

Brennisteinsvetni frá jarðvarmavirkjunum nýtt til framleiðslu á lífefnum

Lokaskýrsla til Orkusjóðs - Sigurður Brynjólfsson

Að verkefninu unnu Dr Weiqi Fu, lífnaverkfræðingur, Einar Daði Lárusson, nemandi í lífefnafræði, Lára Kristín Stefánsdóttir nemandi í sameinda- og lífefnafræði, Doran Rose, vélaverkfræðinemi frá Yale, Karsten Zengler, vísindamaður við UCSD og DTU ásamt Sigurði Brynjólfssyni prófessor.

1. Útdráttur

Bakterían *Desulfobulbus propionicus* er fær um að oxa brennistein (S^0) yfir í sulfat (SO_4^{2-}) og færa rafeindir yfir á rafskaut í efnarafli þegar natríum sulfíð er notað sem rafeindagjafi og hentug spenna er sett á kerfið. Þetta hefur verið sýnt fram á bæði erlendis og hérlendis við Kerfislíffræðisetur HÍ. Hugmynd er að nýta brennisteinsvetni (H_2S) úr skiljuvatni frá Hellisheiðarvirkjun á svipaðan hátt sem rafeindagjafa.

Lífefnarafallinn var settur upp og virkni hans prófuð við bestu aðstæður. Vel gekk að rækta örverurnar en afköst þeirra í efnaraflinum voru breytileg og ekki náðist sami vaxtarhraði og gert var grein fyrir í fyrri rannsóknum. Áfram var haldið að reyna að ná fram stöðugleika í ræktuninni í efnaraflinum. Í fyrstu við kjöraðstæður, þ.e. með lausnum sem blandaðar voru á rannsóknarstofu. Síðar var notað skiljuvatn og það þynnt þ.a. styrkur brennisteinsvetni væri ekki of mikill.

Lífvænleiki bakteríunnar við mismunandi styrk virkjunarvatns var kannaður. Einnig var reynt að rækta bakteríuna upp við ákveðnar aðstæður til líkja eftir orkuefnaskiptum hennar í efnarafli. Þannig mætti ná fram aðlögun. Nokkrar keyrslur voru gerðar í efnarafli án bakteríu. Þær voru til að bera saman afköst mismunandi skauta og mismunandi rafeindagjafa (natríumsulfíðs og virkjunarvatns). Fyrstu niðurstöður bakteríuræktunar í skiljuvatni voru neikvæðar. Ekki náðist að rækta bakteríuna í efnaraflinum. Ekki er víst hvort það stafi af mistökum við ræktun eða mögulegum eituráhrifum virkjunarvatnsins. Í því eru ýmis efni sem geta haft alvarleg áhrif á hana. Tilraun til að rækta bakteríuna með rafeindagjafa og rafeindaþega sem

líkjast þeim sem hún notar í efnarafli var heldur ekki jákvæð. Efnarafalskeyrslurnar gáfu góðar upplýsingar og staðfestu m.a. aukna straummyndun með stærri skautum.

Samhliða þessu var smíðaður 10 lítra efnarafall sem nota átti við frekari prófanir með skiljuvatni. Lögun hans, sem svipar til plötuvarmaskipta, hentar betur til skölunar en rafallinn sem notaður er í rannsóknarstofunni í dag, sem eru tvær flöskur tengdar saman á miðju. Ekki var farið í prófanir á honum þar eð tilraunir í einfaldari búnaði gáfu ekki jákvæðar niðurstöður og nauðsynlegt er að athuga hvers vegna svo er.

Þar eð ekki náðist að auka vaxtarhraða og afköst örveranna við kjöraðstæður var ákveðið að fara aðra leið í framhaldinu. Sýnt þótti að arðsemi þessa kerfis yrði lítil ef einhver og talsverð vinna eftir á rannsóknarstofu til að ná fram viðunandi afköstum. Sótt var um stóran styrk til Rannsóknasjóðs til verkefnisins “Resource recovery and H₂S emissions reduction from Icelandic Geothermal Power Plants”. Þar er stefnt að því að nota rafskaut til að breyta H₂S í H₂ og brennistein, og síðan nota örverur til að breyta gösunum (aðallega CO₂ and H₂) í verðmæt efni eftir að búið er að fjarlægja brennsteininn að mestu leyti. Samstarfsaðilar í þessari umsókn eru Háskóla Íslands, HÍ (Sigurður Brynjólfsson), Tækniháskólanum í Danmörku, DTU (Karsten Zengler) og Háskólanum í Gent, Ugent (Korneel Rabaey).

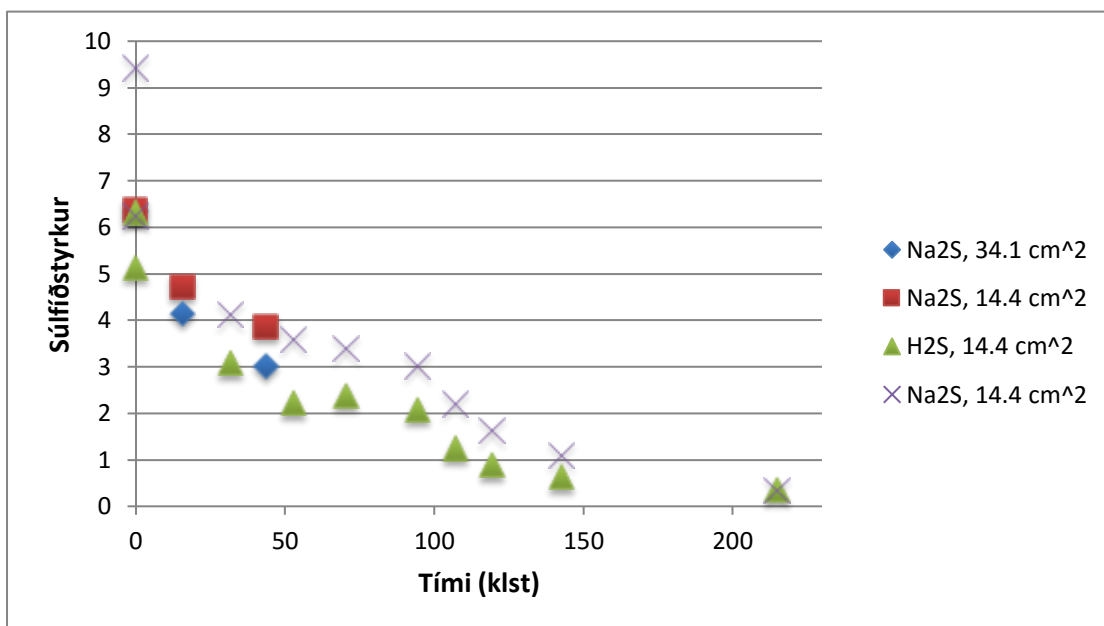
2. Niðurstöður með vatni frá Hellisheiðarvirkjun

Ræktun *D. propionicus* við 5, 7.5 og 10 mM súlfíðstyrki (frá Hellisheiðarvatninu) gekk ekki upp. Hvorki gleypni við 600 nm né súlfíðmælingar sýndu fram á vöxt bakteríunnar. Gleypnimæling við 600 nm í 100 ml ræktunum var ekki marktæk þar sem Hellisheiðarvatnið virtist mynda ljósar útfellingar í ræktunum. Súlfíðmælingar á þessum ræktum sýndu að súlfíðmagn fór lækkandi. Ef bakteríuvöxtur hefði átt sér stað væri búið við hækkuðum súlfíðstyrk. Út frá 10 mL ræktum var sáð í ferskt venjulegt æti. Ennfremur var sáð í nýtt æti út frá bakteríurækt sem var í ágætum vexti og greinilega lifandi. Þessi nýja rækt var hugsuð sem viðmið. Engin af þessum ræktum óx upp. Ekki heldur viðmiðunarrækt. Einnig var sáð út frá 100 ml ræktunum til að sjá hvort bakteríurnar gætu hafið vöxt á ný í fersku æti með propionat sem rafeinagjafa. Enginn vöxtur kom fram í þeim ræktum. Það að viðmiðunarrækt yxi ekki heldur upp gefur til kynna að ef til vill hafi eitthvað verið athugavert við

bakteríuræktunina. Hún er mjög vandasöm og margt getur farið úrskeiðis. Fjármagn vantar til að kaupa búnað sem auðvelda myndi loftfirra ræktun. Því er ekki ljóst hvort mistök við ræktun sé ástæða þess að ekkert óx upp af ræktum með virkjunarvatni eða hvort bakterían einfaldlega þoli ekki svo háan styrk virkjunarvatns.

Ræktir voru settar upp með járn(III)oxíð sem rafeindabega og brennistein (S^0) sem rafeindagjafa. Ekki er hægt að staðfesta að vöxtur hafi orðið í ræktum sem útbúnað voru með þessum hætti.

Borinn var saman oxunarhraði súlfíðs í 10 mM Na_2S lausn (í bioreactor æti) annars vegar og niðurdælingarvatninu hinsvegar. Lagt var upp með að lokastyrkur væri 10 mM í báðum kerfum en upphafsmælingar gáfu til kynna mun lægri styrk í niðurdælingarvatninu. Mynd 2.1 sýnir lækkun á súlfíðstyrk í kerfunum yfir tíma. Einnig var hraði súlfíðoxunar með misstórum grafitstöngum, 14.4 cm^2 og 34.1 cm^2 , borinn saman. Mynd 1 sýnir hvernig stærri grafitstöng eykur hraða oxunarinnar.



Mynd 2.1: Breyting í súlfíðstyrk á tíma. Merkingin H_2S merkir að súlfíð er á formi brennisteinsvetnis úr niðurdælingarvatni frá Hellisheiði. Oxunarhraði eykst greinilega með auknu flatarmáli rafskauts..

Áreiðanleiki súlfíðmælinga var að lokum metinn. Reyndist aðferðin góð og með lítið staðalfrávik.

2.1.Umræða

Erfitt er að útskýra hvers vegna enginn vöxtur átti sér stað við mismunandi súlfíðstyrki. Þegar bakterían er venjulega rættuð upp afoxar hún sulfat (SO_4^{2-}) yfir í súlfíð ($-\text{S}^{2-}$) með aðstoð própíonats sem rafeindagjafa. Mæling á súlfíðstyrk í nokkurra daga gömlum ræktum gefa til kynna að bakterían geti þolað súlfíðstyrk yfir 5 mM. Talað hefur verið um að sulfatafoxarar eigi almennt erfitt með að lifa við hærri styrk en 5 mM af súlfíði (1995). Í 9 daga gamalli rækt mældist styrkur sulfíðs þó sem dæmi um 8 mM. Ef til vill þolir *D. propionicus* almennt óvenjuháan styrk sulfíðs. Eins getur verið að sá stofn sem unnið er með hafi aðlagast þessum aðstæðum því hann hefur endurtekið komist í tæri við háan súlfíðstyrk. Af þessu sést að ólíklegt er að bakterían hafi dáið út af of háum styrk sulfíðs í virkjunarvatni. Tveir aðrir kostir eru mun líklegri. Annars vegar að mistök hafi verið gerð við ræktun. Viðmiðunarrækt sem ekki óx upp bendir til að svo megi vel vera. Hins vegar geta verið til staðar í virkjunarvatninu önnur skaðleg efni, líkt og þungamálmar, sem bakterían þolir ekki. Mikilvægt er að fá upplýsingar um nákvæma efnasamsetingu vatnsins. Ennfremur þarf að átta sig á hvað kann að hafa farið úrskeiðis við bakteríuræktunina og endurtaka hana. Ljóst er að vöxtur viðmiðunarræktar er algjör forsenda þess að hægt sé að treysta gögnunum.

Í grein Lovley og Phillips frá 1994 þar sem *D. propionicus* var rættuð upp með járnoxíði og brennisteini var vöxtur mun hægari en í venjulegu æti. Hámarksvexti var náð eftir um 3 til 5 vikur. Því er ljóst að bakterían á erfitt með að vaxa upp við þessar aðstæður.

3. Niðurstöður á rannsóknastofu – kjöraðstæður

Bakterían *D. Propionicus* er loftfirrt og var ræktuð í 125 mL ætisflöskum. Fyrst við 37 °C en síðar við 34°C og 30°C. Fylgst var með vexti hennar með gleypnimælingum og passað að hún kæmist ekki í snertingu við súrefni með því að blása köfnunarefni um ræktina og ætið.

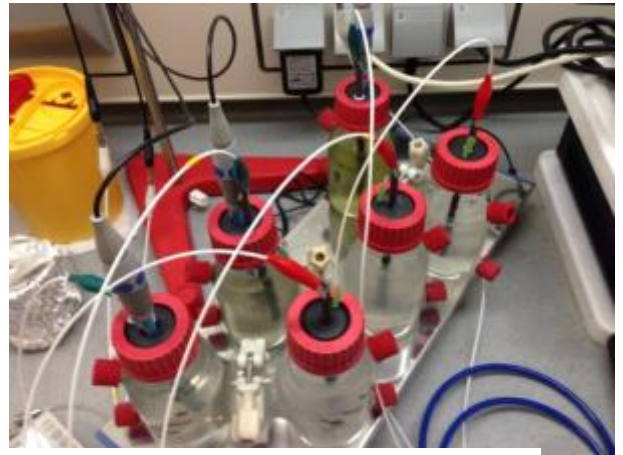
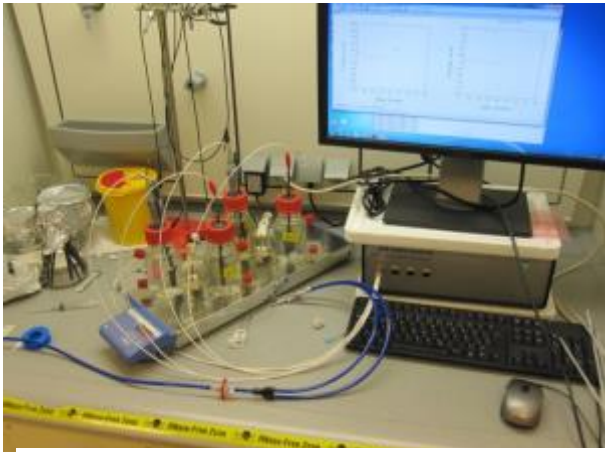
Í loftfirra örveruefnarafalinn (anoxic microbial fuel cell) var notuð glervara frá Adams and Chittenden Scientific Glass. Notast var við grafitrafskaut. Fyrst rafskaut sem höfðu um 14,4cm² snertiflöt við lausn í kerfinu en síðar voru útbúnar ný rafskaut með snertiflöt um 34.1cm² (sjá mynd 4.1). Rafskautin voru meðhöndluð með sýru og basa og prótónuskiptahimnurnar soðnar áður en þeim var komið fyrir á sinn stað. Kerfið var svo gert sterílt í autoklava. Loks var ætislusn bætt út í og reference electróðum komið fyrir eftir meðhöndlun með sýru og etanóli. Kerfið var loks tengt við straummæli og spennumun komið á milli anóðu og katóðu. Uppstillingu kerfisins má sjá á myndum 4.2 og 4.3.

Prófað var að nota mismunandi skammta af Na₂S. Alltaf voru notuð tvö kerfi, eitt með bakteríu(1) og annað til samanburðar(2), nema í keyrslu tvö þar sem þrjú kerfi voru notuð, tvö með bakteríu(1,2) og eitt til samanburðar(3). Eftir að kerfin voru uppsett og kveikt hafði verið á mælitækjum var beðið eftir því að straumur næði grunnlínu.



Að þessu sinni var ákveðið að nota natríumsúlfíð (Na₂S) í stað brennisteinsvetnis. Þetta var gert af öryggisástæðum en einnig vegna þess tíma sem tekur að útvega brennisteinsvetni frá háhitasvæðum og flytja rannsóknartæki. Þegar straumur hafði náð grunnlínu var Na₂S sprautað í bæði kerfin og straumur mældur til að sjá hvort þau væru eins. Ef þau virtust eins eða því sem næst var beðið eftir því að straumur

næði grunnlínu og *D. propionicus* bætt út í kerfi 1 anóðumegin. Um 10mL af bakteríurækt var bætt út í. Bakteríuræktin var sett í skilvindu til að fá sem hæstan styrk af bakteríu á sem minnstu rúmmáli inn í kerfið. Í tilraun 1 var ein ræktunarflaska notuð, í tilraun 3 voru þrjár ræktunarflöskur notaðar en í hinum tilraununum voru tvær notaðar.



Myndir 4.2 og 4.3. Hér má sjá uppstillingu kerfanna. Undir skjánum er straummælir sem tengdur er tölvu. Straummælingar eru skoðaðar af skjánum. Í keyrslu tvö voru 3 kerfi notuð. Vinstra megin er anóðan, sem bakteríunni er bætt út í, og hægra megin er katóðan þar sem H^+ var afoxað í $H_{2(g)}$. Efnarafall 1 er næst á mynd, svo 2 og að lokum 3 sem notaður var sem viðmið (control).

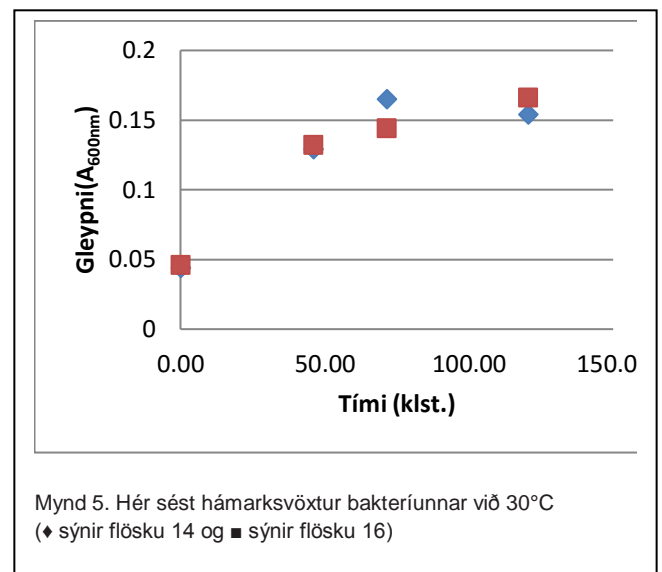
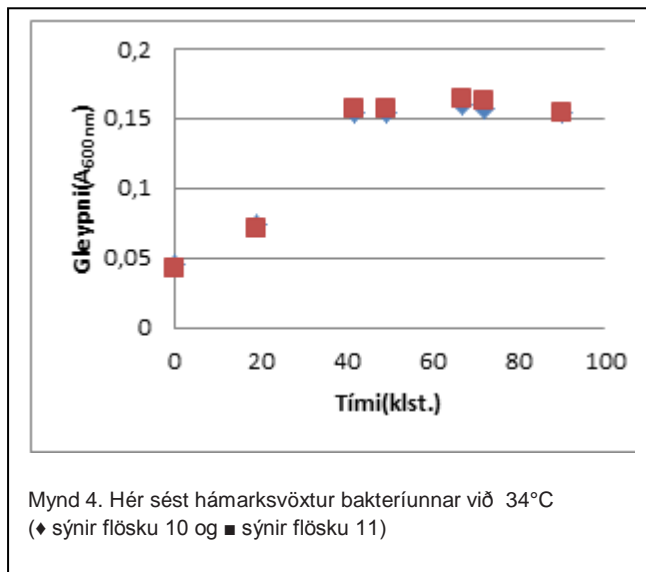
Beðið var yfir nótt til að leyfa bakteríunni að festa sig á skautið og venjast nýjum aðstæðum. Því næst var Na_2S sprautað í bæði kerfin og fylgst með straumaukningunni. Þegar straumurinn hafði náð grunnlínu var svo þriðja skammtinum af Na_2S bætt út í bæði kerfin og fylgst með hvað gerðist. Allan tíman voru sýni tekin anóðumegin og geymd í frysti þar til mælingar fóru fram. Na_2S er basískt og sýrustig var mælt og stillt af með sýru ef talið var nauðsyn til. Þar sem einblínt var á anóðuhluta hvarfsins var engin baktería katíðumegin heldur tóku þar prótónur við rafeindunum og afoxuðust yfir í vetni (H_2). Eftir fyrstu tvær keyrslur varð ljóst að stanlaust yrði að blása köfnunarefni í gegnum efnarafalinn katóðumegin eftir að Na_2S var bætt út í. Þegar köfnunarefni var blásið í gegnum efnarafalinn katóðumegin nokkru eftir að Na_2S hafði verið bætt út í (keyrsla 1 og 2) kom fram annar toppur í straummælingunum. Þetta þýðir að líklega hefur of mikið vetni verið til staðar katóðumegin, prótónustyrkur þar með aukist og hindrað framgang hvarfsins.

3.1.Niðurstöður

Markmiðið var í fyrsta lagi að stöðga kerfið. Ef það tækist væri möguleiki að prófa aðra bakteríu eða að flytja tækjabúnað og prófa H₂S frá háhitasvæðum.

3.1.1. Bakteríuræktun:

Unnið var með *D. propionicus* og hún ræktuð upp. Vaxtarkúrfra hennar ákvörðuð og reynt að meta lífvænleika hennar í efnarafalinum. Fyrst var gleypni mæld til að átta sig á hvenær bakteríurnar næðu hámarksvext og má sjá slýkar mælingar fyrir flöskur 10 og 11 við 34°C á mynd 4. Samkvæmt mælingunum náði bakterían hámarksvexti eftir tæpa 3 sólarhringa. Ein gleypnimæling var gerð til viðbótar á flöskum 10 og 11, 16 dögum eftir að ræktun í þeim hófst og voru gildin; 10: 0,118 og 11:0,020. Eftir 16 daga voru bakteríurnar í flösku 11 sem sagt dauðar og bakteríurnar í flösku 10 deyjandi. Ræktun við 30°C gaf hámarksvext við 3-5 sólarhringa allt eftir flöskum og staðsetningu þeirra í hitaskápnunum. Vöxt við 30°C má sjá á mynd 5. Þessar mælingar



voru notaðar sem viðmið þegar bakteríum var bætt út í kerfið.

Ráðgert var að taka sýni anóðumegin úr kerfunum til gleypnimælinga og fylgjast þannig með hvort bakterían gæti lifað við þessar aðstæður. Þetta reyndist ekki mögulegt þar sem efni t.d. brennisteinn í ætislausninni í truflaði mælingar svo þær gáfu engar upplýsingar. Brugðið var á það ráð að taka sýni til ræktunar úr kerfum 1 og 2 í annarri keyrslu til að reyna að sjá hvort eitthvað væri á lífi. Um átta sólarhringum eftir að bakteríunum var bætt út í kerfið voru sýni tekin og ræktuð upp í flöskum 1a og 2a. Greinilegur bakteríuvöxtur varð og voru þær bakteríur ræktaðar upp áfram og að lokum nýttar í fimmtu keyrslu. Til að reyna að sjá hvort um rétta

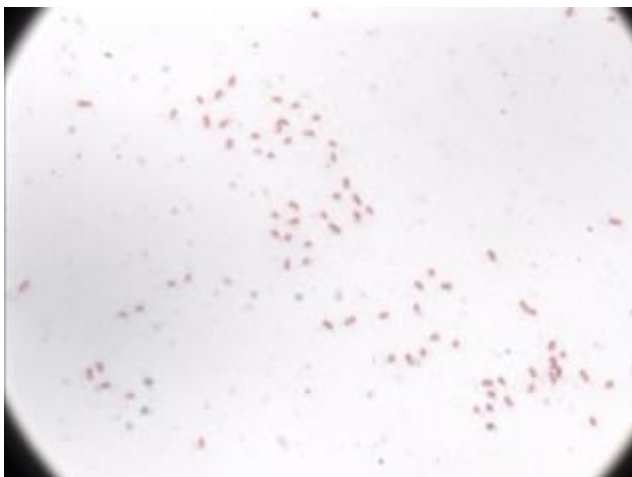
bakteríu væri að ræða í nýju ræktinni voru sýni gramlituð og skoðuð í smásjá. *D. propionicus* er gram-neikvæð sítonu- eða laukslaga baktería með festipræði. Frumurnar vaxa ýmist einar, tvær saman eða í stuttum keðjum.¹ (Sýnin má sjá á myndum 6,7 og 8).



Mynd 6. Gramlituð rækt úr flösku 33

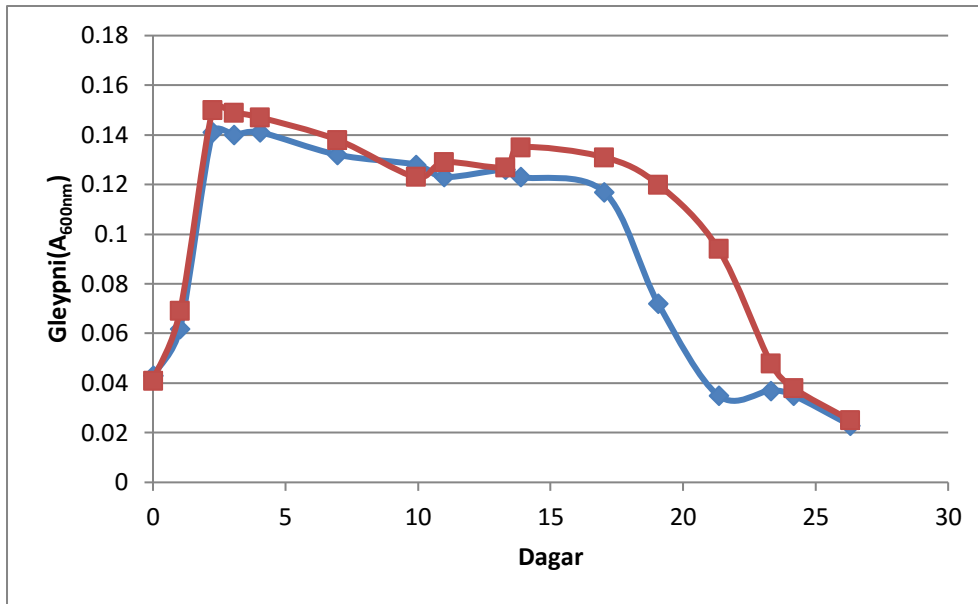


Mynd 7. Gramlituð rækt úr flösku 1e



Mynd 8. Gramlituð rækt úr flösku 2e

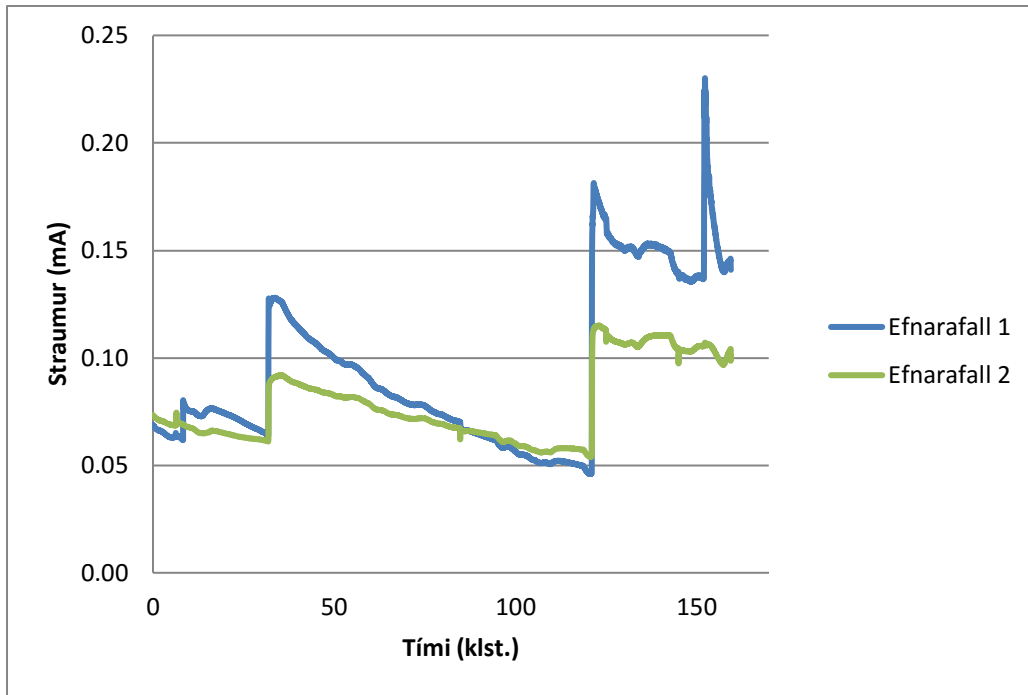
Að sjálfsögðu er ekki hægt að sannreyna með þessum hætti að um rétt baktería *D. propionicus* hafi verið ræktuð upp. Engu að síður passaði útlit sýnanna við lýsingu á bakteríunni og sýnin voru mjög lík innbyrðis. Vaxtarkúrfa við 30°C var gerð fyrir ræktun í flöskum 38 af upprunalegu ræktinni og 2G af nýju ræktinni og borin saman (sjá mynd 9)



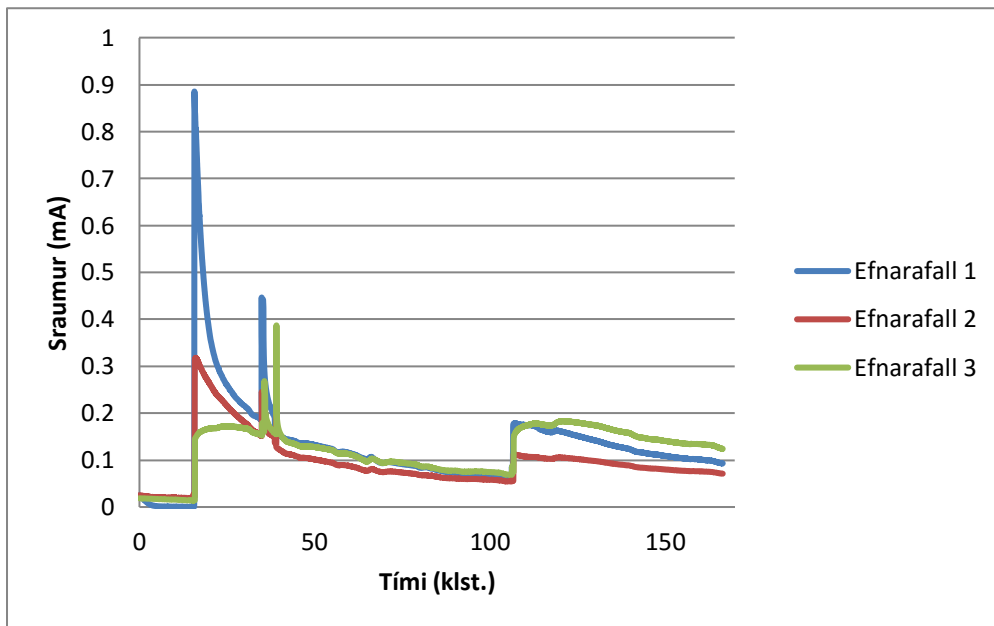
Mynd 9. Hér sést vaxtarkúrfa bakteríuræktar í flöskum 2g(◆) og 38 (■) við 30°C

3.1.2. Straummælingar:

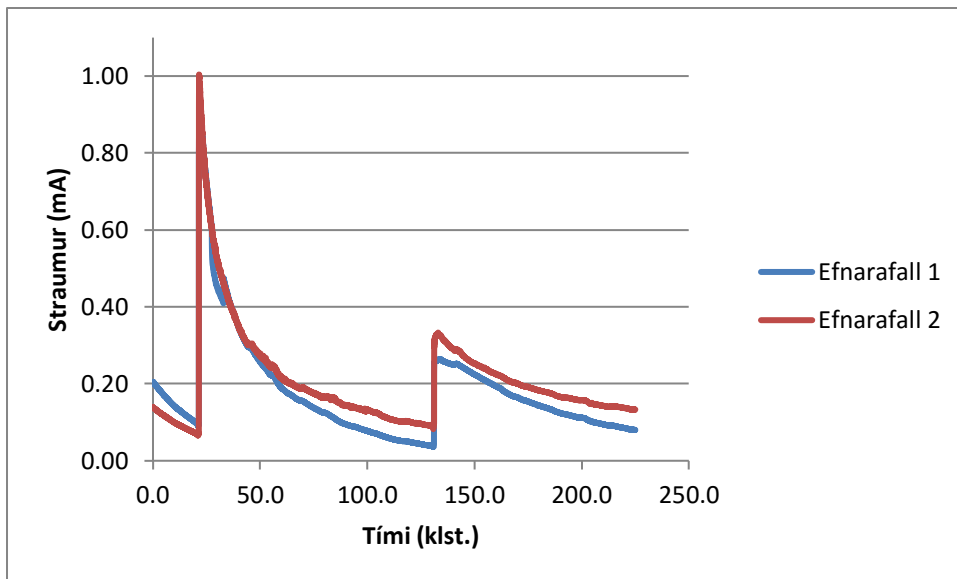
Fimm keyrslur voru gerðar. Í tveimur fyrstu var greinilegur munur á straum milli efnarafals með bakteríu og án hennar (sjá myndir 10 og 11). Í keyrslu 2 var talsverður munur við fyrstu innspýtingu en enginn við aðra sem gefur til kynna að bakterían hafi mögulega verið farin að slappast. Mismunandi straumur milli keyrslana skýrist af því að ekki var sama magn af Na₂S notað. Ætlunin var að prófa mismunandi styrki og meta hvað hentaði best til mælinga. Takið eftir hvernig lítill toppur myndast í keyrslu 1 þegar bakteríunni er bætt út í eftir u.þ.b. 8 klst. Líklegast er að H₂S sem komið hefur með bakteríunum hafi orsakað hann. Í seinni keyrslum voru bakteríurnar þvegnar með efnarafalsætislausn til að losna við þennan topp. Toppur sem myndast við 160 klst. í keyrslu 1 og við 40 klst. í keyrslu 2 orsakast af því að köfnunarefni var blásið um katóðu efnarafalanna til að losa vetni út og örva þar með framgang hvarfsins. Í síðari keyrslum var köfnunarefni blásið um katóðuna stanslaust í kringum Na₂S innspýtingu til að hvarfið gengi sem best (sjá mynd 12). Straummæling úr keyrslu 5 verður tekin sem dæmi fyrir seinni þrjár keyrslurnar sem gáfu ekki mun á milli kerfa. Ekki gafst tími til að meta nákvæman straummun með tilkomu nýju rafskautanna sem notuð voru í keyrslu 3-5.



Mynd 10. Straummæling fyrir keyrslu 1.



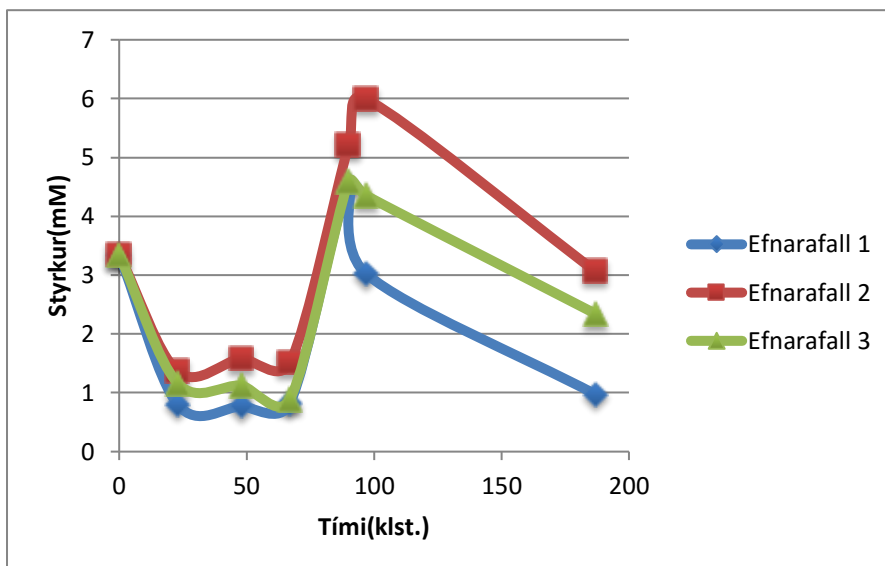
Mynd 11. Straummæling fyrir keyrslu 2.



Mynd 12. Straummæling fyrir keyrslu 5.

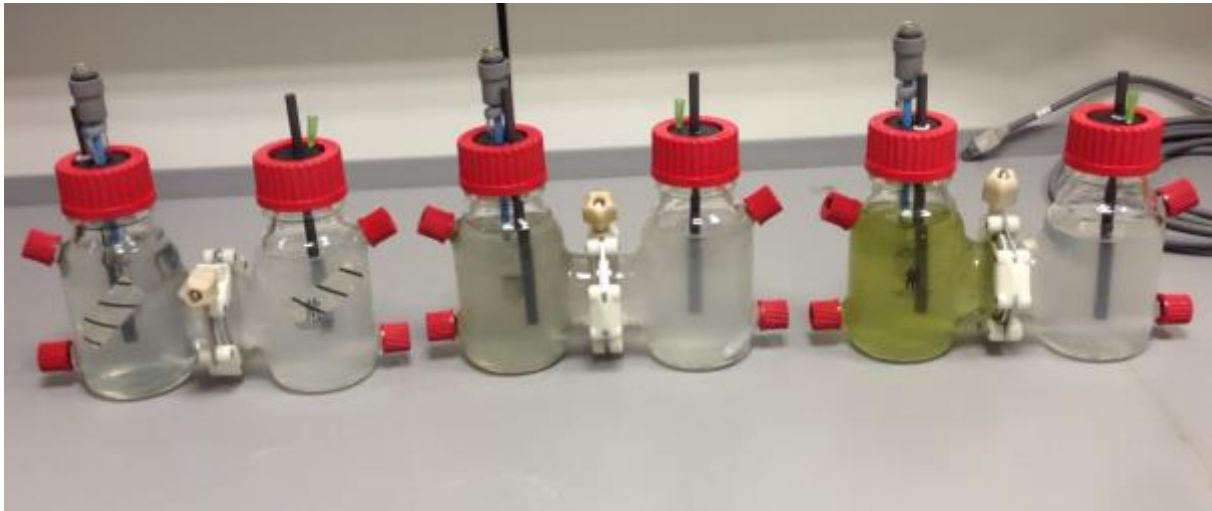
3.1.3. Súlfíð- og súlfatmælingar:

Súlfíð var mælt fyrir keyrslur 1 og 2. Enn hefur magnið í hinum keyrslunum ekki verið mælt. Á mynd 13 má sjá breytingu á súlfíðstyrk í keyrslu 2 eftir aðra og þriðju innspýtingu Na_2S þ.e. eftir að *D. propionicus* var bætt út í og þar til keyrslunni lauk.



Mynd 13. Breyting súlfíðstyrks á tíma í keyrslu 2. Na_2S var bætt í kerfið við 0 klst. og 90 klst.

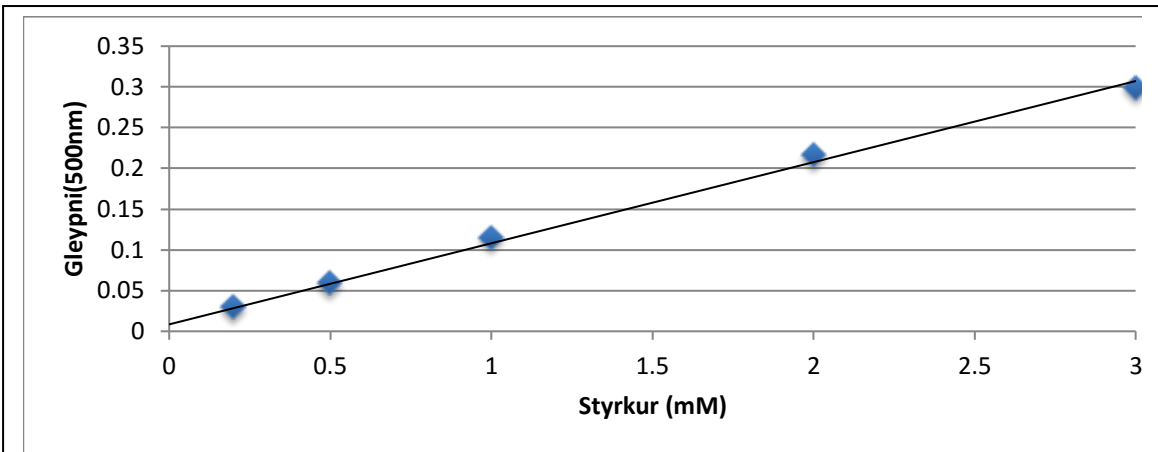
Súlfatmælingar voru gerðar á sýnum úr keyrslum 1 og 2. Ekki tókst að mæla súlfat í þeim. Þetta vakti nokkra furðu þar sem ýmislegt benti til þess að hvarfið væri að eiga sér stað. Þá helst straummunur milli efnarafalana með bakteríu og án hennar og svo litur ætisins í lok keyrslanna. Brennisteinn gefur gulan lit en súlfat er litlaust. Á mynd 14 má sjá efnarafala 1,2 og 3 eftir keyrslu 2.



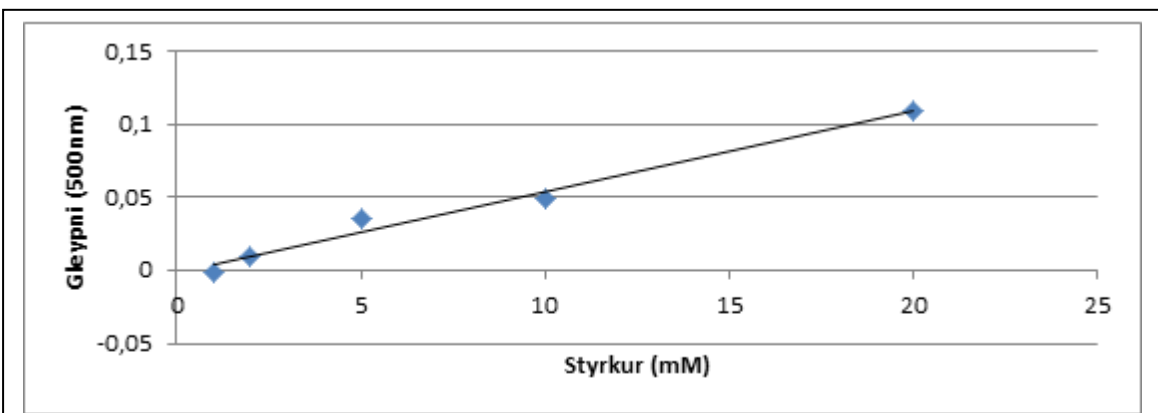
Mynd 14. Hér má sjá litamun á kerfum 1, 2 og 3. Efnarafall 1 er vinstra megin, efnarafall 2 í miðju og efnarafall 3 hægra megin. Efnarafall 3 sem var án bakteríu sýnir greinilegan gulan lit af völdum brennisteins (S^0) ólíkt hinum. Efnarafall 1 er enn tærari en efnarafall 2.

Við nánari athugun varð ljóst að mæliaðferðin sem notast var við var ekki nógu nákvæm. Mögulega var súlfat til staðar en bara ekki í nægilega miklu magni til að mæla það af nákvæmni. Vinna var unnin við að bæta mæliaðferðina. Að lokum reyndist gefa ágætis raun að bæta 100 μ L af 0,1 M HCl við 0,5 mL sýni og bæta svo 600 μ L af 0,01% agarósalusn með 25mM $BaCl_2$ saman við og mæla gleypnina við 500 nm eftir 1 mín. Myndir 15 og 16 gefa samanburður á staðalkúrfum sem fengust með gömlu og nýju aðferðinni.

Mögulega væri hægt að nota fyrri aðferðina til að mæla styrk upp á nokkra mM en aðferðin dugar engan vegin við lágan styrk. Með nýju aðferðinni sem vonandi verður bætt enn frekar tókst að mæla 0,2 mM af súlfati við lok keyrslu 5. Þetta jafngildir því að um 2% af því súlfíði sem bætt var út í skili sér yfir í súlfat. Sé aðeins litið á það súlfíð sem bætt var út í eftir að bakteríunni var komið fyrir hækkar hlutfallið í 3%. Þetta getur varla talist mikið en sýnir þó að ferlið á sér stað.



Mynd 16. Grafið sýnir samband styrks og gleypni sem fékkst með nýju mæliaðferðinni. $y=0,0995+0,0085x$ og $R^2=0,9959$



Mynd 15. Grafið sýnir samband styrks og gleypni sem fékkst með þeirri mæliaðferð sem fyrst var notuð. $y=0,0055x-0,0019$ og $R^2=0,9818$

3.2.Umræða:

Niðurstöður voru þokkalegar. Þrátt fyrir talsverða hnökra tókst að lokum að sýna fram á að hvarfið á sér stað. Hægt verður að vinna áfram með þau gögn og þá þekkingu sem fengist hefur til að bæta hvarfskilyrði. Fljótt kom í ljós að kerfin eru viðkvæm fyrir áreiti og utanaðkomandi breytum. Því getur reynst erfitt að skapa fullkomlega sömu skilyrði á milli mismunandi efnarafala. Endurtaka þarf tilraunirnar ítrekað til að fá marktækar niðurstöður. Tilraunin tekur hins vegar langan tíma og krefst nákvæmni svo nær vonlaust er að reyna að flýta fyrir ferlinu.

Eftir að skipt var um skaut mældist enginn munur í straum á milli kerfanna. Mögulegt er að nýju skautin hafi ekki orðið jafnmettuð af brennisteini og því hafi hvarfið án

bakteríunnar ekki verið hindrað eins. Því hafi straumurinn mælst áþekkur milli kerfanna. Sé það raunin þyrfti að auka enn súlfíðstyrkinn til að fá mun á milli kerfanna. Um nýja tækni er að ræða svo mikið þarf að prófa sig áfram.

Hlutir sem gæti haft áhrif á straummælingar er að oxun súlfíðs eigi sér stað en að rafskautið sé ekki lokarafeindagegi heldur einhver efnanna í ætisláuninni. Þó fremur ólíklegt sé þarf að skoða þetta betur. Straummælingar í keyrslu 5 gáfu ekki til kynna að bakteríuhvarfið væri að ganga því straumur í efnaröfulunum var nánast sá sami. Aftur á móti var greinilegur litamunur á ætisláun anóðumegin eins og mynd 17 sýnir. Þrátt fyrir þennan mikla litamun mældist aðeins 0,2 mM af súlfati í anóðu efnarafals 1. Taka þarf með í reikninginn að mögulega sé hluti þess súlfats sem myndast hefur enn inni í bakteríunni og því ekki mælanlegur nema eftir frumurof. Þetta þarf að skoða í framhaldinu. Einnig er mögulegt að brennisteinn (S^0) safnist upp í bakteríunni án þess að breytast í súlfat og ætisláunin því ekki eins gulleit.



Mynd 17. Anóður efnarafalanna eftir keyrslu 5. Vinstra megin er kerfi 1 en hægra megin kerfi 2.

Bakteríurnar sem notaðar voru í keyrslu 5 voru afkomendur bakteríanna sem notaðar voru í keyrslu 2. Með þessu var sýnt að bakteríurnar virðast geta lifað í efnarafalinum í nokkra daga. Það að þær séu á lífi þýðir samt ekki að þær starfi eðlilega. Þær gætu t.d. verið í fasa þar sem þær hætta að fjölga sér og draga úr efnaskiptaferlum. Ástæða þess að bakteríur voru ræktaðar upp frá sýnum úr efnaröfulunum í keyrslu 2 voru tvær. Annars vegar að vita hvort þær væru enn á lífi og hins vegar að rækta þær upp til notkunar í seinni keyrslu. Vonast var til að sú rækt væri betur til þess fallin að þola umhverfisaðstæður í efnarafalinum því hún var komin af bakteríum sem höfðu þolað slíka meðferð áður. Ekki varður hægt að fullyrða neitt um hvort nýja ræktin hafi

þolað aðstæður betur eða verr. Á þessu stigi eru slíkar prófanir ekki það sem liggur brýnast á en þegar kerfið hefur verið stöðgað betur er þetta aðferð sem skemmtilegt væri að skoða betur. Líklegast er besta leið til að meta lífvænleika bakteríunnar að taka sýni úr efnarafal og nota live/dead litun til að skoða sýnið. Einnig væri hægt að lita rafskautið sjálft með live/dead lit og skoða. Vandamál gæti verið að bakteríuræktin í efnarafalinum sé ekki nógu þétt og því erfitt að fá gott sýni. Alltaf væri þó hægt að ná í hærri styrk fruma með aðstoð skilvindu.

Á þessu ári fékkst góð reynsla á framkvæmd á tilraunum við bakteríuhvataðan efnasamruna. Fyrstu niðurstöður liggja fyrir og staðfesta að bakteríunum tókst að lifa í efnarafal í nokkurn tíma og framkvæma hvarfið þó afköstin mættu vera betri. Áfram verður unnið að því að auka afköst og besta ferlið.

4. Heimildaskrá

Cline, J.D. (1969). Spectrophotometric Determination of Hydrogen Sulfide in Natural Waters. *Limnol. Oceanogr.* 14, 454–458.

Gong, Y., Ebrahim, A., Feist, A.M., Embree, M., Zhang, T., Lovley, D., and Zengler, K. (2013). Sulfide-driven microbial electrosynthesis. *Environ. Sci. Technol.* 47, 568–573.

Holmes, D.E., Bond, D.R., and Lovley, D.R. (2004). Electron Transfer by *Desulfobulbus propionicus* to Fe(III) and Graphite Electrodes. *Appl. Environ. Microbiol.* 70, 1234–1237.

Jackson, S.G., and McCandless, E.L. (1978). Simple, rapid, turbidometric determination of inorganic sulfate and/or protein. *Anal. Biochem.* 90, 802–808.

Lovley, D.R., and Coates, J.D. (2000). Novel forms of anaerobic respiration of environmental relevance. *Curr. Opin. Microbiol.* 3, 252–256.

Lovley, D.R., and Phillips, E.J.P. (1994). Novel Processes for Anaerobic Sulfate Production from Elemental Sulfur by Sulfate-Reducing Bacteria. *Appl. Environ. Microbiol.* 60, 2394–2399.

Nevin, K.P., Woodard, T.L., Franks, A.E., Summers, Z.M., and Lovley, D.R. (2010). Microbial Electrosynthesis: Feeding Microbes Electricity To Convert Carbon Dioxide and Water to Multicarbon Extracellular Organic Compounds. *mBio* 1.

Nielsen, A.Z., Ziersen, B., Jensen, K., Lassen, L.M., Olsen, C.E., Møller, B.L., and Jensen, P.E. (2013). Redirecting photosynthetic reducing power toward bioactive natural product synthesis. *ACS Synth. Biol.* 2, 308–315.

Nogales, J., Gudmundsson, S., Knight, E.M., Palsson, B.O., and Thiele, I. (2012). Detailing the optimality of photosynthesis in cyanobacteria through systems biology analysis. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 109, 2678–2683.

Pagani, I., Lapidus, A., Nolan, M., Lucas, S., Hammon, N., Deshpande, S., Cheng, J.-F., Chertkov, O., Davenport, K., Tapia, R., et al. (2011). Complete genome sequence of *Desulfobulbus propionicus* type strain (1pr3T). *Stand. Genomic Sci.* 4, 100–110.

(1995). *Sulfate-Reducing Bacteria* (Boston, MA: Springer US).