad i beteendet hos effektuttaget, där det stiger kontinuerligt vid kort belastning medan det ökar för att sedan sjunka kraftigt vid lång belastning.

För kort belastning är effektuttaget som högst drygt 20 000 mW/m<sup>2</sup> (Figur 10). Som framgår sjunker spänningen kraftigt i början för att sedan efter 300 mV bli mer stabil. Vid längre belastning erhålls under en kort intervall, ett stabilt effektuttag på ca 3000 mW/m<sup>2</sup> (Figur 11).

### 5.3.1. Ström och spänning över tid

I figur 12 kan strömmen över tid avläsas för två seriekopplade bränsleceller, där en mätning sker varje minut. Bränslecellerna hade en potential på 675 mV O.C. innan mätningen startade. Cellen laddar ur sig kraftigt efter tio minuter, för att sedan vara helt urladdad efter ca 4000 minuter.



Figur 12. Två seriekopplade bränsleceller inkopplade till en resistor på 1000  $\Omega$ , spänningen varierar likadant fast med en faktor 1000, p.g.a. motståndet.

I tabellen nedan redovisas samma värden som ovan fast i tabellform, det är främst effekten som är relevant vid tillämpning av MFC. Volymen nedan avser volym vätska i cellen.

Tabell 7. Mätresultat över 4 dagar från två seriekopplade bränsleceller inkopplade till en resistor på 1000  $\Omega$ .

	Effekt [ $\text{W}/\text{m}^3$ ]	Spänning [ $\text{V}/\text{m}^3$ ]	Ström [ $\text{mA}/\text{m}^3$ ]
Medel	1,5	38,5	38,5
Max	86	293	293
Min	0,1	9,9	9,9

### 5.3.2. Inkoppling till leksak

Vid inkoppling till leksaken sjönk spänningen till ca 600 mV och en antydning till rörelse kunde observeras hos leksaken.

### 5.4. Coulombisk effektivitet

Coulombiska effektiviteten beräknas snarligt enligt ekvation 7 med indata i avsnitt 3.5.3.3, där  $b = 8 \text{ mol } e^-/\text{mol acetat}$ , men också genom att dividera med koncentrationen acetat per liter.  $I$  i ekvation 7 är graferna i Figur 8, 9 och 12 som integrerats över tiden. Uträkningen avviker även från ekvation 7 då ingen hänsyn har tagits till COD, alltså är denna inte med. Då erhålls resultaten i tabell 8 nedan.

Tabell 8. Coulombisk effektivitet.

	MFC-1 med Pt	MFC-2 utan Pt	Cylindrisk MFC
Coulombisk effektivitet [%]	0,43	0,32	0,053

## 6. Diskussion

Utifrån resultaten har flera frågeställningar behandlats i detta avsnitt vilka är problem och utveckling av design, reflektion över metod samt resultat.

### 6.1. Problem och utveckling av vår design

Det största problemet studien hade var läckage på den ena cylindriska bränslecellen som byggdes. Detta hade sitt ursprung i att stål nätet hade en något stor diameter vilket gjorde att det inte riktigt gick in i plastlocket och på så sätt blev det inte helt tätt. Detta skapade ojämna mätningar över tid då vätskevolymen i cylindern förändrades och det gjorde att det var svårt att se en tydlig skillnad mellan de två cylindriska bränslecellerna i fråga om stabila spänningar. Den cylindriska bränslecellen med platina visade stundtals på högre spänning än den utan, vilket kan betyda att platina har stor påverkan.

Ett annat problem som uppstod var att i övre delen av bränslecellen, trots att det var designat för att få det lufttätt, var anaerobisk miljö svår att uppnå. När bränslecellen dessutom läckte kom ännu mer luft in vilket antagligen påverkade prestandan.

Designen kan utvecklas genom att åtgärda läckaget samt använda mer platina för högre spänningsuttag. Detta har dock varit omdiskuterat då platina är känsligt för förgiftning av svavelanjoner och tenderar till att ha kortare livslängd, vilket skulle få konsekvenser i framtiden vid uppskalning av modellen.

### 6.2. Reflektion över metod

Mycket av ovanstående nämnda problem gav konsekvenser på experimenten, vilket skapade både en upphackad struktur och förvirring. Innan start fanns en god förståelse om vad som skulle göras och vilket som var prioriterat att göra först. Återigen var det läckaget som skapade förseningar och opålitliga resultat. Flera tätningsförsök gjordes och även påfyllnader, vilket resulterade i förseningar i tidsplanen.

Det vi skulle fokusera mer på är att ha en tydligare struktur och ha en mer ingående plan på vilka mätningar som skall göras när.

Det var även stora oklarheter om leksakens egenskaper och när vi skulle få mäta dessa. Eftersom dessa parametrar är väsentliga för dimensioneringen av bränslecellerna visste vi inte vilka värden vi skulle sikta på. När resultaten från leksaken kunde observeras var konstruktionen redan klar och mycket tid hade passerat.

Vad som behövs för att generera maximal spänning rådde osäkerhet i fråga om påfyllning av vätska. För att undersöka vilken blandning av vätska samt vid vilken tidpunkt som MFC gav bäst prestanda gjordes ett flertal försök, utan tydliga resultat. Då det ofta var svårt att veta om spänningen skulle öka eller sjunka var det svårt att förutspå optimal tidpunkt för mätning. T.ex. har spänningen i öppen krets varierat mellan 600-950 mV, vilket är vad vi utgått ifrån vid val av mätningstillfälle.

Bättre resultat skulle kunna erhållas genom ett mer noggrant tillvägagångssätt. Genom att låta MFC:n producera ström över en lägre tid innan påbörjad mätning skulle ev. en



stabilare spänning erhållas. I och med läckaget har detta varit svårt att uppnå p.g.a. påfyllning av ny vätska.

Likasa reagerade bränslecellerna mycket olika gällande spänning vid olika tillfällen. Ibland ökade potentialen initialt medan ibland tog det timmar eller dagar. Kunskaperna om detta var inte tillräckligt stora vilket gav stor osäkerhet i mätmetoden och det påverkar negativt på resultaten.

### **6.3. Utvärdering av resultat**

Följande avsnitt utvärderar de uppmätta resultaten från både leksaken och de olika bränslecellerna.

#### **6.3.1. Leksakens egenskaper**

Eftersom den maximala strömstyrkan endast varar under en kort tid (en puls) kan det betyda att spänningen inte hinner sjunka nämnvärt hos cellen, då denna puls till största del dras ur kondensatorn och inte direkt belastar bränslecellen. Detta medför att den inte behöver ha stor kapacitet d.v.s. klara av långvarig belastning.

Resultaten visar att det krävs en stabil spänning på minst 700 mV samt en maximal strömstyrka på minst ca 290  $\mu\text{A}$  för att kunna erhålla en rörelse hos leksaken. För maximal rörelse hos leksaken krävs en strömstyrka på ca 1300  $\mu\text{A}$  samt en spänning på 1200 mV, detta levererar de cylindriska bränslecellerna vid en belastning på 300  $\Omega$  men med en spänning på endast drygt 380 mV. Detta betyder att spänningen är den begränsande faktorn. Genom att ha fyra bränsleceller till (totalt sex stycken) som seriekopplas skulle både spänning och strömstyrka vara tillräcklig för maximal rörelse, då vi får ca 1200mV. Detta då två MFC ger 380 mV, fyra ger då 760 mV och sex 1140 mV.

#### **6.3.2. Resultat från MFC**

De kubiska bränslecellerna visar skillnad mellan MFC med platina (MFC-1) jämfört med den utan (MFC-2), se figur 8 och 9. Här visar MFC-1 en högre kapacitet eftersom den saknar puckeln mellan 3000 och 7000 minuter och istället visar på en stabil ökning i spänning, den har även större topppotential.

Den cylindriska bränslecellen med platina hade störst läckage och har trots detta stundtals visat på högre potential än den utan platina.

De cylindriska bränslecellerna har en högre och stabilare spänning vid pulsbelastning gentemot längre belastning. Som figur 10 visar rasar spänningen kraftigt vid längre belastning vilket medför ett relativt dåligt effektuttag. Då spänningen hinner återhämta sig vid pulsbelastning uppstår inte samma tendens till lågt effektuttag. Slutsatsen blir att de cylindriska bränslecellerna har dålig kapacitet och är ej lämpliga för långvarig belastning. Det råder dock stor osäkerhet kring detta då problemen beskrivna i 6.2 påverkar stort.

De cylindriska bränslecellerna producerar ca 3  $\text{W}/\text{m}^2$  vid långvarig belastning och 20  $\text{W}/\text{m}^2$  vid pulsbelastning, vilket framgår i figur 10 och 11. Detta visar att designen är mer lämplig för pulser, alltså att driva leksaken.

De kubiska bränslecellerna har en bättre spänning än de cylindriska. Tidigare nämndes det att de har 80 gånger mindre katodyta per volym vätska. Som framgår i tabell 4 ger de kubiska bränslecellerna en medeleffekt på  $7,8 \text{ W/m}^3$  som högst, jämfört med de cylindriska bränslecellernas  $1,5 \text{ W/m}^3$ . Även den Coulombiska effektiviteten är högre i de kubiska MFC, där den med platina har högre effektivitet än den utan.

Som tidigare nämnt sjönk spänningen kraftigt i början vid pulsbelastning, figur 10. Detta beror troligtvis till största del på mätmetoden. Då spänningen mättes med en multimeter som reagerade långsamt samt att belastningstiden varierade mellan gångerna erhöles ojämnt resultat.

Den låga prestandan hos de cylindriska bränslecellerna är oväntad då de i teorin borde ha större potential. Den stora skillnaden mellan de två designerna är att den cylindriska har större katod gentemot anod medan den kubiska har större anod i förhållande till katod. Som nämnts tidigare har storleken på anod resp. katod stor inverkan där de båda kan begränsa prestandan.

De kubiska bränslecellerna har mer jämt förhållande mellan anod- respektive katodyta och med "tofsen" inräknat är anoden tio gånger större än katoden. På den cylindriska bränslecellen är förhållandena tvärt om, där katodytan är 20 gånger större än anodytan. Detta ligger troligtvis också till grund varför ett större effektuttag kan tas ur de kubiska MFC, då det inte är något som blir begränsande av anoden eller katoden. Det finns även risk att det ej är syrefria förhållanden vid anoden vilket också påverkar prestandan. Detta är dock svårt att mäta och jämföra varför det mer får ses som en reflektion.

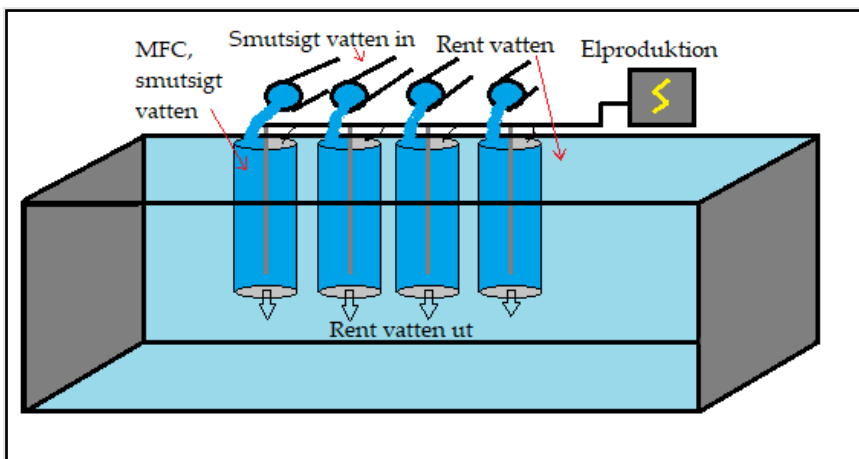
#### 6.3.2.1 Jämfört med tidigare studier

I Rabaey:s studie uppmättes en medeleffekt på  $8 \text{ W/m}^3$  medan det i vår studie uppnåddes  $1,5 \text{ W/m}^3$ . Det framgår dock inte i Rabaey:s studie vid vilket motstånd effekten har mätts, vilket kan bli missvisande. Den markanta skillnaden mellan vår design och den i studien använda är anoden som för oss har mycket mindre yta. Då Rabaey et al. använder lösta kolpartiklar som anod återfås större kontaktyta mellan anod och vätska i cellen.

### 6.4. Användning av cylindrisk MFC i vattenreningsverk

Även om den cylindriska bränslecellen är mindre effektiv än en kubisk MFC som resultaten från studien visar så är den dock enklare att implementera i andra avseenden än vad som görs i denna studie.

Största utvecklingsområdet är dock att få till ett bra sätt där vattnet kan fyllas på och tömmas automatiskt, och tack vare det vattentäta tyget kan bränslecellen enkelt användas i ett reningsverk under vatten. Det lösta syret i vattnet diffunderar in genom tyget och kolfibern vilket betyder att smutsigt vatten kan föras in i cellen, renas och sedan släppas ut efter en viss tid då vattnet är rent, se Figur 13. Detta har dock inte denna studie valt att fokusera på utan är ett framtida utvecklingsområde.



Figur 13. Exempel på hur den cylindriska MFC-designen kan användas i ett vattenreningsverk.

Det är dock inte nödvändigt att ha bränslecellerna nedsänkta i vatten utan istället direkt fylla de med avloppsvatten och sedan föra vidare detta. Genom att optimera miljön utanför katoden, t.ex. att ha en sluten tank runt om bränslecellen, ökar effektiviteten ytterligare.

Vad som måste tas i beaktning gällande produktion i stor skala, när lokala föroreningar hotar den biologiska mångfalden, är att säkerställa att produktion och material till bränslecellen sker på ett etiskt och miljövänligt sätt och så att inte mer energi går till tillverkning av MFC än vad som kan utvinnas.

Materialen som användes i studien är kontroversiella, platina utvinns för det mesta i Sydafrika och brytningen orsakar luftföroreningar som skadar både människor och annat levande (Björnsson, 2018). Teflon är ett högfluorerande ämne (PFAS), bryts inte ner och skadar leverfunktionen samt reproduktionsförmåga hos människor och andra djur (Naturskyddsföreningen, 2019).

Trots att de här materialen är till godo för MFC måste produktionen av dem säkerställas så att luftföroreningar inte förekommer, eller så att teflon inte kommer ut i vattendrag. Bränslecellerna skulle kunna vara en ny energikälla och minska koldioxidutsläppen, men det får inte vara på bekostnad av andra ekosystem.

#### 6.4.1. Andra tillämpningar i samhället

Mikrobiella bränsleceller har som tidigare nämnt flertalet olika användningsområden. Ett av de största efter användning i reningsverk är att ha MFC som ett batteri. Genom att t.ex. samla smutsvatten från badrum eller kök i en behållare kan energi utvinnas och lagras för användning till belysning i badrummet. Eller att ha en liten MFC som fungerar som en s.k. "power bank" till mobiltelefonen där bakterier kan användas för att ladda telefonen. Då bränslecellen är vattentät betyder det att den även fungerar att ha i byxfickan, sedan när "batteriet" är slut, d.v.s. när näringslösningen eller bakterierna är slut, fylls den enkelt på med ny näringslösning eller smutsvatten hemifrån. Alla dessa saker som MFC kan användas till ökar även människors miljömedvetenhet.

## 7. Slutsats

Mikrobiella bränsleceller har visat sig vara ett bra alternativ för att producera energi till flertalet olika tillämpningar. Det finns stor utvecklingspotential i att optimera bränslecellerna och som denna studien visat finns det även en stor variation på design, där det också finns utrymme för utveckling. En cylindrisk MFC har ett förhållandevis högt effektuttag gentemot volymen den upptar, vilket gör den mer yteffektiv än en kubisk. Syftet med denna studien var att driva en leksak, vilket inte riktigt uppnåddes men genom att ha kunnat optimera saker som design, mätmetod och näringslösning skulle ett lyckat resultat med stor säkerhet uppnått. Största problemen som resulterade i lågt effektuttag på endast  $1,5 \text{ W/m}^3$  är troligtvis läckage av näringslösning och inte lufttätt vid anoden samt för liten anod. Genom att ha en högre noggrannhet vid mätning och bättre mätutrustning samt mäta vid rätt tillfälle skulle få positiva effekter på effektuttaget.

Användningsområdet för bränslecellerna är även det påvisat till att vara mycket brett där de kan användas på flertalet olika sett i ett reningsverk eller i människors vardag. Att arbeta med mikrobiella bränsleceller har visat sig vara svårt, då de reagerar väldigt känsligt på olika saker. Detta har satt stor press, större än vad som förutsetts, på mätmetod samt konstruktion och således bör större uppmärksamhet läggas på områdena vid framtida studier.

I frågan om syftet uppfyllts så bör bränslecellerna i teorin kunna driva och åstadkomma en rörelse hos leksaken vid optimala förhållanden men i praktiken påvisades en knapp rörelse. Då bränslecellen hade ca 600 mV vid inkoppling till leksaken betyder det att ca 100 mV saknades för att komma upp i korrekt spänning. Dock finns, baserat på utveckling av resultat samt metod, större potential i prestanda än vad som visats i denna rapport. Genom att mäta på bränslecellen och driva leksaken under perfekta omständigheter skulle det med säkerhet vara en rörelse hos leksaken.

Kapaciteten hos en MFC och hur pålitlig den är som energikälla måste studeras mer noggrant för att se om den kan tillämpas i samhället. Förarbetet, d.v.s. innan mätningar görs och en stabil spänning kan utvinnas är viktigt och påverkar resultatet kraftigt. Detta är något som kunde göras bättre i denna studie och får också ses som ett utvecklingsområde för framtida studier.

Avslutningsvis så finns det stora möjligheter för mikrobiella bränsleceller även om syftet med denna studie inte uppfylldes.

## Referenser

- Björnsson, O. (2018). *Carrying the Costs*. Swedwatch.
- Bond, D. R., Strychartz-Glaven, S. M., Tender, L. M., & Torres, C. I. (2012). On ElectronTransport through Geobacter Biofilms. *ChemSusChem*(5), 1099-1105. doi:10.1002/cssc.201100748
- Cheng, S., Liu, H., & Logan, B. (2006, Februari 18). Increased Power Generation in a Continuous Flow MFC with Advective Flow through the Porous Anode and Reduced Electrode Spacing. *Environmental Science and Technology*, 40(7), pp. 2426-2432.
- Cheng, S., Liu, H., & Logan, B. E. (2006). Increased performance of single-chamber microbial fuelcells through an improved cathode structure. *Electrochemistry Communications*, 489-494.
- Deval, A., Bhagwat, A. M., & Dikshit, A. K. (2014, Juni). Importance of Mixed culture in Generation of Electricity från Anaerobically Digested Distillery Wastewater through Microbial fuel cell. *Advances in Bioresearch*, 80-86.
- Du, Z., Li, H., & Gu, T. (2007). A state of the art review on microbial fuel cells: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy. *Biotechnology Advances*, 464-482.
- Forrestal, C., Haeger, A., Dankovich, L., Cath, T. Y., & Jason, Z. (2016). A liter-scale microbial capacitive deionization system for the treatment of shale gas wastewater. *Environ. Sci.: Water Res. Technol.*, 353-361.
- Gil, G., Chang, I., Kim, B., Kim, M., Jang, J., Park, H., & et al. (2003). Operational parameters affecting the performance of a mediatorless microbial fuel cell. *Biosensors and Bioelectronics*.
- Haselkorn, A. (2002, Augusti 28). Microbial Fuel Cells to Power Future. *The Daily Californian*.
- Jang, J., Pham, T., Chang, I., Kang, K., Moon, H., Cho, K., & et al. (2004). Construction and operation of a novel mediator- and membraneless micorbial fuel cell. *Process biochemistry*.
- Kim, B., Park, H., Kim, H., Kim, G., Chang, I., Lee, J., & et al. (2004). Enrichment of microbial community generating electricity using a fuel-cell type electrochemical cell. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*
- Li, W.-W., Yu, H.-Q., & Rittmann, B. E. (2015). Reuse water pollutants. *Nature*, 29-31.
- Lindvall, S. (2016). *Avloppsrening med mikrobiella bränsleceller*. Stockholm: Kungliga Tekniska högskolan.
- Liu, H., & Logan, B. E. (2004). Electricity generation using an air-catode single chamber microbial fuel cell in the presence and absence of a proton exchange membrane. *Environ. Sci. Technol.*, 4040-4046.

- Logan, B., Hamelers, B., Rozendal, R., Schröder, U., Keller, J., Freguia, S., . . . Rabaey, K. (2006). Microbial Fuel Cells: Methodology and Technology. *American Chemical Society*, 40(17).
- Min, B., & Logan, B. E. (2004). Continuous electricity generation from domestic wastewater and organic substrates in a flat plate microbial fuel cell. *Environmental Science Technology*, 4900-4904.
- Modin, O. (2017, Juli 11). *OM VATTEN*. Retrieved Maj 2, 2019, from [www.omvatten.se](http://www.omvatten.se)
- Moon, H., Chang, I. S., & Kim, B. H. (2006). Continuous electricity production from artificial wastewater using a mediator-less microbial fuel cell. *Bioresource Technology*.
- Nationalencyklopedin. (2019, 05 14). *Abiotisk*. Retrieved from <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/abiotisk>
- Naturskyddsföreningen. (2019, 03 28). *PFAS- vår tids värsta miljögift?* Retrieved from Naturskyddsföreningen: <https://www.naturskyddsforeningen.se/vad-ar-pfas#conversion-1311052391>
- Nevin, K. P., Richter, H., Covalla, S. F., Johnson, J. P., Woodard, T. L., Orloff, A. L., . . . Lovely, D. R. (2008). Power output and coulombic efficiencies from biofilms. *Environmental Microbiology*, 2505-2514.
- Oh, S., Min, B., & Logan, B. (2004). Cathode performance as a factor in electricity generation in microbial fuel cells. *Environmental Science Technology*.
- Park, D. H., & Zeikus, J. G. (1999). Utilization of electrically reduced neutral red by *Actinobacillus succinogenes*: physiological function of neutral red in membrane-driven fumarate reduction and energy conservation. *Journal of Bacteriology*.
- Park, D. H., & Zeikus, J. G. (2000). Electricity generation in microbial fuel cells using neutral red as an electronophore. *Appl. Environ. Microb.*
- Park, D. H., & Zeikus, J. G. (2002). Impact of electrode composition on electricity generation in a single-compartment fuel cell using *Shewanella putrefaciens*. *Applied Microbiology Biotechnology*, 58-61.
- Park, D. H., & Zeikus, J. G. (2003). Improved fuel cell and electrode designs for producing electricity from microbial degradation. *Biotechnology Bioengineering*.
- Pham, T. H., Jang, J. K., Chang, I. S., & Kim, B. H. (2004). Improvement of cathode reaction of a mediatorless microbial fuel cell. *Microbial Biotechnology*.
- Poddar, S., & Khurana, S. (2011). Geobacter: The Electric Microbe! Efficient Microbial Fuel Cells to Generate Clean, Cheap, Electricity. *Indian Journal of Microbiology*, 240-241.
- Rabaey, K., Clauwaert, P., Aelterman, P., & Verstraete, W. (2005). Tubular Microbial Fuel Cells for Efficient Electricity Generation. *Environmental Science and Technology*, 8077-8082.
- Rabaey, K., Lissens, G., Siciliano, S. D., & Verstraete, W. (2003). A microbial fuel cell capable of converting glucose to electricity at high rate and efficiency. *Biotechnology Letters*, 1531-1535.

- Ren, L., Yongtae, A., & Logan, B. (2014). A Two-Stage Microbial Fuel Cell and Anaerobic Fluidized Bed Membrane Bioreactor (MFC-AFMBR) System for Effective Domestic Wastewater Treatment. *Environmental Science & Technology*, 4199-4206. doi:10.1021/es500737m
- Santoro, C., Arbizzani, C., Erable, B., & Ieropoulos, I. (2017). Microbial fuel cells: From fundamentals to applications. A review. *Journal of Power Sources*, 356, pp. 225-244.
- Schroder, U., Nieben, J., & Scholz, F. (2003). A generation of microbial fuel cells with current outputs boosted by more than one order of magnitude. *Angew Chem Int Ed*.
- Shukla, A. K., Suresh, P., Berchmans, S., & Rajendran, A. (2004). Biological fuel cells and their applications. *Current science*, 455-468.
- Sun, J.-Z., Kingori, G., Si, R.-W., Zhai, D.-D., Liao, Z.-H., Sun, D.-Z., . . . Yong, Y.-C. (2015). Microbial fuel cell-based biosensor for environmental monitoring: a review. *Water Science & Technology*, pp. 801-809. doi:doi: 10.2166/wst.2015.035
- Ueoka, N., Sese, N., Sue, M., Kouzuma, A., & Watanabe, K. (2016). Sizes of Anode and Cathode Affect Electricity Generation in Rice Paddy-Field Microbial Fuel Cells. *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*, 10-15.
- Xu, L., Zhao, Y., Doherty, L., Hu, Y., & Hao, X. (2015). The integrated processes for wastewater treatment based on the principle of microbial fuel cells: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*.