

LULEÅ GYMNASIESKOLA  
Naturvetenskapsprogrammet  
Gymnasiearbete

# Mikrobiella bränsleceller

En studie om mikrobiella bränslecellers användning  
för elproduktion från svartvatten

Henneke Herrmann  
NA3A/2024  
Handledare: Kristoffer Nordevist  
Handledare LTU: Suman Bajracharya

## Sammanfattning

Världen står idag inför stora miljö- och klimatproblem och hållbar energiproduktion är på grund av detta viktigare än någonsin. Ett steg på vägen mot en hållbar framtid kan vara mikrobiella bränsleceller (MFC) som med hjälp av mikroorganismer som bryter ned organiskt material, kan producera en elektrisk ström. För att ge en grundläggande förståelse för funktionen av en MFC har relevant litteratur sammanställts i ett avsnitt.

Syftet med studien var att undersöka hur mikrobiella bränsleceller kan användas för att utvinna elektrisk energi ur svartvatten. För att få svar på detta konstruerades en FPMFC och en H-type MFC. FPMFC:n uppvisade tidigt läckor vilket innebar att endast H-type MFC:n kunde användas för att genomföra försöket. Till denna tillsattes svartvattnet och MFC:ns prestanda mättes med ett potentiostat under en period på 24 dagar varav de första 14 skedde på en bestämd spänning och övriga dagar på MFC:ns naturliga nivå. Förutom detta mättes även regelbundet anodkammarens COD-värde.

Utifrån tidsperioden mellan dag 15 och 24 beräknades sedan olika parametrar som analyserades och jämfördes med en tidigare studie. Den Coulombiska effektiviteten beräknades till 63,2% vilket var ett högt värde jämfört med den tidigare studien medan den maximala effekttätheten, som beräknades till 31 mW/m<sup>2</sup>, var på ungefär samma nivå som studien den jämfördes med. Detta är ett positivt resultat som visar på att svartvatten fungerar bra som substrat.

Förutom ovan nämnda mätningar gjordes även ett försök med att driva en LED-lampa med MFC:n. För att få lampan att lysa krävdes att den kopplades ihop med en kondensatoruppsättning som under korta tidsintervaller fick lampan att blinka. Utifrån detta drogs slutsatsen att MFC:n inte ger någon särskilt användbar ström och spänning i denna skala men att man genom att serie- eller parallellkoppla flera reaktorer eller eventuellt öka reaktorns storlek kan öka effekten.

Resultatet av studien besvarade frågeställningarna men det krävs ytterligare forskning om exempelvis MFC:ns effekter på svartvattnet eller möjligheten att använda tekniken på en större skala för att avgöra hur MFC:er kan tillämpas i praktiken.

## Innehåll

<b>1</b>	<b>Inledning</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Syfte</b>	<b>3</b>
2.1	Frågeställningar	3
<b>3</b>	<b>Bakgrund</b>	<b>3</b>
3.1	Mikrobiella bränsleceller	3
3.1.1	Funktion av MFC	4
3.1.2	Beräkna cellspänning	7
3.2	Mätmetoder	7
3.2.1	Ström, spänning, effekt och effekttäthet	7
3.2.2	COD och Coulombisk effektivitet	8
3.3	Material och konstruktion	9
3.3.1	Konstruktion	9
3.3.2	Anod	9
3.3.3	Katod	10
3.3.4	Membran	11
3.4	Mikroorganismer	12
3.4.1	Elektronöverföring till anoden	12
3.5	Svartvatten	13
3.6	Nuvarande tillämpning av MFC:er i vattenreningen	14
<b>4</b>	<b>Metod</b>	<b>15</b>
4.1	Förberedelse av reaktorn	15
4.1.1	FPMFC	15
4.1.2	Konstruktion av H-type MFC	16
4.1.3	Näringslösning	20
4.2	Genomförande av försök	21
<b>5</b>	<b>Resultat</b>	<b>22</b>
5.1	Ström	22
5.2	Spänning	23
5.3	Beräkning av effekt och effekttäthet	23
5.4	COD	23
5.5	Beräkning av Coulombisk effektivitet	24
5.6	LED-lampa driven av MFC	25

<b>6</b>	<b>Diskussion .....</b>	<b>26</b>
6.1	Utvärdering av prestanda.....	26
6.2	Utvärdering av metod .....	26
6.3	Applicering av MFC:er i samhället.....	27
6.4	Förslag på fortsatt forskning .....	27
	<b>Referenser .....</b>	<b>28</b>
	<b>Källkritik .....</b>	<b>29</b>

# 1 Inledning

Samhället befinner sig idag i en situation där hållbar energiproduktion är viktigare än någonsin. Anledningen är den enorma klimatuspvarmningen och andra allvarliga miljöproblem som är konsekvenser av vårt ohållbara levnadssätt. Det finns redan nu många hållbara energikällor som dock inte används i tillräckligt stor utsträckning.

Ett lösningsalternativ hade varit att utöka användningen av de redan befintliga hållbara energikällorna samtidigt som nya innovativa energikällor tillkommer. Ett exempel på en ny hållbar energikälla, som har fått allt mer uppmärksamhet, är mikrobiella bränsleceller som utviner elektrisk energi ur kolhydrater eller mer komplexa kemiska föreningar som finns i exempelvis avloppsvatten (Rabaey & Verstraete, 2005).

Reningen av avloppsvatten från hushåll kräver stora mängder energi, upp till 3% av världens energiförbrukning (Li, et al., 2015), (IWA, 2021). Om mikrobiella bränsleceller hade använts som ett steg i reningsprocessen hade det möjligen förbättrat denna siffra.

## 2 Syfte

Syftet med denna studie är att undersöka hur mikrobiella bränsleceller kan användas för att utvinna elektrisk energi ur svartvatten. I undersökningen kommer en liten tvåkammarmodell (0,28 l/kammare) användas.

### 2.1 Frågeställningar

Frågeställningarna som kommer användas för studien är följande:

Hur fungerar svartvatten som substrat i en mikrobiell bränslecell?

Hur stor ström och spänning får man i en liten reaktor som drivs av svartvatten?

Vad blir effekten och effekttätheten?

Hur stor Coulombisk effektivitet får den mikrobiella bränslecellen då den drivs med svartvatten?

Kan den mikrobiella bränslecellen som drivs av svartvatten användas för att driva en elektrisk komponent, exempelvis en LED-lampa?

## 3 Bakgrund

Detta avsnitt beskriver den teori som ligger till grund för studien. Det beskrivs hur en mikrobiell bränslecell fungerar, hur val av elektrodmaterial och konstruktion av cellen påverkar dess prestanda och hur mikroorganismer används för att skapa en elektrisk ström. Förutom det presenteras några metoder att mäta och analysera bränslecellens prestanda. Dessutom beskrivs kort vad svartvatten är samt hur mikrobiella bränsleceller kan tillämpas i dagens samhälle.

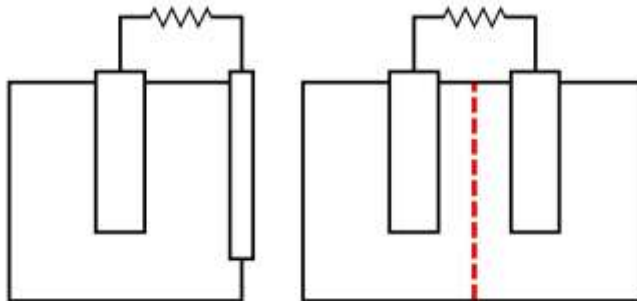
### 3.1 Mikrobiella bränsleceller

En mikrobiell bränslecell (MFC – från engelskans "microbial fuel cell") är i stort sett uppbyggd som ett batteri. Skillnaden är att substratet lagras utanför cellen så att den kan fyllas på vid behov och på så sätt producera elektrisk energi konstant. Detta fungerar på grund av redox reaktioner som katalyseras av mikroorganismer. Mikroorganismerna använder de organiska substraten för att genomföra cellandning

och därmed producera energi för sin överlevnad samtidigt som de frigör elektroner som kan användas för att producera elektricitet (Swanson, et al., 2008).

### 3.1.1 Funktion av MFC

Det finns olika typer av MFC:er, de två huvudgrupperna, se Figur 1, är enkammarmodeller, som använder sig av endast en kammare kombinerat med en luftkatod, och tvåkammarmodeller. Sist nämnda har fördelen att transporten av ämnen, som syre, mellan kamrarna kan kontrolleras (Flimban, et al., 2019), man kan alltså skapa två olika miljöer för att maximera cellens effekttäthet och förmågor att hantera avloppsvatten (McConville, et al., 2020). Fördelen med enkammarmodeller är den lägre materialkostnaden (Arvidsson, et al., 2019).



Figur 1. En enkammarmodell till vänster och en tvåkammarmodell till höger. Se Figur 2 och 3 för förklaring av de olika delarna. (Författaren)

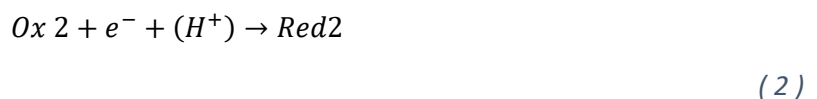
Denna studie kommer fokusera på tvåkammarmodeller, se Figur 2, som består av två kamrarna, 1 och 2, där kammare 1 är anaerob, alltså inte innehåller syre och kammare 2 har ett konstant tillflöde av syre.

I den anaeroba kammaren (kammare 1), se Figur 2, tillsätts ett substrat (ett reduktionsmedel, Red 1) som oxideras, alltså avger en väteatom, det vill säga en proton och en elektron. Oxidationsprodukten (Ox 2) är det som blir över efter oxidationsreaktionen och inte behövs längre. Protonen och elektronen rör sig däremot till kammare 2 där de reducerar ett oxidationsmedel (Ox1) och bildar en reduktionsprodukt (Red 2). Oxidationsmedlet tar alltså upp elektronen och protonen. Denna process kan beskrivas med följande formler:

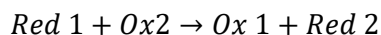
Oxidationsdelen av reaktionen (Kammare 1: anaerob):



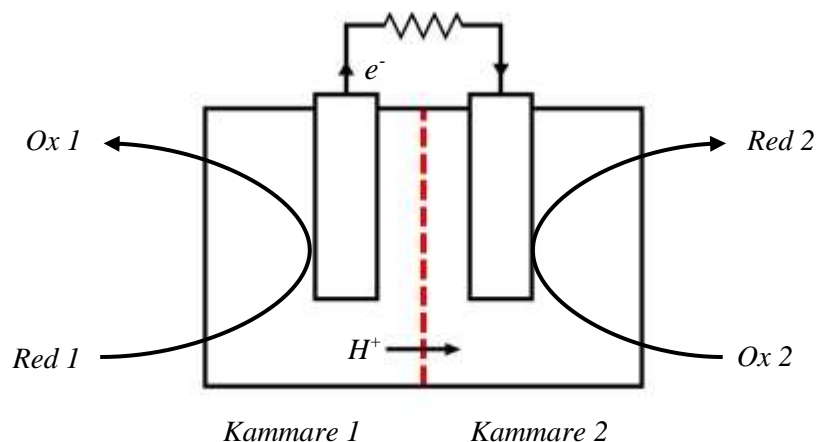
Reduktionsdelen av reaktionen (Kammare 2: aerob):



Den totala redox reaktionen kan då skrivas som:

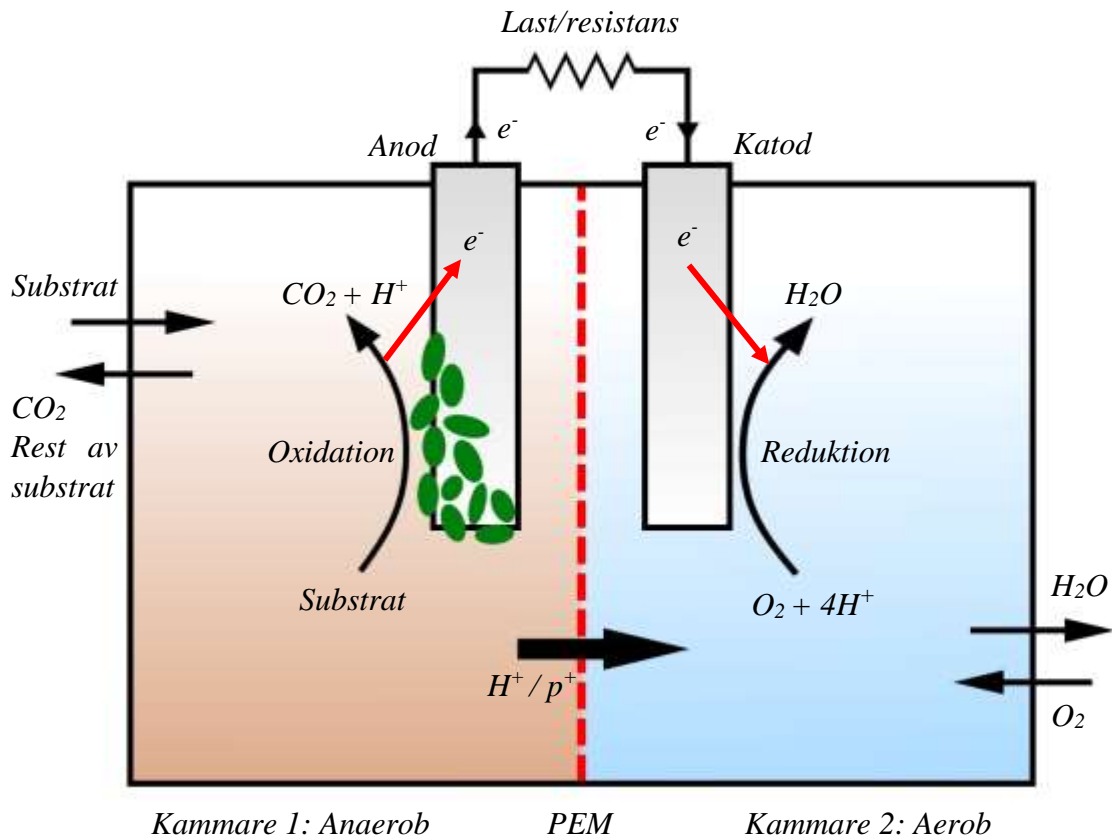


(3)



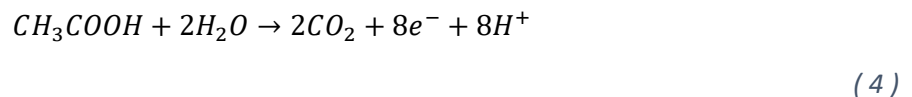
Figur 2. Visualisering av formlerna 1, 2, och 3. (Författaren)

Eftersom oxidationsreaktionen sker i en avskild kammare (kammare 1) kommer elektronerna samlas där vilket innebär att det uppstår en elektrisk potential. Elektronerna kommer att söka sig till den andra kammaren (kammare 2) för att utjämna spänningsskillnaden och tvingas då använda den externa kretsen vilket skapar ett elektronflöde som kan driva en elektrisk apparat, se Figur 2 och 3. Elektronerna når på det sättet kammare 2 och kommer där reducera oxidationsmedlet (vanligtvis syre) tillsammans med vätejonerna (protonerna) som diffunderat till kammare 2 genom membranet (PEM, ur engelskans "proton exchange membrane", ibland även kallat CEM "cation exchange mambrane") som är ett semipermeabelt, alltså delvis genomsläppligt (Arvanitis, et al., 2018), membran som endast släpper igenom positiva joner. En mer kostnadseffektiv lösning är en saltbrygga mellan de två kamrarna (Logan, et al., 2006). Se avsnitt 3.3.4 för mer information om membran.



Figur 3. Visar hur en MFC är uppbyggd, hur ämnen cirkulerar i en MFC och hur separeringen av den anaeroba och aeroba miljön skapar ett elektronflöde. (Författaren)

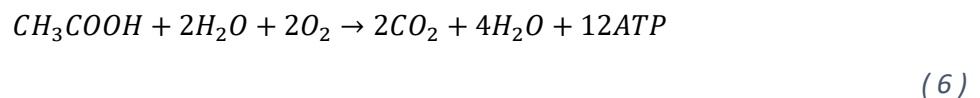
För att bättre förstå MFC:ns funktion följer här ett exempel på en tvåkammarmodell där ättiksyra (HOAc) används som substrat och syre används som oxidationsmedel. Första steget är att ättiksyran oxideras vid anoden enligt



för att, under anaeroba förhållanden, bilda koldioxid samt elektroner och vätejoner/protoner. Sist nämnda tar sig då till kammare 2 och reducerar vid katoden syret enligt



Den totala redoxreaktionen kan i detta exempel skrivas som



(Bajracharya, 2023).



### 3.1.2 Beräkna cellspänning

Spänning eller potentialskillnad definieras som skillnaden i elektrisk potential mellan två punkter och har enheten volt (V). Cellspänningen är skillnaden i potential mellan anoden och katoden och beräknas enligt formeln

$$U_{cell} = E_{katod} - E_{anod} \quad (7)$$

där  $U_{cell}$  är cellspänningen och  $E$  är standard-elektrodpotentialen för elektroderna som beräknas med avseende på en referenselektrod. En referenselektrod som är väldigt populär att använda för experiment är silver-silverklorid (Ag/AgCl) elektroderna, som har en potential på +0,197 V, då den är lätt att använda (Swanson, et al., 2008), (Logan, et al., 2006).

Om anodpotentialen exempelvis är -290mV, katodpotentialen är 800mV och en referenselektrod på ungefär 200mV används blir standard-anodpotentialen

$$E_{anod} = -290mV - 200mV = -490mV \quad (8)$$

och standard-katodpotentialen

$$E_{katod} = 800mV - 200mV = 600mV \quad (9)$$

Därmed blir hela cellspänningen enligt Ekvation 7

$$U_{cell} = 600mV - (-490mV) = 1090mV = 1,09V \quad (10)$$

(Bajracharya, 2023).

Cellspänningen kan mätas med ett potentiostat eller en voltmeter som kopplas till elektroderna. Elektrodpotentialen mäts med en voltmeter som kopplas till en elektrod och referenselektroden. Se avsnitt 3.2 för mer information om mätmetoder.

## 3.2 Mätmetoder

För att undersöka hur väl en MFC presterar kan man mäta flera olika värden, några av dessa beskrivs här nedan. Det beskrivs även hur man kan tolka dessa värden samt hur man kan använda dem för att genomföra beräkningar.

### 3.2.1 Ström, spänning, effekt och effekttäthet

Genom att ansluta MFC:n till ett potentiostat som kopplas till en dator får man möjligheten att undersöka många olika saker som rör MFC:ns prestanda. Däribland MFC:ns ström,  $I$ , och cellspänning,  $U$ . Dessa värden presenteras enklast som graf över tiden.

OCV (från engelskans "open circuit voltage") innebär att kretsen är öppen och inget elektronflöde kan uppstå. Denna spänning är betydligt högre än spänningen i en sluten krets där elektroderna är ihopkopplade och ett elektronflöde uppstår samtidigt som protoner rör sig igenom membranet. Genom

att mäta spänning,  $U_{cell}$  (V), i en sluten krets vid en känd extern resistans,  $R_{ext}$  ( $\Omega$ ), kan strömmen,  $I$  (A) beräknas enligt Ohms lag

$$I = \frac{U_{cell}}{R_{ext}} \quad (11)$$

vilket innebär att ingen mätning av strömmen krävs då man mäter spänning vid en känd resistans (Swanson, et al., 2008).

För att få en bättre bild av MFC:ns prestanda kan man mäta dess effekt,  $P$ , enligt

$$P = U_{cell}I = \frac{U_{cell}^2}{R_{ext}} \quad (12)$$

där  $P$  är effekten i watt, W. Det är även möjligt att beräkna MFC:ns effekt i jämförelse med anodens geometriska area,  $A_{anod}$  ( $m^2$ ). Detta är MFC:ns effekttäthet,  $P_{anod}$  ( $W/m^2$ ) som beräknas enligt

$$P_{anod} = \frac{P}{A_{anod}} \quad (13)$$

vilket ger ett värde i som är användbart för att jämföra MFC:er av olika storlek (Logan, et al., 2006), (Swanson, et al., 2008), (Johansson, et al., 2019).

### 3.2.2 COD och Coulombisk effektivitet

COD (från engelskans "chemical oxygen demand") är mängden syre som behövs för att bryta ned allt organiskt material som finns i ett substrat, exempelvis svartvatten (McConville, et al., 2020). COD mäts i massa per volym och anger ungefär hur mycket substrat som finns i MFC:n, alltså hur stor tillgång mikroorganismerna har till nedbrytbart material. Genom att mäta COD regelbundet och notera att värdet sjunker visar man att mikroorganismerna arbetar.

Genom att mäta förändringen,  $\Delta COD$  (g/l), kan man beräkna MFC:ns Coulombiska effektivitet,  $\epsilon_{Cb}$ , över en bestämd tidsperiod, från  $t_1$  till  $t_2$ , enligt formeln

$$\epsilon_{Cb} = \frac{M_{O_2} \int_{t_1}^{t_2} I dt}{FbV_{anod}\Delta COD} \quad (14)$$

där  $M_{O_2}$  är syrets molmassa (32 g/mol),  $I$  är strömmen (A) som beräknas enligt Ekvation 11,  $F$  är Faradays konstant ( $9,65 \cdot 10^4$  C/mol),  $b$  är antalet elektroner som avges per mol syre (4  $e^-$ ) och  $V_{anod}$  är anodkammarens volym (l) (Logan, et al., 2006). Den Coulombiska effektivitet ger en bra möjlighet att jämföra olika MFC:er, även om de har olika storlek, då den uttrycks i procent.

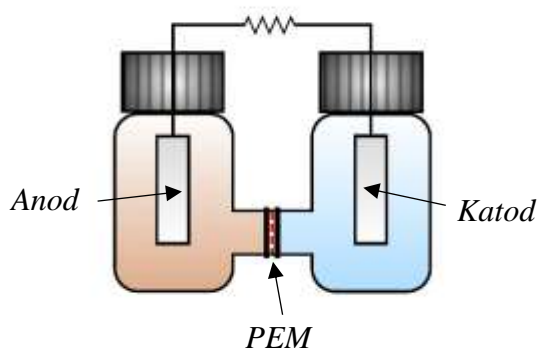
### 3.3 Material och konstruktion

En tvåkammarcell kan byggas på olika sätt där olika material och modeller har stor påverkan på det slutliga resultatet. Detta beskrivs i följande avsnitt.

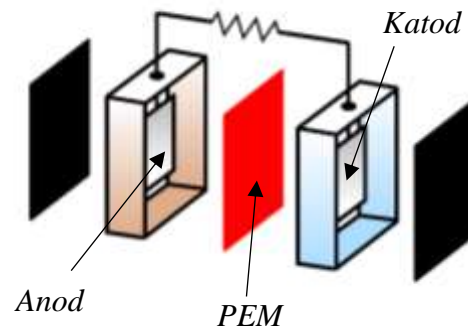
#### 3.3.1 Konstruktion

Vid konstruktionen av en småskalig MFC i labb finns det olika alternativ. De faktorer som påverkar prestandan mest är val av elektroder och membran (se följande avsnitt), syretillföring samt cellens storlek och form (Flimban, et al., 2019).

H-type MFC:er, se Figur 4, består av två glasbehållare med ett membran emellan (Flimban, et al., 2019). En av behållarna innehåller en anod och substratet medan den andra innehåller katoden samt vatten och syre. Fördelen med dessa är att de är mycket enkla att montera och hantera.



Figur 4. H-type MFC (Författaren)



Figur 5. FPMFC (Författaren)

Flat plate MFC:er (FPMCF), se Figur 5, är ofta kubiska och mycket kompakta jämfört med andra lösningar. De består av plastskivor med hålrum som innehåller anod och katod. Mellan skivorna placeras ett PEM (Flimban, et al., 2019). FPMFC:ns skivor hålls ihop av skruvar och muttrar som bör vara av ett rostbeständigt material. Dessutom placeras tätningar mellan skivorna för att inte substratet ska läcka ut. Silikon kan även användas för ytterligare tätning. FPMFC modellen är mycket mångsidig då man lätt kan lägga till fler kamrar vid behov för att exempelvis använda en luftkatod.

H-type MFC:er ger en lägre effekt jämfört med FPMFC:er i samma skala men kan användas för att undersöka grundläggande parametrar (Logan, et al., 2006).

Övrigt material som behövs för att konstruera och driva en MFC är slangar och pumpar för att kontinuerligt tillföra substrat och syre eller ett annat oxidationsmedel. Utöver det kan magnetomrörare hjälpa att hålla innehållet homogent, alltså förhindra att partiklar samlas på botten (Bajracharya, 2023).

#### 3.3.2 Anod

Anodens roll är att ta upp elektroner från mikroorganismernas oxidation av kol, se avsnitt 3.4.1, och materialet som används påverkar denna förmåga. Exempel på faktorer som påverkar detta är materialets ledningsförmåga, motståndskraft mot korrosion och ytstorlek (Santoro, et al., 2017).

De två huvudgrupperna av material som används är kol- eller metallbaserade då de har egenskaperna som krävs. Det finns olika typer av båda sorterna, exempel på kolbaserade är grafit, kolfiberduk eller kolskum, se Figur 6, 7 och 8, för att endast nämna ett fåtal. Exempel på metallbaserade anodmaterial är rostfritt stål, silver, nickel, koppar, guld och titan (Santoro, et al., 2017). Den största skillnaden mellan de olika alternativen är ytan som är tillgänglig för mikroorganismerna.



*Figur 6. Kolfiberduk  
(Författaren)*



*Figur 7. Kolskum  
(Författaren)*



*Figur 8. Grafitstav  
(Författaren)*

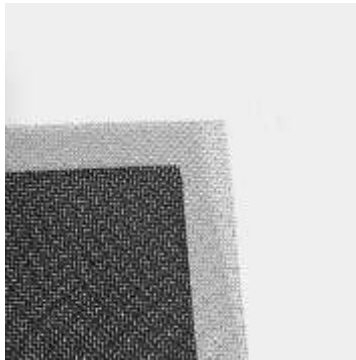
Kolskum ger väldigt bra resultat då det har alla de egenskaper som krävs och dessutom, till skillnad från många av de andra exemplen, är poröst vilket innebär att mikroorganismerna kan ta sig in i materialet och därmed har tillgång till en mycket större yta. Detta ger de möjligheten att överföra betydligt fler elektroner till anoden och därmed öka elproduktionen. Nackdelen med kolskum är den höga kostnaden (Santoro, et al., 2017).

### 3.3.3 Katod

Materialvalet för katoden är i stort sett samma som för anoden, se avsnitt 3.3.2. Däremot finns det andra faktorer som man behöver ta hänsyn till.

Tillgången till syre är ofta den begränsande faktorn i en MFC och man bör därför ta hänsyn till det när man väljer katod för att maximera MFC:ns elproduktion. Om katoden är nedsänkt i vatten, som beskrivits i avsnitt 3.1.1, måste syret transporteras till katoden genom vattnet vilket inte är effektivt.

En lösning där syret har direkt tillgång till katoden hade varit optimal. Detta kan åstadkommas med en luftkatod som byggs in i cellen, se Figur 9 och 10. Katodkammaren får alltså två sidor med katoden emellan dem. Den första sidan har samma funktion som beskrivet i avsnitt 3.1.1, medan den andra sidan innehåller luft som får kontakt med katoden. På så sätt behöver syret inte ta vägen genom vattnet utan har direkt kontakt till katoden.



*Figur 9. En luftkatod. Denna sida är riktad mot den vattenfyllda kammaren. Det svarta är aktivt kol. (Författaren)*



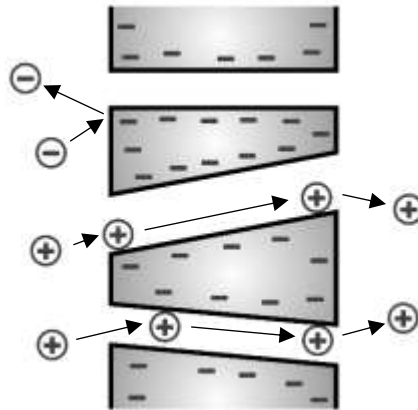
*Figur 10. Den andra sidan av luftkatoden som har uppgiften att samla syre som kan reagera med elektronerna och protonerna. Det vita är ett pulver av teflon som applicerats på elektroden i flera lager. (Författaren)*

#### 3.3.4 Membran

Membranets uppgift är att separera de två kamrarna genom att inte tillåta diffusion av substrat eller syre för att bibehålla två skilda miljöer, en anaerob och en aerob. Däremot tillåter membranet diffusion av protoner som då kan ta sig från anoden till katoden och på så sätt sluta systemet. Ett vanligt alternativ för PEM är Nafion membran men det finns mer kostnadseffektiva alternativ (Logan, et al., 2006).

I stället för ett membran kan en saltbrygga användas. En sådan kan bestå av ett U-format, kapillärt glasrör fyllt med agar och salt, exempelvis mättad KCl eller NaCl (Bajracharya, 2023), vars ändar förs in i MFC:ns kamrar. Denna metod är dock inte lika effektiv då den ökar MFC:ns inre resistens (Logan, et al., 2006).

Mer vanligt är det att använda ett PEM, som exempelvis Nafion (Logan, et al., 2006). Dessa PEM består av ett syntetiskt material med tunna kanaler. Inbäddat i materialet finns negativa laddningar som drar till sig protoner och stöter bort negativa joner, se Figur 11. Protonerna färdas på så sätt långsamt igenom membranet. Anledningen att protonerna rör sig är genom membranet är koncentrationsgradienten (Bajracharya, 2023).



*Figur 11. Ett PEM som släpper igenom positiva joner och stöter bort negativa (Författaren)*

Trots att membranet är avsett för att släppa igenom protoner, finns det möjlighet för andra positiva joner att ta sig igenom. Andelen av sådana är cirka 10% (Bajracharya, 2023).

### 3.4 Mikroorganismer

Som nämnt tidigare finns det mikroorganismer i MFC:er vars uppgift är att katalysera redox reaktionerna och överföra elektroner till anoden. För att göra detta använder de cellandning som de kan genomföra aerobt och anaerobt. I aerob cellandning är elektronacceptorn syre medan den i anaerob cellandning är det något annat kemiskt ämne som kan ta upp elektroner (Swanson, et al., 2008). I en MFC:er genomför mikroorganismerna cellandningen anaerobt (Swanson, et al., 2008).

Anledningen till att mikroorganismerna genomför anaerob cellandning trots att elektronacceptorn är syre är att mikroorganismerna inte ger elektronerna direkt till syret utan i stället använder anoden som elektronacceptor (Rabaey & Verstraete, 2005) som i sin tur skickar vidare elektronerna till katoden som avger dem till syret i den aeroba kammaren (kammare 2). För att mikroorganismerna ska kunna genomföra cellandning utan direkt kontakt till en elektronacceptor (oxidationsmedel) måste de alltså ha kontakt till elektroden som då tar rollen som elektronacceptor.

#### 3.4.1 Elektronöverföring till anoden

Det finns många olika mikroorganismer i en MFC och olika arter använder olika sätt att överföra elektroner till anoden. *Geobacter sulfurreducens* är en bakterie som är väldigt effektiv då den med hjälp av pili, trådliknande utskott som finns på dess cellyta, får direkt kontakt med elektroden och på så sätt överför elektronerna.

Andra mikroorganismer använder i stället ett protein som finns på cellytan. Proteinet kallas cytokrom och kan överföra elektroner till anoden.

De två ovan nämnda sätten kräver att mikroorganismerna har direkt kontakt till anoden. För att göra detta bildar de en biofilm på anoden och det är därför en anod med större kontaktyta, som kolskum, ger bättre resultat.

Många mikroorganismer har inte egenskapen att själva överföra elektronerna till anoden och måste därför använda sig av någon sorts transportsystem, som en elektronöverförare (Rabaey & Verstraete, 2005). Detta är indirekt elektronöverföring och kan ske genom kemiska ämnen eller proteiner. Ett exempel på ett kemiskt ämne är järn-3-joner,  $Fe^{3+}$ , som tar upp en elektron genom att bli järn-2-joner  $Fe^{2+}$  enligt reaktionsformeln



och överför denna elektron till anoden där de återigen blir  $Fe^{3+}$  enligt



och kan upprepa processen. Ett exempel på ett protein som har samma funktion är  $NAD^{+}$  som kan överföra elektroner på samma sätt som  $Fe^{3+}$  genom att bli  $NADH$



(Bajracharya, 2023).

### 3.5 Svartvatten

Avloppsvatten är allt använt vatten som produceras i samhället och kommer från exempelvis hushåll och industrier. Ibland innehåller det även dagvatten, alltså regnvatten som samlats ihop från bland annat vägar och hustak. De flesta näringsämnen som finns i avloppsvattnet och är relevanta för MFC:er kommer från hushållen, mer specifikt från det vatten som spolats ner i toaletter. Detta vatten kallas svartvatten (McConville, et al., 2020). Svartvattnet har en mycket högre koncentration av näringsämnen då det inte blandats med vatten från andra källor som kan innehålla olika kemikalier eller andra störande ämnen. Andelen vatten i svartvatten är fortfarande hög då den största beståndsdelen är spolvattnet (McConville, et al., 2020). Detta medför en låg viskositet.

MFC:er har stor potential inom vattenreningen då de kan producera energi från de näringsämnen som finns i avloppsvattnet/svartvattnet utan att det behöver förbehandlas. Dessutom kan de lätt kombineras med andra reningsmetoder (McConville, et al., 2020).

Vanligtvis blandas allt avloppsvatten från hushåll, alltså svartvatten från toaletterna och gråvatten som kommer från kök och tvätt och står för 65% av hushållens avloppsvatten (McConville, et al., 2020), men det finns forskning om att separera svartvattnet från gråvattnet. Ett världsunikt exempel som omsätter

detta på stor skala är RecoLab (Recovery Lab) i Helsingborg som källsorterar avloppsvatten och matavfall från hushåll (RecoLab, 2023). Från RecoLab kommer svartvattnet som används för denna studie.

### 3.6 Nuvarande tillämpning av MFC:er i vattenreningen

Att använda MFC:er i hanteringen av avloppsvatten är inget nytt koncept och vissa typer av MFC:er används redan idag för olika uppgifter i vattenreningen. Exempelvis har MFC:er används i anlagda våtmarker, aktivslamsystem och septiktankar (McConville, et al., 2020).

Ett exempel för detta är EU projektet iMETland där jordbaserade MFC:er använts för att utvinna el och rena avloppsvatten. (iMETland, 2023). METland teknologin ägs nu av företaget METfilter.



## 4 Metod

För att besvara frågeställningarna genomfördes ett experiment. De följande avsnitten behandlar metoden som användes för att bygga en MFC och genomföra experimentet med svartvatten.

### 4.1 Förberedelse av reaktorn

Första steget är att bygga reaktorn. Detta steg är mest tidskrävande och genomförs på olika sätt beroende på vilken typ av MFC man vill ha. För att genomföra försöken skulle en FPMFC användas då den i teorin borde ge en högre prestanda än en H-type MFC. FPMFC:n konstruerades enligt avsnitt 4.1.1 men reaktorn visade sig ha läckor som inte gick att tät. Därför användes i stället en H-Type MFC som konstruerades enligt tillvägagångssättet i avsnitt 4.1.2.

#### 4.1.1 FPMFC

1. Plattorna rengjordes och monterades med tätningar och silikon emellan.
2. En kolskum-anod och en luftkatod placerades i MFC:n. Ytterligare en kammare lades till utanför luftkatoden. Denna kammare skulle endast vara fylld med luft.
3. Allt skruvades ihop genom att använda två metallramar.



Figur 12. FPMFC:n efter att ha genomfört steg 1–3.

4. En Ag/AgCl referenselektrod placerades i anodkammaren.
5. Slangar för substrat och vatten kopplades till varsin externa behållare samt MFC:ns kamrar.
6. Två pumpar kopplades till slangarna.
7. Alla övriga portar täpptes för med silikon.
8. FPMFC:ns kamrar fylldes med vatten för att kontrollera om den var tät.
9. FPMFC:n placerades i ett värmeskåp på 30° C.
10. Efter en dag uppvisade reaktorn läckor som troligen uppstått genom för högt tryck i anodkammare. Dessa täpptes för med silikon.
11. Efter ytterligare en dag hade reaktorn nya läckor. Dessutom hade membranet förflyttats mot katodsidan på grund av trycket.
12. Systemet undersöktes för att hitta anledningen för läckorna och trycket men inget hittades.
13. Beslutet fattades att använda en H-type MFC i stället.

#### 4.1.2 Konstruktion av H-type MFC

1. Ett Nafion 117 membran placerades i en 3d-printad hållare, vars uppgift var att hålla membranet på plats även om det skulle uppstå tryck mellan den anaeroba och aeroba kammaren, och en tätning placerades på varje sida av hållaren.
2. Membranet placerades sedan mellan de två glasflaskorna och allt hölls på plats med en klämma som skruvades åt.
3. Anoden förbereddes genom att en rektangulär bit av kolskum med måtten 7,5·3 cm (22,5 cm<sup>2</sup>) klipptes ut och en titantråd syddes igenom denna för att ge bra kontakt mellan kolskumbiten och tråden. Denna titantråd stacks sedan genom ett gummilock som passade på flaskan.
4. Då kolskum är hydrofobt spolades vatten in i kolskumanoden för att göra den hydrofil.
5. Anoden och gummilocket placerades i en av flaskorna och ett ytterligare lock skruvades på för att hålla gummilocket på plats och säkerställa att flaskan var lufttät.
6. En Ag/AgCl referenselektrod placerades i flaskan genom en av de mindre öppningarna för att kunna mäta anodpotentialen. Katodpotentialen kan också mätas genom denna referenselektrod, dock med en felmarginal på upp till 20 mV (vanligtvis betydligt lägre). För att mäta katodpotentialen mer noga måste en referenselektrod placeras även i katodkammaren. Detta gjordes inte för detta experiment då denna nivå av noggrannhet inte var nödvändig.
7. Som katod användes en grafitstav som placeras i den andra flaskan. Denna behövde inte hållas på plats lufttät då kammaren ska vara aerob.
8. En magnetomrörare placerades i varje flaska.
9. MFC:n såg efter detta ut som i Figur 13.

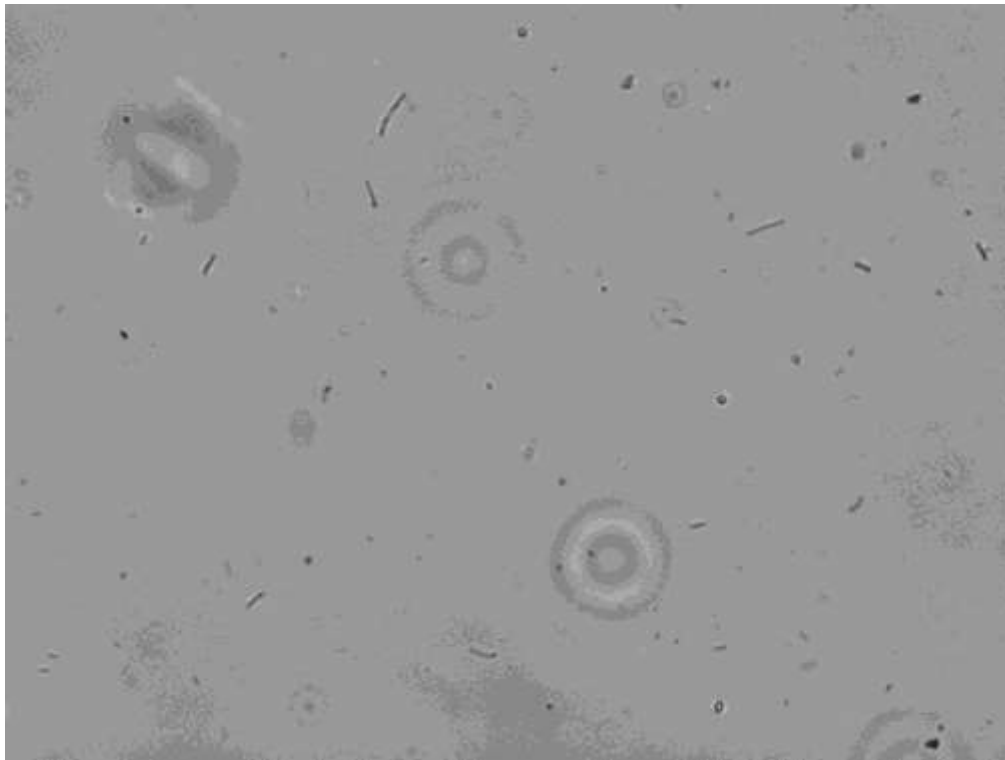


Figur 13. H-type MFC:n efter att ha genomfört steg 1–9.

10. En lösning tillverkas enligt receptet i Tabell 2, se Avsnitt 4.1.3.
11. 100 ml av lösningen späddes ut till 1000 ml med destillerat vatten och ca. 250 ml av den utspädda lösningen hälldes i katodflaskan. Det spelade ingen roll att det kom in luft då kammaren ska vara aerob.

12. Tre lösningar tillverkades enligt Tabell 3 och av varje hölls 10 ml över till en bägare som sedan fylldes till 250 ml med lösningen som gjordes i punkt 10. Denna lösning hade nu förutsättningarna som bakterierna behöver för att växa på grund av att den innehöll näring för bakterierna (ättiksyran i natriumacetatet) samt en buffert med uppgiften att hålla lösningen ca. pH 7.
13. Lösning hölls i en glasflaska med två öppningar i locket och kvävgas prutades in genom en av dem medan syre kunde ta sig ut genom den andra. Genom denna behandling blev lösningen anaerob.
14. Lösningen hölls nu in i anodkammaren och bubblades på samma sätt som i föregående steg med kvävgas för att säkerställa att lösningen förblev anaerob.
15. Dessutom tillsattes en liten mängd bakterier, som tidigare tagits från avloppsvatten och odlats, till anodflaskan. Det är okänt hur mycket och exakt vilka bakterier som fanns i den lösningen men en uppfattning om detta fås i steg 23.
16. För att säkerställa att bakterierna hade bra förutsättningar att föröka sig mättes anodflaskans pH värde med en pH-meter. Resultatet låg mellan pH 6 och 8 vilket var ok.
17. COD mättes med ett fotometriskt COD test för att säkerställa att anodkammaren innehöll tillräcklig mängd näring för bakterierna.
18. Anoden och katoden kopplades ihop med en kabel med en 1,5 k $\Omega$  resistor i mitten.
19. MFC:n placerades på två magnetorrörare i ett värmeskåp med temperaturen 30°C.
20. Katodflaskan anslöts till en kompressor som försåg reaktionen med syre (genom att pumpa in luft).
21. Anoden och katoden kopplades till ett potentiostat vilket kopplades till en dator som då kunde visa och spara data från MFC:n. För att göra detta användes programmet PSTrace 5.
22. Bakterierna fick nu två dagar att växa och föröka sig.

23. Med hjälp av en spruta togs ett prov varav en droppe placerades på ett objektglas och täcktes över med ett täckglas. Provet undersöktes sedan med mikroskop för att se mängden bakterier och eventuellt ungefär vilka typer av bakterier, se Figur 12.



*Figur 14. En mikroskopbild med 60x förstoring som visar bakterierna i MFC:ns anodflaska efter att de fått två dagar att föröka sig.*

24. Bakterierna fick ytterligare 20 dagar att växa sig och anpassa sig till miljön samt att bilda en biofilm på anoden.

25. Med en spruta togs återigen ett prov som, precis som i steg 23, undersöktes med mikroskop, se Figur 15. Mängden bakterier i provet var betydligt lägre än 20 dagar tidigare, se Figur 14, vilket tyder på att bakterierna har förflyttat sig till anoden och bildat en biofilm, se Figur 16.



Figur 15. En mikroskopbild med 60x förstoring som visar bakterierna i MFC:ns anodflaska efter att de fått 20 dagar att föröka sig.



Figur 16. En bild av anodflaskan efter att bakterierna fått 20 dagar att föröka sig. På kolskum anoden syns svagt en biofilm av bakterier.

26. Under de följande 9 dagarna mättes MFC:ns spänning kontinuerligt och då spänningen sjönk tillsattes mer substrat. COD mättes regelbundet för att kontrollera att värdet sjönk och därmed säkerställa att MFC:n fungerade, se Tabell 1.
27. Samtidigt mättes pH värdet regelbundet för att säkerställa att det låg kring pH 7 (värden mellan pH 6 och pH 8 accepterades) och därmed gav bakterierna bra förutsättningar att arbeta.
28. Efter detta kunde undersökningar med svartvatten påbörjas, se avsnitt 4.2.

Tabell 1. Mätningar av pH och COD under de 9 dagarna då MFC:n gick på ättiksyra. Notera hur COD värdet förändras.

Antal dagar från start	Ändringar	pH	COD (mg/l)
0	1 ml av 5 M ättiksyra tillsattes efter mätningarna Mätvärdena som togs efter tillsatsen dokumenterades tyvärr inte.	6,963	3640

3	8,50	4015
7	6,530	3555
8	6,522	-

#### 4.1.3 Näringslösning

Detta avsnitt innehåller recept för näringslösningen som användes i föregående avsnitt.

*Tabell 2. Recept för lösningen som används i MFC:n. Lösningen är koncentrerad och behöver spädas ut 1:9 innan användning, totalt räcker detta recept alltså för 10 liter*

Ingrediens	Mängd
NH <sub>4</sub> Cl	5,0 g
MgSO <sub>4</sub> x 7 H <sub>2</sub> O	5,0 g
CaCl <sub>2</sub> x 2 H <sub>2</sub> O	2,5 g
NaCl	10,0 g
FeSO <sub>4</sub> x 7 H <sub>2</sub> O	0,02 g
Spårelement lösning SL-10 (Tabell 4)	10,0 ml
Selenit-volframat lösning	10,0 ml
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	3,5 g
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	2,3 g
Destillerat vatten	1000,00 ml (för koncentrerad lösning)

*Tabell 3. Dessa ingredienser blandas i separata bägare och blandas med lösningen i Tabell 2 för att skapa en näringslösning för anodkammaren. Ingredienserna räcker för totalt 10 liter näringslösning.*

Ingrediens	Mängd	Späds med
Jästextrakt	20,0 g	100 ml H <sub>2</sub> O
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	10,0 g	100 ml H <sub>2</sub> O
Natriumacetat	20,0 g	100 ml H <sub>2</sub> O

*Tabell 4. Recept för spårelementlösningen som används i receptet i Tabell 2*

Ingrediens	Mängd för 1 liter
Milli-Q H <sub>2</sub> O	800 ml
NTA Trinatriumcitrat (Free acid)	1,5 g
MgSO <sub>4</sub>	3,0 g
MnSO <sub>4</sub> x H <sub>2</sub> O	0,5 g
NaCl	1 g
FeSO <sub>4</sub> x 7 H <sub>2</sub> O	0,1 g
CaCl <sub>2</sub> x 2 H <sub>2</sub> O	0,1 g
CoCl <sub>2</sub> x 6 H <sub>2</sub> O	0,1 g
ZnCl <sub>2</sub>	0,13 g
CuSO <sub>4</sub> x 5 H <sub>2</sub> O	0,01 g

AlK(SO <sub>4</sub> ) x 12 H <sub>2</sub> O	0,01 g
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	0,01 g
Na <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> x 2 H <sub>2</sub> O	0,025 g
NiCl <sub>2</sub> x 6 H <sub>2</sub> O	0,024 g
Na <sub>2</sub> WO <sub>4</sub> x 2 H <sub>2</sub> O	0,025 g
Lös ingredienserna ordentligt och fyll sedan på med Milli-Q H <sub>2</sub> O till 1000ml	

#### 4.2 Genomförande av försök

1. För att genomföra försöket användes en H-type MFC ur avsnitt 4.1.2. MFC:n gick efter att ha genomfört avsnitt 4.1.2 på ättiksyra och för att genomföra försök med svartvatten bör nytt substrat tillsättas.
2. Från en 5-liters dunk svartvatten från ReColab togs ett prov med en spruta efter att dunken hade skakats om ordentligt.
3. Först mättes svartvattnets pH-värde till 7,370 vilket innebär att det kan tillsättas som substrat till MFC:n utan att påverka anodflaskans pH värdet negativt.
4. Svatvattnets COD mättes till 5570 mg/l.
5. 12 ml svartvatten tillsattes till anodkammaren med en spruta, utan att någon luft släpptes in.

Tabell 5. Information om MFC:n under tiden den gick på svartvatten.

Antal dagar efter tillsats av svartvatten	Ändringar	pH	COD (mg/l)
0	12 ml svartvatten tillsattes	6,628	3945
	U=0,3 V		
6	U=0,4 V	6,552	3390
9	U=0,5 V		3480
14	Naturlig spänning med 1,5 kΩ resistor	6,8	3200
20		6,983	3490
26		6,769	3160

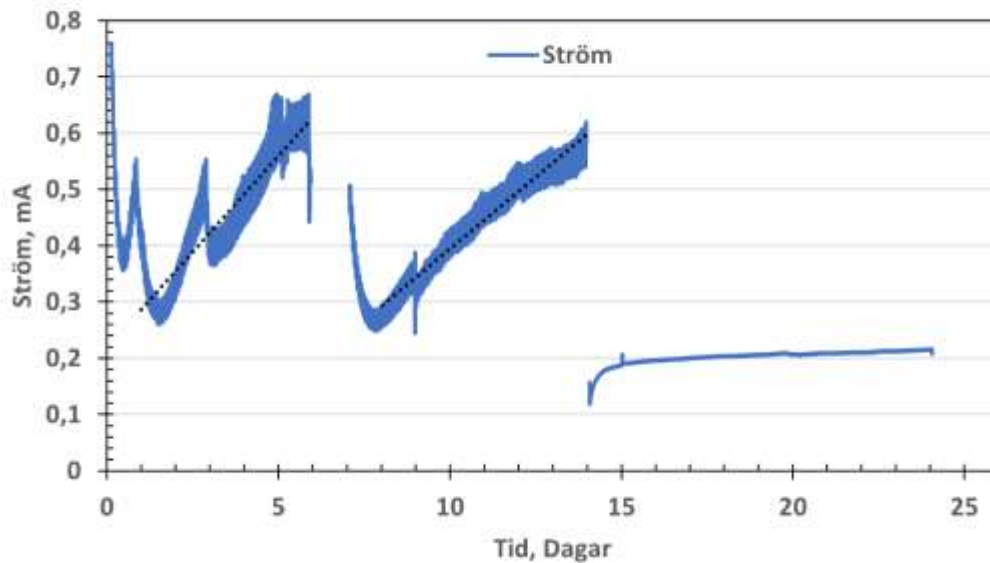
6. MFC:n kördes sedan på en bestämd spänning på 0,3 V. Detta tvingar bakterierna att avge elektroner till anoden och på så sätt anpassa sig till förhållandena.
7. Eftersom systemet gick långsamt ändrades spänningen efter sex dagar till 0,4 V och efter totalt 9 dagar till 0,5 V för att påskynda processen.
8. Efter totalt 14 dagar kontrollerades inte länge spänningen och MFC:n fick jobba på sin naturliga nivå.
9. För att visualisera strömmen kopplades en LED-lampa mellan elektroderna. LED-lampan kopplades ihop med en kondensatoruppsättning från märket MudWatt. Denna uppsättning skulle få LED-lampan att blinka genom att under korta intervaller öka spänningen till 2,4 V.
10. 26 dagar efter tillsatsen av svartvattnet laddades resultatet ned i form av pssession-filer. Dessa importerades till Excel och omvandlades till diagram som visas i avsnitt 5.

## 5 Resultat

Detta avsnitt visar resultatet av undersökningen i föregående avsnitt. Först presenteras resultaten av ström och spänningsmätningarna, beräkningen av effekt och effekttäthet samt COD mätningarna. Därefter visas hur effektiviteten beräknas.

### 5.1 Ström

Enligt metoden mättes strömmen under en period av 26 dagar, se Figur 17. Från och med dag 14 låg strömmen på en betydligt lägre nivå. Detta beror på att det inte längre sattes någon bestämd spänning och bakterierna kunde jobba i sin egen takt. MFC:n fungerade då som ett batteri och visade då sin naturliga strömnivå som ligger kring 0,2 mA.



Figur 17. MFC:n ström över tid.

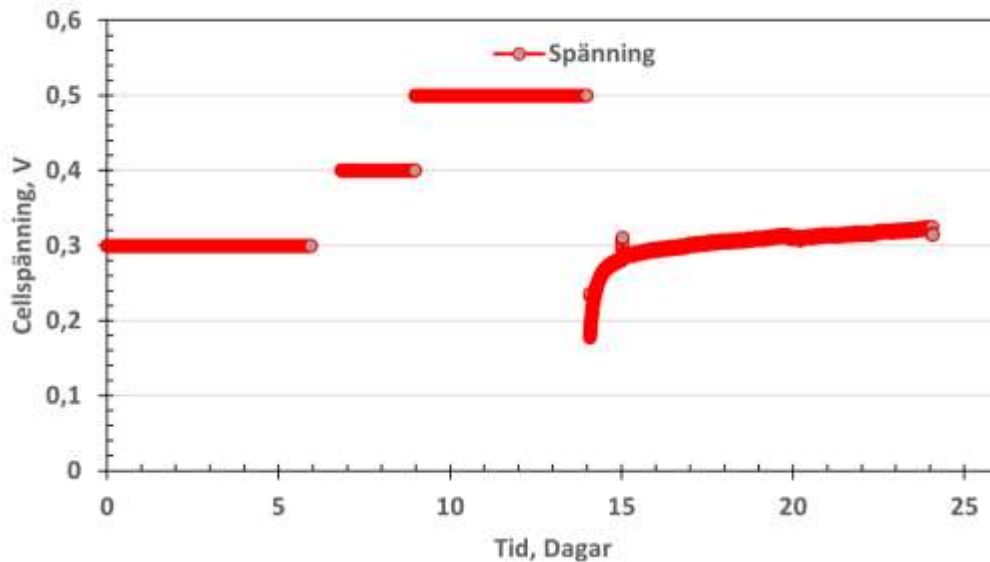
Innan dag 14 gick MFC:n på en bestämd spänningsnivå, detta tvingar bakterierna att avge elektroner till anoden vilket ger mer ström. Anledningen att strömmen långsamt stiger under den tidsperioden är att bakterierna långsamt anpassar sig till att ge elektroner till anoden, den sjunker då en jämvikt uppnåtts.

Ojämnheter i strömnivån beror på bland annat störningar av magnetomröraren eller manuella mätningar med multimeter då man rör i strömkablarna. För att förtydliga ökningen infogades därför två trendlinjer.



## 5.2 Spänning

Även MFC:ns spänning mättes under perioden av 26 dagar, se Figur 18. De första 14 dagarna syns vilka specifika spänningar som sattes och efter 14 dagar fick MFC:n ställa in sig naturligt. Spänningsnivån låg då på ungefär 0,3 V.



Figur 18. MFC:n spänning över tid.

## 5.3 Beräkning av effekt och effekttäthet

Mellan dag 14 och 24 gick MFC:n på sin naturliga nivå. För att bestämma den maximala effekten under perioden användes det högsta spänningsvärdet som, genom att använda Excel, bestämdes till 0,32488 V. Effekten beräknades då enligt Ekvation 12:

$$P = \frac{U_{cell}^2}{R_{ext}} = \frac{0,32488^2}{1500} \approx 7,0 \cdot 10^{-5} W = 0,070 mW \quad (18)$$

Med detta värde och anodens area, som tidigare mättes till  $7,5 \cdot 3,0 = 22,5 \text{ cm}^2$ , beräknades MFC:ns maximala effekttäthet enligt Ekvation 13:

$$P_{anod} = \frac{P}{A_{anod}} = \frac{7,0 \cdot 10^{-5}}{22,5 \cdot 10^{-4}} \approx 0,031 W/m^2 = 31 mW/m^2 \quad (19)$$

## 5.4 COD

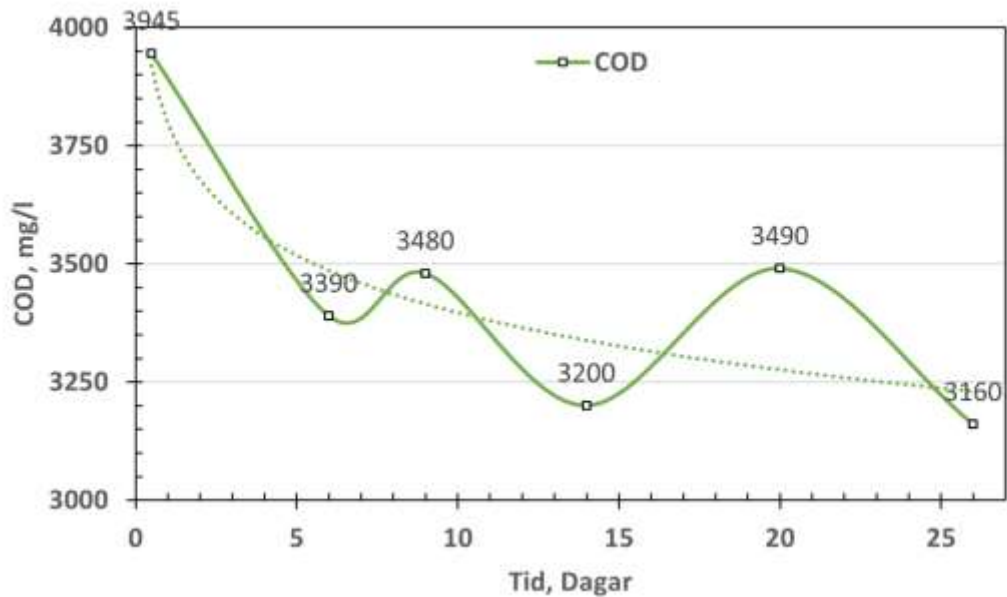
Under mätperioden togs regelbundet prover av anodflaskans innehåll och COD mätningar genomfördes. Resultatet presenteras i diagrammet nedan, se Figur 19. Eftersom mätningarna varierade kraftigt anpassades värdena till en logaritmisk funktion för att tydligare visa hur COD sjunker. Det syns att trenden

går nedåt, det vill säga att COD värdet sjunker. Detta går snabbare i början och långsammare mot slutet. Den logaritmiska funktionen togs fram med Excel och kan skrivas som

$$COD = -174,4 \ln(t) + 3798,4$$

( 20 )

vilket ger ett COD värde i mg/l.



Figur 19. Ett diagram som visar förändringen av MFC:ns COD.

### 5.5 Beräkning av Coulombisk effektivitet

MFC:ns Coulombiska effektivitet beräknades genom att använda Ekvation 14. Först beräknades den totala laddningen under tidsperioden 15 till 24 dagar genom att använda Excel. Resultatet var

$$\int_{15}^{24} I dt \approx 175 C$$

( 21 )

Minskningen av COD värdet beräknades under samma tidsperiod enligt Ekvation 20:

$$\Delta COD = (-174,4 \ln(24) + 3798,4) - (-174,4 \ln(15) + 3798,4) = -82 \text{ mg/l} = -0,082 \text{ g/l}$$

( 22 )

Värdet är negativt då COD minskar.

Utifrån dessa värden och värdena nämnda i avsnitt 3.2.2 beräknades sedan den Coulombiska effektiviteten enligt

$$\epsilon_{cb} = \frac{M_{O_2} \int_{15}^{24} Idt}{FbV_{anod} \Delta COD} = \frac{32 \cdot 175}{(9,65 \cdot 10^4) \cdot 4 \cdot 0,28 \cdot 0,082} \approx 0,632 = 63,2\%$$

(23)

MFC:ns Coulombiska effektivitet mellan dag 15 och 24 var alltså 63,2%.

### 5.6 LED-lampa driven av MFC

LED-lampan som kopplades till MFC:n med en kondensatoruppsättning visade sig vara fungerande genom korta blinkningar med jämna mellanrum på ungefär 9 s, se Figur 20 och 21.



Figur 20. LED-lampa av.



Figur 21. LED-lampa på.

## 6 Diskussion

Syftet med denna studie var att undersöka hur mikrobiella bränsleceller kan användas för att utvinna elektrisk energi ur svartvatten. I detta avsnitt diskuteras undersökningens resultat utifrån detta. Dessutom kommer metoden utvärderas och eventuella förbättringsförslag kommer tas upp.

### 6.1 Utvärdering av prestanda

Resultatet visar att svartvatten är ett bra substrat för att driva en litet tvåkammar-MFC.

Den Coulombiska effektiviteten beräknades till 63,2% vilket är ett väldigt högt värde. Anledningen till detta kan vara att COD-värdet troligen sjönk långsamt under den ganska långa mätperioden. I en studie genomförd av (Liu & Logan, 2004) användes avloppsvatten som substrat i en tvåkammarmodell med PEM vilket gav en Coulombisk effektivitet på 28%. I samma undersökning användes även substratet glukos vilket gav en högre Coulombisk effektivitet, 40–55%. Dessa värden är lägre än vad som uppmättes i denna studie men resultatet kan tyda på att svartvatten är ett bättre substrat än vanligt avloppsvatten som användes i (Liu & Logan, 2004). För att vara säker på detta krävs dock ytterligare experiment.

Effekttätheten som beräknades var  $31 \text{ mW/m}^2$ . I studien genomförd av (Liu & Logan, 2004) uppmättes en effekttäthet på  $28 \pm 3 \text{ mW/m}^2$  vilket är ungefär lika mycket.

### 6.2 Utvärdering av metod

Medan den i studien använda metoden gav ett resultat som besvarade frågeställningarna hade den ändå kunnat förbättras för att bli mer exakt och tillförlitlig.

COD värdet var väldigt varierande, se avsnitt 5.4, trots att det i teorin borde ha gått jämnare. Det är troligt att COD värdet faktiskt gick ned jämt och att variationen berodde på felkällor i mätmetoden. Man ser på trenden att värdet sjönk men den troliga felmarginalen på mätningarna kan ha haft en effekt på beräkningen av den Coulombiska effektiviteten vars resultat därmed blir mindre exakt.

En felkälla vid mätningen av COD kan vara att proven togs med en spruta från ett ställe i anodflaskan vilket medför en risk att större bitar av organiskt material följer med i vissa prov men inte gör det i andra. En annan felkälla kan vara att proven inte filtrerades vilket innebär att en blandning av löst COD och fast COD fanns med i proven. Filtringen hade inneburit att endast löst COD fanns med vilket kanske hade gett ett bättre resultat. Metoden som användes för att mäta COD var en kit baserad "snabb" metod som endast tog några timmar per mätning. Den hade kunnat förbättras enligt de tidigare nämnda förslagen men bäst resultatet hade man troligen fått om man hade använt en annan, mer tillförlitlig metod.

Egentligen skulle en FPMFC användas för att utföra undersökningen men konstruktionen av denna blev tyvärr inte lyckad då det uppstod läckor. I stället användes en H-type MFC vilket kan ha medfört en lägre effekt då H-type MFC:er vanligtvis är mindre effektiva då de exempelvis saknar luftkatod samt begränsas av en högre inre resistans. FPMFC:n som skulle användas var en modell med stor yta vilket innebar att den inte var tålig mot högre tryck vilket troligen orsakade läckorna. Detta hade kunnat förbättras genom att bygga en FPMFC med en mindre yta samt bättre tätningsmaterial.

För att öka effekten i H-type MFC:n hade man kunnat ersätta de bakterierna som användes med en känd art som fungerar bra i MFC:er. Ett exempel på en sådan bakterie är *Geobacter* som man vet är elektroaktiv och avger elektroner till anoden effektivt. Det hade även varit bra att undersöka påverkan av resistorer med olika resistans för att se om det påverkar prestandan.

### 6.3 Applicering av MFC:er i samhället

Undersökningens resultat visar att svartvatten är ett fungerande substrat. Detta innebär en ljus framtid för svartvatten då det, i stället för att ses som avfall, kanske kan ses som en resurs. Om MFC:er exempelvis används som ett steg i reningsprocessen kan svartvattenrening gå från att vara energikrävande till att vara energigivande. MFC:er hade kanske även kunnat användas på en mindre skala i exempelvis hushåll där MFC:n utvinnet energi från svartvattnet innan det skickas vidare. En sådan MFC hade kunnat förse delar av hushållet med el eller driva mindre elektriska apparater som lampor.

MFC:n som användes i denna studie gav dock endast väldigt låga ström och spänningsnivåer. För att LED-lampan skulle blinka krävdes att den kopplades ihop med en kondensator. För att praktisk kunna använda MFC:n krävs högre ström- och spänningsnivåer. Metoder som kan användas för att få mer användbara ström- och spänningsnivåer är att seriekoppla flera reaktorer för att öka den totala spänningen och/eller parallellkoppla flera reaktorer för att öka den totala strömnivån precis som man kan göra med batterier. Eventuellt hade även större reaktorer kunnat användas. Detta kräver dock ytterligare forskning.

### 6.4 Förslag på fortsatt forskning

Då denna studie ger en ofullständig bild av området behövs vidare forskning. Den hade kunnat handla om att undersöka MFC:ns påverkan på svartvattnet, för att avgöra vilken effekt den får på andra steg i reningen, samt hur MFC:n fungerar i en större skala. Det hade även varit relevant att undersöka andra substrat som exempelvis "vanligt" avloppsvatten, matavfall eller annat organiskt avfall för att göra MFC:er användbara i flera sammanhang. Ett annat förbättringsförslag är att experimentera med andra typer av MFC:er.

## Referenser

Arvanitis, L., Hamza, K., Sundberg, C. J. & Pålsson, A., 2018. *Biologi Campus 2*. 1 red. Stockholm: Sanoma utbildning.

Arvidsson, F. o.a., 2019. *Mikrobiella bränsleceller för energiutvinning*, u.o.: Chalmers Tekniska Högskola.

Bajracharya, S., 2023. *Muntligt samtal [Intervju]* (25 Oktober 2023).

Flimban, S., Ismail, I., Kim, T. & Oh, S.-E., 2019. Overview of Recent Advancements in the Microbial Fuel Cell from Fundamentals to Applications: Design, Major Elements, and Scalability. *Energies*, Issue 12.

iMETland, 2023. *CORDIS EU research results*. [Online]

Available at: <https://cordis.europa.eu/project/id/642190>

[Använd 29 2 2024].

IWA, 2021. *Circular Economy: Tapping the Power of Wastewater*. [Online]

Available at: <https://iwa-network.org/learn/circular-economy-tapping-the-power-of-wastewater/>

[Använd 1 3 2024].

Johansson, E. o.a., 2019. *Kraftfulla mikroorganismer*, Göteborg: Chalmers Tekniska Högskola.

Liu, H. & Logan, B. E., 2004. Electricity Generation Using an Air-Cathode Single Chamber Microbial Fuel Cell in the Presence and Absence of a Proton Exchange Membrane. *Environ. Sci. Technol.*, 38(14), pp. 4040-4046.

Li, W.-W., Yu, H.-Q. & Rittmann, B., 2015. Chemistry: Reuse water pollutants. *Nature*, Issue 528, pp. 29-31.

Logan, B. E. o.a., 2006. Microbial Fuel Cells: Methodology and Technology. *Environmental Science & Technology*, 40(17), pp. 5181-5192.

McConville, J. o.a., 2020. *Guide to Sanitation Resource Recovery Products & Technologies*, u.o.: Dept. of Energy and Technology, SLU.

Rabaey, K. & Verstraete, W., 2005. Microbial fuel cells: novel biotechnology for energy generation. *TRENDS in Biotechnology*, pp. 291-298.

RecoLab, 2023. *RecoLab*. [Online]

Available at: <https://www.recolab.se/>

[Använd 27 10 2023].

Santoro, C., Arbizzani, C., Erable, B. & Ioannis, I., 2017. Microbial fuel cells: From fundamentals to applications. A review. *Journal of Power Sources*, Volym 356, pp. 225-244.

Swanson, L., Schultz, J., Beyenal, H. & Nguyen, H., 2008. *Using Microbial Fuel Cells in the High School Science Classroom*. u.o.:u.n.

## Källkritik

Källan (Liu & Logan, 2004) är en tidig vetenskaplig undersökning inom ämnet skriven av tillförlitliga forskare som varit aktiva inom ämnet. Källorna (Arvidsson, et al., 2019) och (Johansson, et al., 2019) är kandidatarbeten skrivna av elever på Chalmers högskola. Källorna bedöms vara trovärdiga då de jämförts med andra källor. (Logan, et al., 2006), (Rabaey & Verstraete, 2005), (Swanson, et al., 2008), (Santoro, et al., 2017) och (Flimban, et al., 2019) är vetenskapliga artiklar skrivna i tidskrifter, information som använts från dessa har till största del jämförts med andra källor som stämmer överens. Artiklarna är publicerade i tidskrifter och journaler av olika kvalitet vilket innebär att (Logan, et al., 2006), (Rabaey & Verstraete, 2005) och (Swanson, et al., 2008) är mest trovärdiga. Med dessa artiklar har de andra jämförts med gott resultat. Av denna anledning ses artiklarna vara trovärdiga ur tendenssynpunkt. (Arvanitis, et al., 2018) och (McConville, et al., 2020) är böcker publicerade av kända förlag och anses vara trovärdiga. (RecoLab, 2023) och (iMETland, 2023) är hemsidor som beskriver projekt. (RecoLab, 2023) är mer utformad som reklam för att övertyga läsare men informationen som använts i detta arbete är grundläggande fakta om projektet som är trovärdig och har bekräftats. (iMETland, 2023) är ett EU projekt som finns på en officiell EU hemsida samt att informationen har bekräftats av Suman Bajracharya som också är en trovärdig källa då personen bakom samtalen är en forskare inom ämnet.

Aktualiteten för källorna är i de flesta fall inte relevant då källorna till största del innehåller grundläggande vetenskapliga fakta. Denna punkt blir relevant då det handlar om aktuell forskning på hög nivå vilket inte förekommer i denna studie. Ett undantag är källorna (Li, et al., 2015) och (IWA, 2021), som användes för en siffra på dagens energiförbrukning i vattenrening, då detta värde kan ändras krävs en aktuell källa. Källorna som användes var skrivna 2015 och 2021 och angav liknande värden vilket tyder på att de är aktuella än idag. Ännu ett undantag är (RecoLab, 2023) då det handlar om ett pågående projekt, webbplatsen är dock uppdaterad.

Många av källorna är andrahandskällor som är samanställningar av många förstahandskällor. (Rabaey & Verstraete, 2005) och (Swanson, et al., 2008) rekommenderades av Suman Bajracharya och anses därför vara trovärdiga. (Logan, et al., 2006) är en äldre källa skriven av framstående forskare inom området. De tre sist nämnda källorna stämmer även överens med varandra. (Johansson, et al., 2019), (Arvidsson, et al., 2019), (Flimban, et al., 2019) och (Santoro, et al., 2017) är andrahandskällor som endast använts för vissa få delar i arbetet och som till största del bekräftats av andra källor. (Liu & Logan, 2004) är en förstahandskälla som visar forskningsresultat.

Alla källor bedöms vara äkta. Dessutom ses alla information tagen från källorna vara rimlig och objektiv. Tillsammans stödjer källorna varandra och ger en fullständig bild av området.