



**Miljø- og
Fødevareministeriet**
Miljøstyrelsen

OptiGas Slutrapport

MUDP-rapport

Februar 2019

Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion:

Caroline Kragelund Rickers, PhD, Teknologisk Institut

Christian Holst Fischer, Cand. Polyt. Teknologisk Institut

Tore Svendsen, BIO-AQUA

Lars Ravn Nielsen, KomTek Miljø

Dines Thornberg, BIOFOS

Artur Mielczarek, BIOFOS

ISBN: 978-87-7038-033-1

Miljøstyrelsen offentliggør rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, som er finansieret af Miljøstyrelsen. Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter. Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Må citeres med kildeangivelse.

Indhold

Forord	4
Opsummering og konklusion	5
1. Koncept og strategi	6
1.1 OptiGas-konceptet	6
1.2 Udarbejdelse af strategi	6
2. Laboratorieforsøg – effekt af biofilmcarriers	8
2.1 Metode og materialer	8
2.1.1 Biogasreaktorer	8
2.1.2 Kvantificering af gasproduktion	8
2.1.3 Drift af reaktorer	9
2.1.4 Kemiske målinger	10
2.2 Resultater	10
2.2.1 Gasproduktion	10
2.2.2 Tørstofindhold og indhold af organisk materiale i reaktorerne	11
2.3 Konklusion	11
3. Laboratorieforsøg – additiv tilsætning	12
3.1 Metode og materialer	12
3.1.1 Batchudrådning	12
3.1.2 Kontinuert udrådning	12
3.2 Resultater	12
3.2.1 Batchudrådning	12
3.2.2 Kontinuert udrådning	14
3.3 Konklusion	15
4. Design og udvikling af pilotanlæg	16
5. Drift af pilotskalareaktorer	19
5.1 Udfordringer og læring	20
5.2 Separatudrådning - slam	21
5.3 Samudrådning	23
5.4 Mikrobiologi på blokmedier	25
5.5 Opsummering af pilotskalaforsøg	27
5.6 CAPEX/OPEX	27

Forord

Dette er slutrapporten for projektet "OptiGas - Reaktorkoncept til optimal udnyttelse af biopulp til biogas" under Miljøministeriets tilskudsordning MUDP. Projektet blev gennemført i perioden januar 2016 til maj 2018 i et samarbejde mellem Bio-Aqua, KomTek Miljø A/S, BIOFOS A/S og Teknologisk Institut.

Projektets styregruppe bestod af:

- Erik Jessen Jürgensen og Tore Svendsen, BIO-AQUA
- Dines Thornberg, BIOFOS
- Lars Ravn Nielsen, Komtek
- Caroline Kragelund Rickers, Teknologisk Institut

Formålet med projektet var at udvikle et kompakt og højeffektivt reaktorkoncept til bioforgasning af kildesorteret organisk affald og spildevandsslam.

Opsummering og konklusion

Projektet blev gennemført i perioden januar 2016 til maj 2018 i et samarbejde mellem BIO-AQUA, KomTek Miljø A/S, BIOFOS A/S og Teknologisk Institut. Formålet med projektet var at udvikle et kompakt og højeffektivt reaktorkoncept til bioforgasning af kildesorteret organisk affald og spildevandsslam. Reaktorkonceptet baserede sig på et system, hvor biofilm fastholder den aktive mikrobiologi på blokmedier med en stor overflade, hvilket øger den samlede mængde mikrobiologi og dermed potentielt faciliterer en mere effektiv omsætning. Indledningsvis blev effekten af biofilm påvist i systematiske laboratorieskalaforsøg, som bekræftede hypotesen om forøget omsætningsrate.

Med udgangspunkt i laboratorieskalaforsøg konstruerede BIO-AQUA Optigas-pilotskalaanlægget, som blev opstillet på BIOFOS' renseanlæg. Pilotanlægget blev opbygget i en isoleret container, således at pilotanlægget let kunne transporteres til renseanlægget og anvendes udendørs. De to tanke var identiske i udformning og størrelse, og den eneste forskel var således, at den ene tank indeholdt blokmedier, som faciliterede fasthæftningen af mikroorganismer. Gassen fra reaktorerne blev afledt i toppen af tankene via to gasmålere og blev ventileret væk gennem en høj skorsten.

De gennemførte pilotskalaforsøg viser med tydelighed, at den biofilmbaserede reaktor var i stand til at opretholde en meget høj omsætning af organisk materiale ved en kort opholdstid og en høj organisk belastning. Således var produktionsraten i den biofilmbaserede reaktor ca. fem gange højere end i den konventionelle reaktor i de gennemførte forsøg. Tilsvarende blev det vist, at omsætningsgraden ved samudrødning af kildesorteret organisk dagrenovation (KOD) og spildevandsslam var meget høj for den biofilmbaserede reaktor ift. den konventionelle reaktor. I projektet blev der gennemført pilotskalaforsøg over en periode på mere end et halvt år. Grundet udfordringer med temperaturstyring, skumning, hydraulik, gasflowmåling og svovlbrinte har det kun været muligt at genere produktionsdata i meget korte perioder. De opnåede resultater er således forbundet med store usikkerheder, ligesom langtidseffekter og stabilitet ikke er undersøgt. Igennem forsøgene er der dog genereret viden, som gør det muligt at overkomme disse problematikker fremadrettet.

Forsøgene indikerede potentialet i biofilmbaserede biogasreaktorer, idet det var muligt at opnå høj produktionsrate sammenlignet med konventionelle reaktorer. Denne meromsætningskapacitet tilskrives den øgede mængde af aktivt biologisk materiale, som udgør biofilmen på blokmedierne, og som i projektet blev kvantificeret til at være ca. en fordobling ift. reaktoren uden blokmedier. Tillige blev der i perioder observeret en højere metanprocent i den producerede gas fra den biofilmbaserede reaktor, hvilket minimerer behovet for en efterfølgende gasrensning.

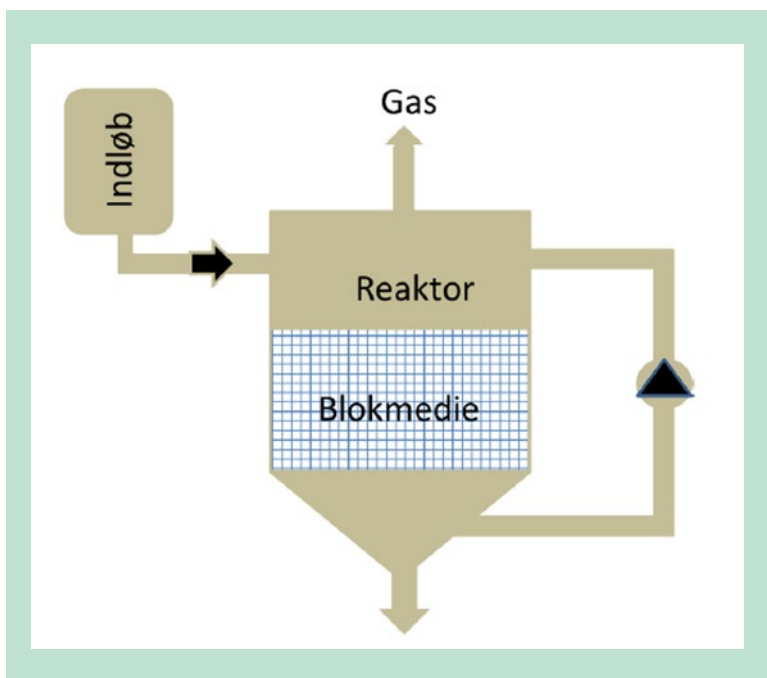
I projektet er der gennemført indledende beregninger på CAPEX/OPEX for en biofilmbaseret reaktor ved antagelse af, at reaktortvolumen kan reduceres til ca. 20 %. Disse viste, at omkostninger til konstruktionen af reaktoren vil blive reduceret med ca. 65 %. Endvidere vil opvarmningsomkostningerne kunne reduceres med ca. 50 % på grund af det lavere reaktortvolumen af energien, som anvendes til opvarmning. Med den nuværende udformning af omrøringen øges omkostningerne hertil, og endvidere vil der være en merudgift til blokmedierne. Der arbejdes forsat videre på at optimere omrøring, kontakttid til blokmedier og reaktordesign.

1. Koncept og strategi

1.1 OptiGas-konceptet

Den udviklede løsning er en reaktorenhed, som kan tilsluttes eksisterende anlæg (add-on), men som potentielt også kan fungere som stand alone-enhed, og som i forhold til konventionelle reaktorer vil være optimeret til at kunne forgasse biopulp. Det værdiskabende i den udviklede teknologi er, at reaktordesignet har en stor kapacitet (i forhold til volumen), er fleksibelt (muligheder for såvel separat udrådning som samudrådning) og bedre tåler udsving, hvilket gør det muligt at imødegå evt. barrierer i forhold til affald-til-jordbekendtgørelsen (grænseværdier for LAS, PAH, NPE samt DEHP).

OptiGas-reaktoren forventes at kunne opereres ved en signifikant højere belastning og væsentligt kortere opholdstid, idet biopulp overvejende består af nemt omsætteligt organisk materiale. Herudover fremmes en specialiseret mikrobiel population (på blokmedier), som faciliterer hurtigere omsætning af biopulpen, og således forbedres kapaciteten af enheden yderligere. En optimeret mikrobiel population er helt essentiel for stabil operation af OptiGas, og det er en forudsætning for opnåelse af optimal vækst og omsætning af det organiske materiale, at essentielle mikronæringsstoffer er til stede. I FIGUR 1 er OptiGas-konceptet skitseret.



FIGUR 1. Skitse af OptiGas-konceptet.

1.2 Udarbejdelse af strategi

Indledningsvis blev der gennemført en litteraturundersøgelse med henblik på at identificere teknologikoncepter af lignende karakter, som allerede er markedsført/testet, samt evt. patenter på området. Litteraturundersøgelsen havde således til formål dels at indhente relevant information om lignende koncepter til brug for designfasen, dels at imødegå eventuelle problemer med patentbeskyttelse på lignende koncepter.

Litteraturundersøgelsen viste, at der igennem en længere årrække er udviklet og afprøvet koncepter, hvor den mikrobielle biomasse er forsøgt dyrket (og dermed tilbageholdt) på forskellige overflader/medier i reaktoren. Systemerne har altså nogen lighed med OptiGas-

konceptet. I beskrivelserne af disse systemer er der anvendt mange forskellige begreber og nomenklaturer, herunder "packed-bed", "fixed-film", "attached-growth", "fixed-biomass", "bio film" og "fix film".

Den identificerede litteratur viser med tydelighed, at de potentielle gevinster er store, men at der i mange tilfælde også kan være problemer med tilstopning. I en konventionel reaktor uledes den mikrobielle biomasse i samme hastighed, som der tilføres ny biomasse. Da dele af den nødvendige mikrobielle population har en lav tilvæksthastighed, vil dette reducere omsætningshastigheden. Således pointerer flere af artiklerne, at det er muligt at opnå samme biogasproduktion ved betydelig kortere opholdstid med blokmedier, hvorfor reaktoren kan gøres meget kompakt. Endvidere har flere studier vist, at reaktorer med blokmedier bedre modstår såvel pludselige stigninger i den organiske belastning (chock loading) som indhold af hæmmende materiale i den tilførte biomasse. I flere undersøgelser er der allerede kort efter forsøgsopstart observeret en øget gasproduktion som resultat af blokmediet.

I langt hovedparten af den identificerede litteratur anvendes der biomasse med et lavt tørstofindhold for dermed at undgå risiko for tilstopning. Ved anvendelse af biomasser med et højere partikulært indhold, som eksempelvis gylle, er biomasse i mange tilfælde blev forfiltreret på en sigte eller fortyndet.

På trods af de mange potentielle fordele virker det ikke til, at biogasreaktorer med blokmedier er særligt udbredte. I 2011 således kun fem kommercielle anlæg implementeret og i anvendelse i USA og ingen i Europa¹.

¹ METHANE PRODUCTION BY A PACKED-BED ANAEROBIC DIGESTER FED DAIRY BARN FLUSH WATER

2. Laboratorieforsøg – effekt af biofilmcarriers

Indledningsvis blev der gennemført en række test med henblik på at undersøge effektiviteten og stabiliteten af fastfilmbiogasreaktorer ift. almindeligt omrørte biogasreaktorer (CSTR) ved udrådning af biopulp. Det er en forudsætning, at der etableres en fastfilm, inden sammenligningen kan foretages. I det nedenstående opsummeres de vigtigste resultater fra forsøgene.

2.1 Metode og materialer

2.1.1 Biogasreaktorer

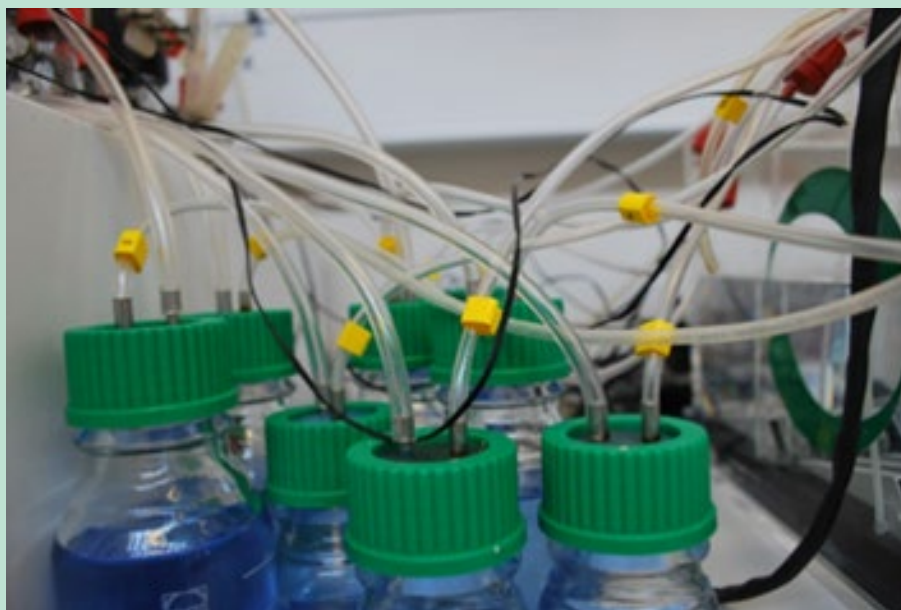
Til forsøget blev der anvendt seks biogasreaktorer, som hver har et volumen på 2 liter (FIGUR 2). I to af reaktorerne var der inkluderet biofilmcarriers med en densitet på mere end 1 (højdensitetcarriers). Disse udgjorde ved opsætning af reaktorerne halvdelen af reaktorvolumen, svarende til 900 ml. I to af reaktorerne var der biofilmcarriers af ekstruderet polyethylen med en densitet på mindre end 1 (lavdensitetcarriers). Disse blev holdt i væskefasen ved hjælp af et tungt objekt. De to resterende biogasreaktorer fungerede som kontrolreaktorer og indeholdt altså ikke biofilmcarriers.



FIGUR 2. Biogasreaktorer.

2.1.2 Kvantificering af gasproduktion

Den producerede gas blev målt automatisk ved anvendelse af AMPTS fra Bioprocess Control-system. Umiddelbart inden gasproduktionen blev målt, blev CO_2 fjernet fra gassen ved at lede gassen over en vandig opløsning af natriumhydroxid (3M) (se FIGUR 3).



FIGUR 3. CO₂ og svovl skrubbet fra den produceres gas ved anvendelse af natriumhydroxid.

2.1.3 Drift af reaktorer

Reaktorerne blev inokuleret med spildevandsslam fra Marselisborg Renseanlæg. Indledningsvis blev der gennemført en adaptationsfase på 25 dage med henblik på at opbygge biofilm på de tilsatte carriers. I perioden blev der tilført nyt spildevandsslam fem gange.

I forsøget blev der anvendt en hydraulisk opholdstid på 20 dage og en reaktortemperatur på 37 °C. Fra dag 25 blev der tre gange ugentligt tilført biopulp (fra KomTek). Biopulpen blev indledningsvis fortyndet med afgasset spildevandsslam (forhold 1:2) for at opretholde pH i reaktorerne. Fra dag 36 blev der i stedet for fortynding med afgasset spildevandsslam fortyndet med afgasset og kogt spildevandsslam for derved at minimere mængden af aktiv bakteriel biomasse. Fra dag 48 blev opholdstiden reduceret til 14 dage. Nedenstående er driftsbetingelserne opsummeret.

Fase 1 - Dag 0-25. Adaptationsfase
Varighed: 25 dage; reaktorpholdstid: 20 dage
Spildevandsslam tilført 5 gange
Fase 2 - Dag 25-36. Lav organisk belastning 1
Varighed: 11 dage; reaktorpholdstid: 20 dage; belastning: 2,5 g VS/l*d
Biopulp tilført tre gange ugentligt (fortyndet med afgasset spildevandsslam 1:2)
Fase 3 - Dag 36-48. Lav organisk belastning 2
Varighed: 12 dage; reaktorpholdstid: 20 dage; belastning: 2,5 g VS/l*d
Biopulp tilført tre gange ugentligt (fortyndet med kogt afgasset spildevandsslam 1:2)
Fase 4 - Dag 48-62. Høj organisk belastning
Varighed: 14 dage; reaktorpholdstid: 14 dage; belastning: 3,5 g VS/l*d
Biopulp tilført tre gange ugentligt (fortyndet med kogt afgasset spildevandsslam og vand (1:1:1))

2.1.4 Kemiske målinger

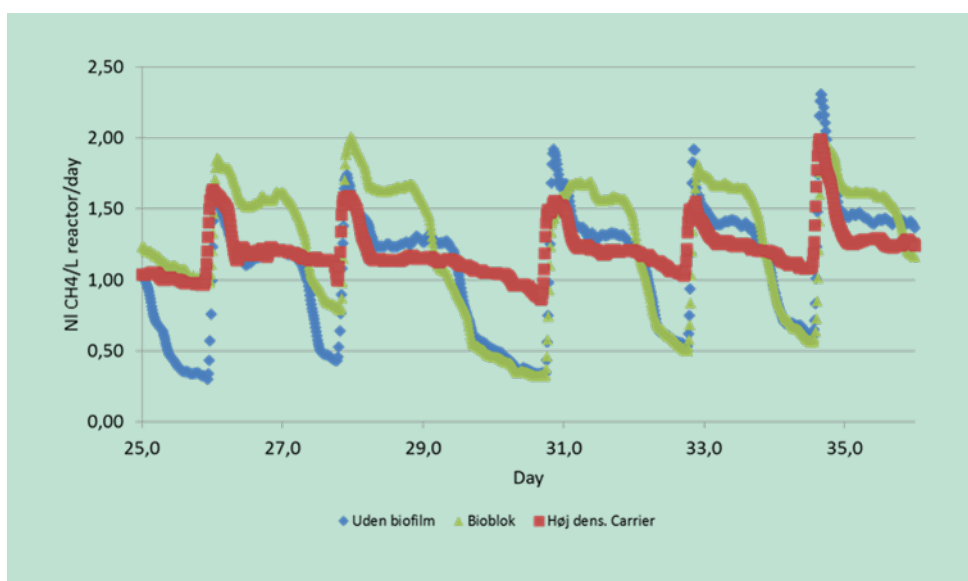
I tillæg til gasproduktionen, blev der på den indgående og udgående biomasse målt følgende:

- Tørstofindhold (TS, 48 timer ved 105 °C)
- Askeindhold (VS, 16 timer ved 550 °C)
- pH.

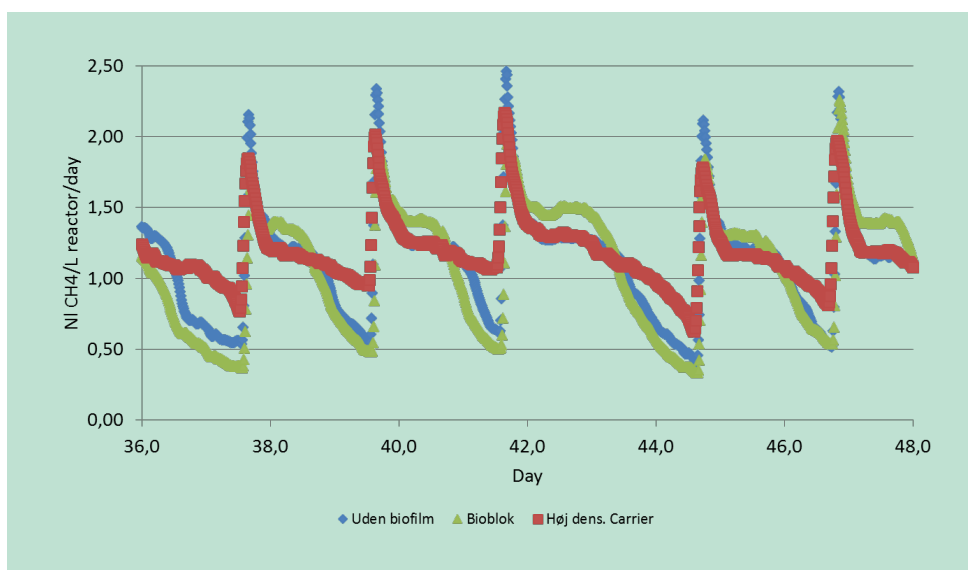
2.2 Resultater

2.2.1 Gasproduktion

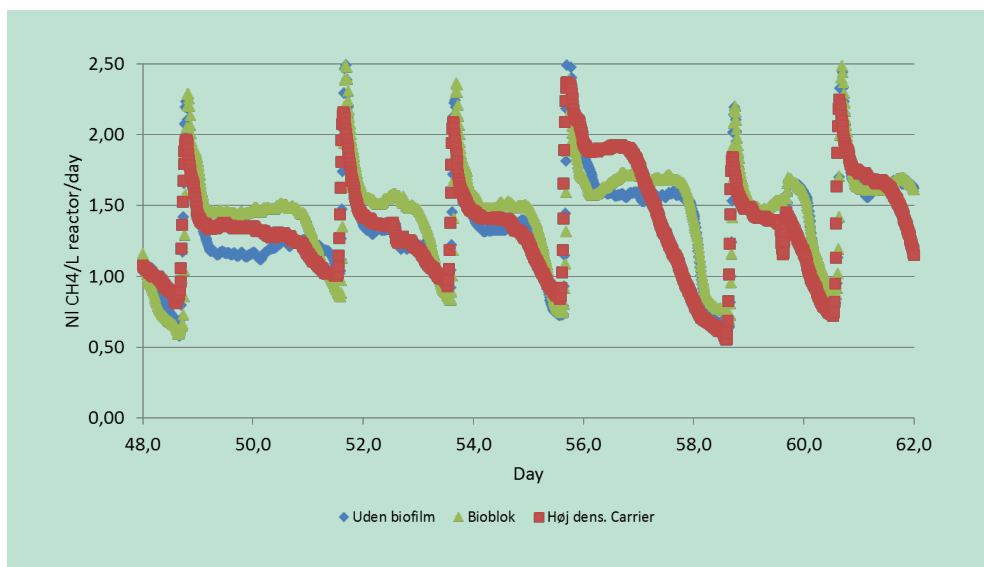
I FIGUR 4 til FIGUR 6 er gasproduktionen (metan) for periode 2 (lav organisk belastning) til periode 4 (høj organisk belastning) vist som gennemsnit af to reaktorer. Som det fremgår, var gasproduktionen for reaktorerne med carriers (højdensitetcarriers og lavdensitetcarriers) højere end for reaktorerne uden biofilm. Endvidere observeres det, at gasproduktionen var højere for reaktorerne med lavdensitetcarriers end for reaktorerne med højdensitetcarriers.



FIGUR 4. Metanproduktion angivet som gennemsnit af to reaktorer for periode 2.



FIGUR 5. Metanproduktion angivet som gennemsnit af to reaktorer for periode 3.



FIGUR 6. Metanproduktion angivet som gennemsnit af to reaktorer for periode 4.

2.2.2 Tørstofindhold og indhold af organisk materiale i reaktorerne

Tørstofkoncentrationen af den udgående biomasse var igennem hele forsøget forholdsvis stabil. Således var tørstofindholdet af den udgående biomasse halveret ift. den indgående biomasse. Tages mængden af uorganisk materiale i betragtning, kunne der observeret en omsætning af det organiske materiale (VS) på ca. 60 %. En tilsvarende reduktion blev observeret for de øvrige perioder.

I den målte periode var pH både på substrat og i reaktorerne forholdsvis stabil.

2.3 Konklusion

- Gasproduktionen fra reaktorerne var som forventet. Udbyttet pr. g VS var på niveau med tidligere batchmålinger.
- Reaktorerne med biofilmcarriers resulterede i en signifikant højere gasproduktion ift. reaktorerne uden biofilm. Endvidere var gasproduktionen i reaktorerne med lavdensitetcarriers højere end i reaktorerne med højdensitetcarriers. Således producerede reaktorerne med lavdensitetcarriers ca. 7-8 % mere metan ift. reaktorerne uden biofilm i alle tre perioder (2, 3 og 4).
- Omrøringen i systemet var ikke effektiv. Således forventedes effekten at være langt højere i pilotanlægget, hvor de hydrauliske strømme er optimeret, hvorved biofilmen kommer i bedre kontakt med substratet.

3. Laboratorieforsøg – additiv tilsætning

Det overordnede formål med forsøget var at undersøge effekten af additivet, folinsyre, ved både batchudrådning og kontinuert udrådning af biopulp.

3.1 Metode og materialer

3.1.1 Batchudrådning

Effekten af additivet, folinsyre, blev testet ved udrådning af biopulp og cellulose ved to forskellige belastningsscenarier. Der blev i forsøget anvendt en folinsyrekoncentration svarende til den angivne tilvænningsdosering, som anvendes indenfor spildevandsrensning. Biogaspotentialet blev bestemt ved brug af Bioprocess Control-udstyr.

Der blev ved nærværende test benyttet følgende fremgangsmåde:

- Mesofil udrådning af biopulp og cellulose ved 37 °C i Bioprocess Control-udstyr
- Der er anvendt tripelbestemmelse af alle prøver
- Tørstof: 105 °C, 24 timer
- Askeindhold: 550 °C, 24 timer
- Karakterisering af fedt, protein, kulhydrat og ligninindhold.

Data for akkumuleret metanproduktion er angivet som målt værdi i nml CH₄/gVS efter udrådning.

3.1.2 Kontinuert udrådning

Til dette forsøg blev der anvendt seks reaktorer, som hver havde et aktivt reaktorvolumen på 1,8 l, som inden nærværende forsøg blev tilført primær slam i 125 dage. Reaktorerne blev i forsøget tre gange ugentligt tilført primær slam med en tørstofkoncentration på 5-6 %, og der blev anvendt en hydraulisk opholdstid på 20 dage og en reaktortemperatur på 37 °C. Inden initieringen med folinsyretilsætningen havde reaktorerne således været under stabil drift i en lang periode.

Den producerede gas blev målt automatisk ved anvendelse af AMPTS fra Bioprocess Control-system. Umiddelbart inden gasproduktionen blev målt, blev CO₂ fjernet fra gassen ved at lede gassen over en vandig opløsning af natriumhydroxid (3M).

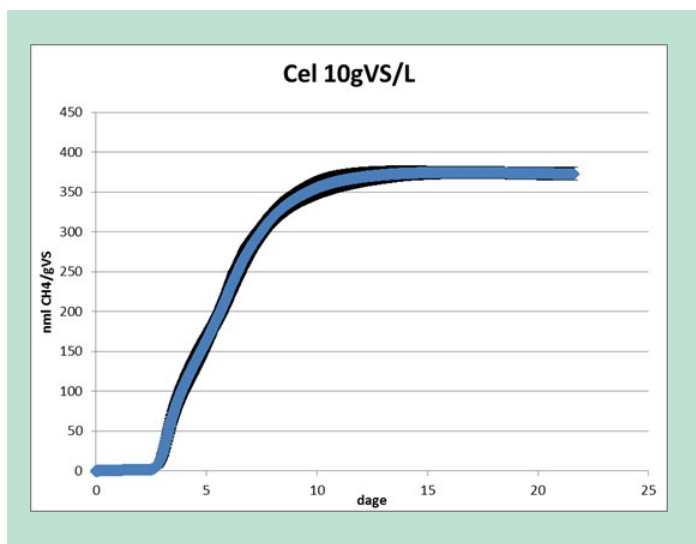
Tre af reaktorerne blev tilført additivet folinsyre, og de tre andre fungerede som kontroller (ingen tilsætning). I de første 14 dage blev der anvendt en dosering på 0,6 ml folinsyre/kg COD, og i de efterfølgende 14 dage blev der anvendt en dosering på 0,15 ml folinsyre/kg COD.

3.2 Resultater

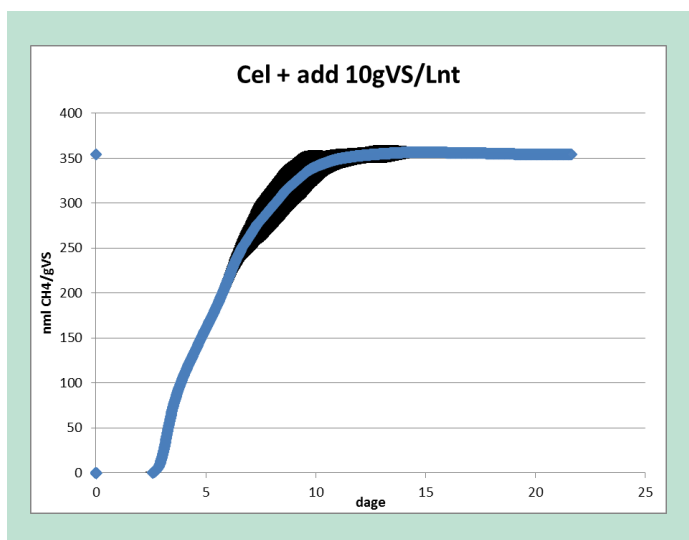
3.2.1 Batchudrådning

Mængden af tørstof og flygtige organiske stoffer (VS) blev bestemt i biopulpen og i cellulosen.

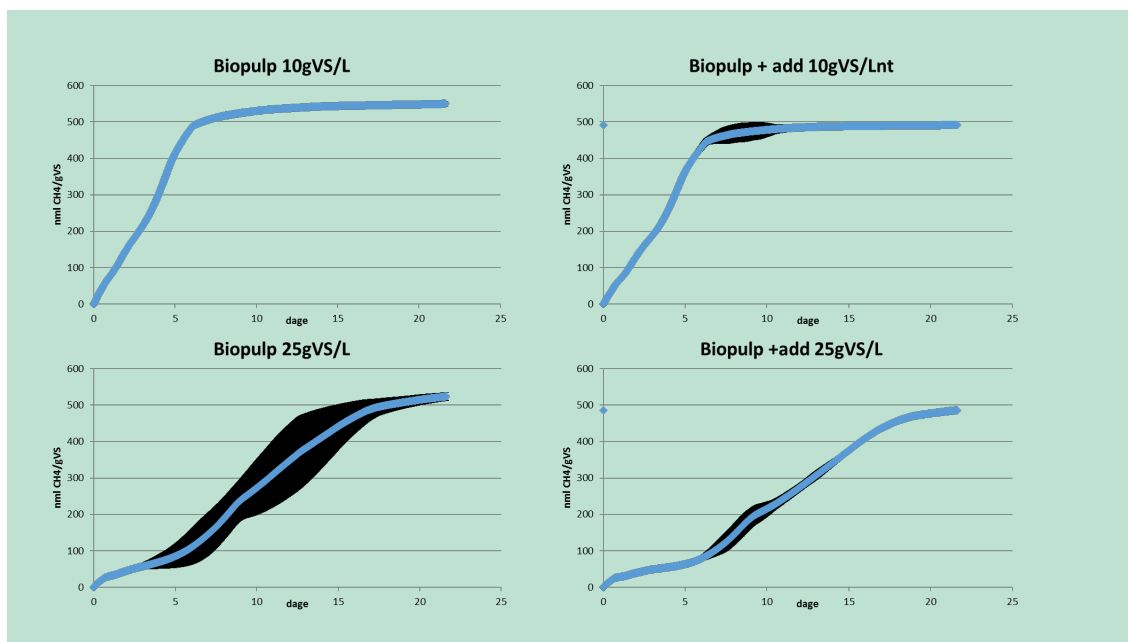
Udrådningen blev afsluttet efter ca. 23 dage. Data fra udrådningen er vist på FIGUR 7 og FIGUR 8, og som det fremgår, var standardafvigelseerne meget små, om end stigende, når den organiske belastning blev øget. Der er undersøgt to belastningsscenarier, hhv. 10 gVS/l og 25 gVS/l.



FIGUR 7. Cellulose ved en organisk belastning på 10 gVS/l - akkumuleret metanproduktion (sorte barer er standardafvigelsen).



FIGUR 8. Cellulose og folinsyre (add.) ved en organisk belastning på 10 gVS/l - akkumuleret metanproduktion (sorte barer er standardafvigelsen).



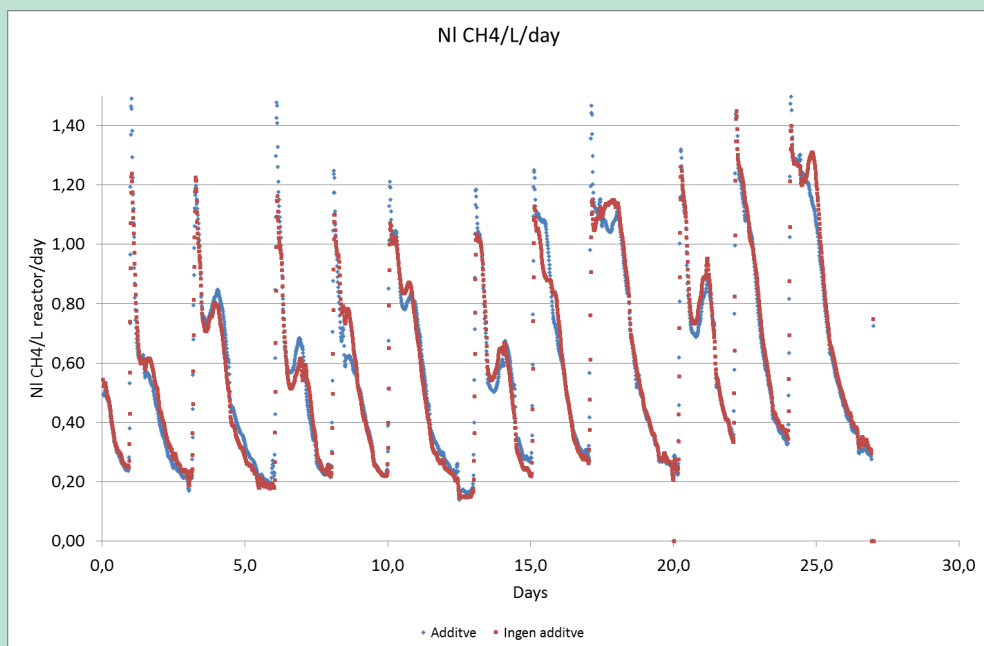
FIGUR 9. Biopulp ved en organisk belastning på 10/25 gVS/l med og uden tilsætning af folinsyre (add.) - akkumuleret metanproduktion (sorte barer er standardafvigelsen).

Som det fremgår af FIGUR 9, var der ingen ændring i produktionsraten indenfor de første par dage ved tilsætning af additivet folinsyre. Derimod observeredes der en mindre reduktion i det samlede udbytte ved tilsætning af folinsyre, om end reduktionen var meget begrænset.

Det skal imidlertid bemærkes, at en eventuel effekt af folinsyre vil være afhængig af det anvendte inokulum. Det kan derfor meget vel tænkes, at ovenstående resultater ville have været anderledes ved anvendelse af et andet inokulum eller ved anvendelse af samme inokulum på et andet tidspunkt. I nærværende forsøg blev der dog udført test på meget forskellige typer af inokulum, nemlig inokulum tilvænnet biopulp og inokulum tilvænnet primær slam.

3.2.2 Kontinueret udrådning

I FIGUR 10 er gasproduktionen (metan) for perioden vist som gennemsnit af tre reaktorer. Som det fremgår af figuren, var der ikke nogen forskel på gasproduktionen for de reaktorer, som blev tilsat folinsyre, og de reaktorer, som ikke blev tilsat folinsyre.



FIGUR 10. Metanproduktion, angivet som gennemsnit af tre reaktorer.

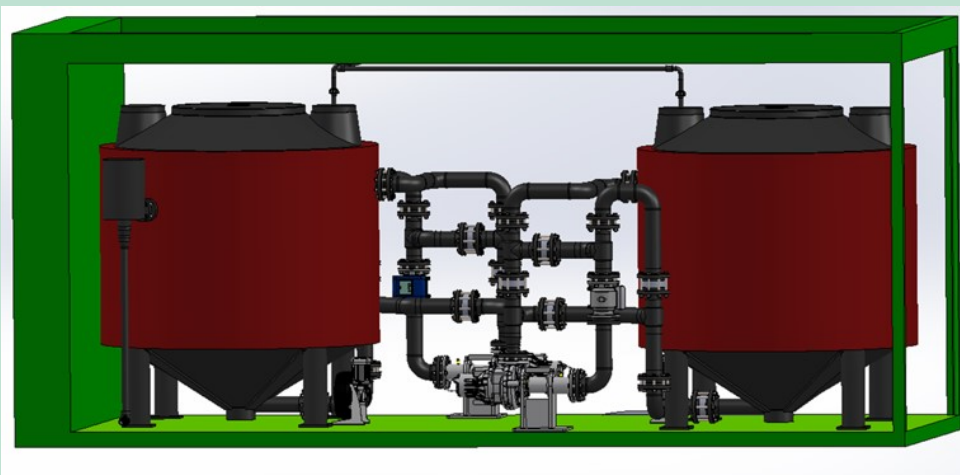
3.3 Konklusion

Med udgangspunkt i de to forskellige, anvendte inokula er der hverken ved batchdrift eller ved kontinuert drift (26 dage) nogen positiv effekt af tilsætning af folinsyre. Det kan dog ikke udelukkes, at resultatet ville have været anderledes ved anvendelse af et andet inokulum. I nærværende forsøg blev der dog udført test på meget forskellige typer af inokulum, nemlig inokulum tilvænnet biopulp og inokulum tilvænnet primær slam.

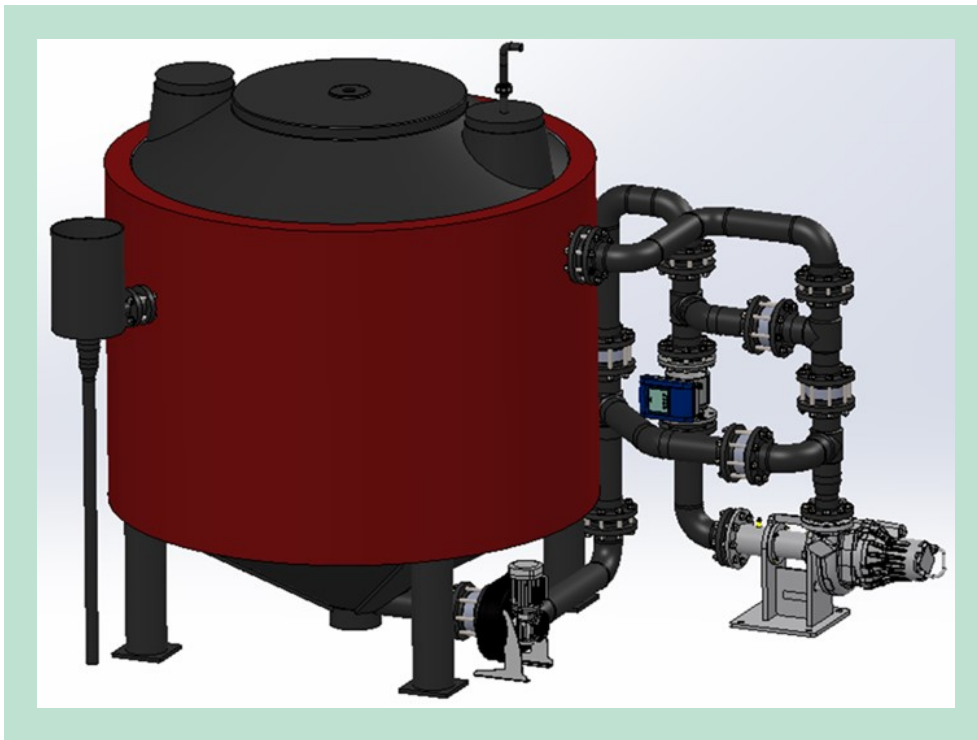
4. Design og udvikling af pilotanlæg

BIO-AQUA konstruerede Optigas-pilotskalaanlægget som blev opstillet på BIOFOS' renseanlæg. Pilotanlægget blev opbygget i en isoleret container, således at pilotanlægget let kunne transporteres til renseanlægget og anvendes udendørs. Tankene blev opført i sort PE og forberedt til drift ved $>37^{\circ}\text{C}$. De to tanke var identiske i udformning og størrelse. Den eneste forskel var således, at den ene indeholdt blokmedier, som faciliterede fasthæftningen af mikroorganismer (øget biologisk vækst i reaktoren), mens den anden kørte som en konventionel reaktor uden medie. Indføringen til de to tanke blev udført med to ens slangepumper (LSM-pumper), der kørte ved samme frekvens. Gassen fra reaktorerne blev afledt i toppen af tankene via to gasmålere og blev ventileret væk gennem en høj skorsten.

Den interne recirkulation, som er vigtig i forhold til at få en effektiv omsætning på blokmedierne, blev udført af to skærende Flygtpumper. De skærende pumper blev valgt i tilfælde af, at der skulle være urenheder eller større, partikulære materialer i det indkommende materiale. Pumperne var ATEX-certificerede, og det var muligt at styre pumpehastigheden på disse via en frekvensstyring. Pumperne blev ligeledes anvendt til at styre temperaturen i reaktorerne vha. ændringer på frekvenshastigheden på pumperne. Recirkulationen blev udformet, så den kunne køre ind fra både top og bund, idet der er fordele ved begge konfigurationer. Formålet var at teste begge muligheder og finde den mest optimale løsning. Dette medførte dog, at det var nødvendigt at udarbejde et større ventilsystem, som det fremgår FIGUR 11 og FIGUR 12.



FIGUR 11. 3D-tegning af pilotanlæg. Begge reaktortyper (med og uden blokmedier) indarbejdes i samme container.



FIGUR 12. 3D-tegning af reaktor.



FIGUR 13. Billede af reaktor. Begge reaktorer er nu indarbejdet i containerløsningen.

5. Drift af pilotskalareaktorer

I foråret 2017 blev OptiGas-pilotskalacontaineren flyttet til Avedøre Renseanlæg, hvor den blev installeret. Efter installation, men inden opstart, blev der brugt mange ressourcer på at sikre, at containeren opfyldte de gældende krav til ATEX-godkendelse. Denne godkendelse kom på plads i efteråret 2017, hvorefter anlægget blev igangsat. Reaktorerne blev podet med materiale fra rådnetankene fra Avedøre Renseanlæg, hvilket sikrede, at det anvendte podemateriale var aktivt og tilvænnet til den indgående biomasse.

Til forsøgene blev der anvendt en blanding af primær og sekundær slam fra Avedøre Renseanlæg. Dette blev tilført pilotskalacontaineren, lige inden blandingen normalvis blev indført i fuldskalarådnetankene på Avedøre Renseanlæg. Dette muliggjorde, at driften af pilotskalacontaineren og fuldskalatankene kunne sammenlignes direkte.

Inden pilotskalacontaineren blev idriftsat, blev der opsat et detaljeret forsøgsprogram. Dette var inddelt i tre overordnede forsøgsperioder:

- Separatudrådning af slam med faldende reaktoropholdstid
 - o Reaktoropholdstid: 20 dage. Tre opholdstider
 - o Reaktoropholdstid: 15 dage. Tre opholdstider
 - o Reaktoropholdstid: 10 dage. Tre opholdstider
 - o Reaktoropholdstid: 5 dage. Tre opholdstider
- Samudrådning af slam og biopulp
 - o Reaktoropholdstid: 20 dage. Tre opholdstider
 - o Reaktoropholdstid: 15 dage. Tre opholdstider
 - o Reaktoropholdstid: 10 dage. Tre opholdstider
 - o Reaktoropholdstid: 5 dage. Tre opholdstider
- Separatudrådning af biopulp
 - o Reaktoropholdstid: 20 dage. Tre opholdstider
 - o Reaktoropholdstid: 15 dage. Tre opholdstider
 - o Reaktoropholdstid: 10 dage. Tre opholdstider

I starten af november måned 2017 blev forsøgene opstartet, og i maj 2018 blev forsøgene afsluttet. Undervejs har der været en række udfordringer i forhold til at kunne drifte containeren, hvilket betød, at ovenstående forsøgsprogram blev revideret flere gange undervejs. I det næste afsnit er hovedudfordringerne opsummeret, og i de følgende afsnit er hovedresultaterne kort opsummeret.

Under projektperioden blev der tillige afholdt et åbent hus-arrangement, hvor personer med interesse for biogasproduktion og anvendelse af KOD blev inviteret. I alt deltog ca. 30 personer på dagen, hvor projektet blev præsenteret, herunder opbygningen af de to reaktorer og opnåede data fra forsøgsperioden.



FIGUR 14. Åbent hus-arrangement.

5.1 Udfordringer og læring

Temperatur

Den anvendte forsøgscontainer var godt isoleret, og hverken reaktorer eller container var derfor forsynet med varmestyring. I stedet var det meningen, at de anvendte cirkulationspumper skulle afsætte nok energi i reaktorindholdet til at opretholde reaktortemperaturen. Dette viste sig dog vanskeligt grundet den hårde vinter, hvorfor det var nødvendigt at implementere ekstra varme i containeren. BIO-AQUA monterede derfor en ATEX-godkendt varmeløsning i containeren. Forsøgene skulle oprindeligt have været gennemført i sommerhalvåret, hvor reaktortemperaturen uden problemer kunne være opretholdt. Grundet problemer med opretholdelse af en reaktortemperatur på over 32 grader var der flere perioder uden egentlig biogasproduktion.

Skumning

Igennem forsøgene har der været store udfordringer med skumning, hvilket har forårsaget, at gasflowmålerne gentagne gange blev blokeret og derfor skulle renses. For at afhjælpe skum-

problemet, blev der implementeret et system med en mellemtank, som opsamlede det dannede skum, inden skummet nåede flowmålerne. Denne foranstaltning virkede effektivt, men der var stadig enkelte episoder med skum i målerne, hvilket desværre medførte flere perioder, for hvilke der ikke findes gasdatamålinger grundet tilstopning med skum. Til fremtidige anlæg vil der blive monteret et system, hvor skummet løber tilbage i selve tanken; et system som er indbygget på mange rådnetanke. Det var desværre ikke muligt at bygge dette ind i containeren undervejs, da det ville kræve en yderligere godkendelse i henhold til ATEX.

Hydraulik

Den udrådnede biomasse løb per gravitation fra reaktorerne i containeren og tilbage til en brønd. Vinteren var imidlertid meget kold og lang, og det blev derfor nødvendigt at isolere rørene, idet der ad flere omgange opstod blokeringer i rørføringen. Hele rørføringen blev således isoleret og udstyret med eltrace, hvilket afhjalp problemet. Desværre var der fortsat enkelte tilfælde af frosne rør på grund af udfald på strømføringen til containeren. En af de andre store udfordringer var tilstopning af BIOFOS' indløbsbrønd, der medførte, at anlægget ikke blev "fodret". Samlet set skyldtes disse udfordringer, at der var tale om små volumener, som er meget sværere at styre end større flows.

Sulfid i containeren

I slutningen af projektet blev mindre mængder af sulfid med jævne mellemrum detekteret i containeren. Evt. utætte slanger, samlinger etc. blev gennemgået for at identificere årsagen til sulfidproduktionen, og containeren blev efterfølgende udluftet. Den installerede beholder til skumopsamling har formentlig også bidraget til sulfidproduktionen.

Generelt har det været en udfordring at drive et så kompliceret anlæg, og projektgruppen burde have afsat yderligere midler eller ressourcer til selve driften og/eller have inkluderet en studerende til løbende at følge anlægget. Yderligere automation ville have afhjulpet nogle af problemerne, eksempelvis flowalarmer på indløb.

Ovenstående problemer blev alle håndteret meget professionelt, og erfaringerne fra forsøgsperioden er vigtige i forhold til både at drifte den reviderede forsøgscontainer fremadrettet og i forhold til at kunne konstruere OptiGas-konceptet i fuldskala. Alle data, både i laboratoriet, fra pilotanlægget og fra litteraturen viser, at der er et meget stort potentiale for biofilmbaserede reaktorer, men også at det er krævende at drive en helt ny type anlæg.

På grund af ovenstående udfordringer var der kun korte perioder, hvor der blev målt gasproduktion fra begge reaktorer. De opnåede resultater er således forbundet med store usikkerheder, ligesom langtidseffekter og stabilitet ikke er undersøgt.

5.2 Separatudrådning - slam

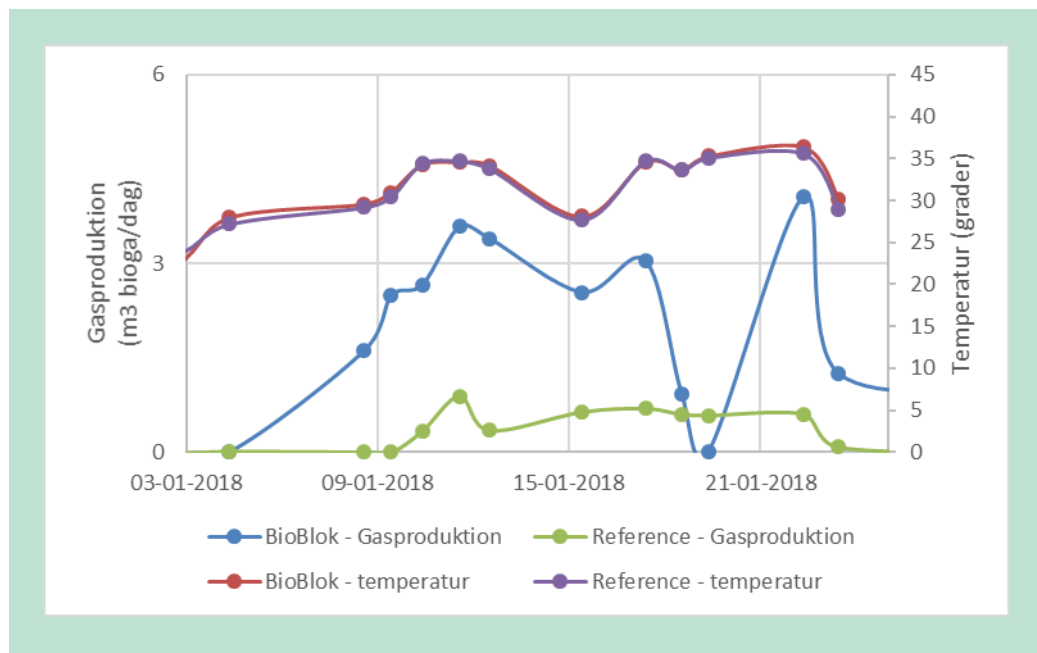
Som det fremgår af FIGUR 15, var der i perioden fra den 3. januar til den 9. januar ikke biogasproduktion fra nogen af reaktorerne, hvilket skyldtes, at temperaturen havde været for lav (<32 °C). I perioden herefter steg reaktortemperaturen, hvilket bevirkede, at biogasproduktionen initieredes. Biogasproduktionen initieredes ved en lavere temperatur for reaktoren med blokmedier, hvilket var tilfældet i hele forsøgsperioden. I perioden fra omkring den 18. januar observeredes der et kraftigt fald i reaktoren med blokmedier, hvilket skyldtes problemer med gasflowmåleren og ikke et reelt fald i produktionen.

I den viste periode (FIGUR 15) var opholdstiden på ca. fem dage (og der var en stabil periode på ca. tre opholdstider). Ved denne opholdstid og ved en fuldstændig omsætning af slammet var den beregnede biogasproduktion på $4,5 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{m}^3/\text{dag}^2$. I perioden 10.-22. januar var

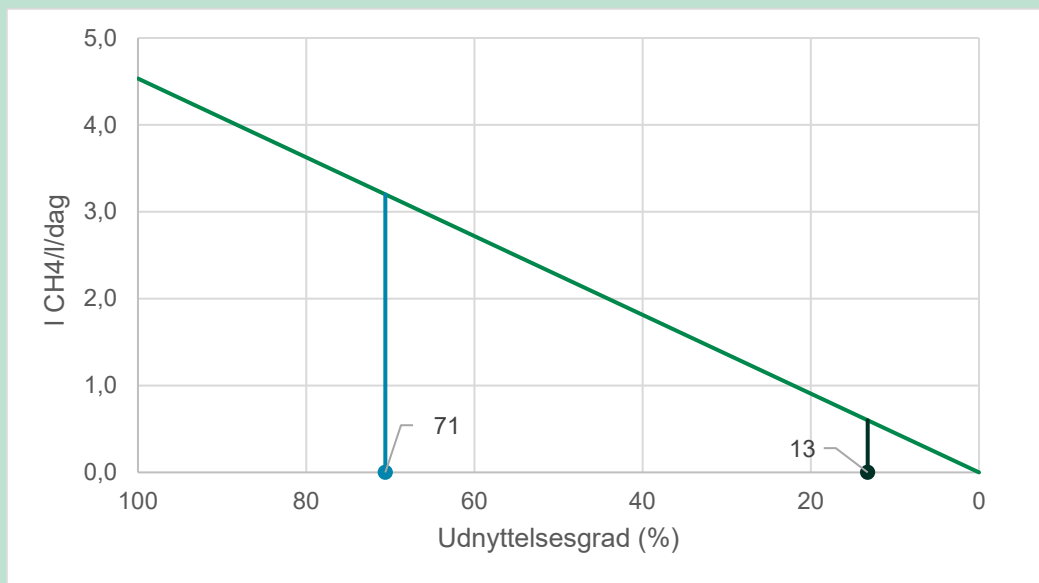
² $40 \text{ gVS/l} \cdot 0,34 \text{ Nml CH}_4/\text{gVS} \div 5\text{dage} = 2,8 \text{ l CH}_4/\text{l}/\text{dag} \rightarrow 4,5 \text{ l biogas}/\text{l}/\text{dag}$

biogasproduktionen fra reaktoren med blokmedier på $3,2 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{m}^3/\text{dag}$ (når der ses bort fra perioden med defekt gasmåler), hvilket svarer til en udnyttelsesgrad på ca. 70 % af biogaspotentialt (se FIGUR 16). Det skal bemærkes, at udnyttelsesgraden ville have været højere, hvis temperaturen havde været opretholdt over 32°C i perioden omkring den 15. januar.

I samme periode var den gennemsnitlige gasproduktion derimod kun på $0,6 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{m}^3/\text{dag}$ for referencereaktor, hvilket svarer til en udnyttelsesgrad på blot 13 %, som er ca. 5,5 x lavere end reaktoren med blokmedier. Denne gasproduktion svarer nogenlunde til gasproduktionen i fuldskalareaktorerne ved Avedøre Renseanlæg. Biogasproduktionen i begge reaktorer var således relativt stabil i de tre beskrevne opholdstider, om end udnyttelsesgraderne er meget forskellige. Dette indikerer, at reaktoren med blokmedier var særdeles velegnet til at producere biogas ved meget lave opholdstider sammenlignet med referencereaktoren.



FIGUR 15. Overblik over gasproduktion og reaktortemperatur for referencereaktoren (uden blokmedier) og blokmediereaktorerne (BioBlok).



FIGUR 16. Metanproduktion som funktion af udnyttelsesgrad.

Sammenligning af biogasproduktionen i de to forsøgsreaktorer ift. fuldskalaanlægget på Avedøre Renseanlæg, er vist i TABEL 1. Som det fremgår, var produktionsraten for reaktoren med blokmedier ca. 5 x højere end for fuldskalaanlægget på Avedøre Renseanlæg.

TABEL 1. Overblik over produktionsdata og opholdstider for de to forsøgsreaktorer og Avedøre Renseanlæg's biogasreaktor.

	Avedøre - fuldskala	OptiGas - blokmedier	OptiGas - reference
Opholdstid (dage)	26	5	5
Produktionsrate (m ³ /m ³ /dag)	0,6	2,9	0

5.3 Samudrådning

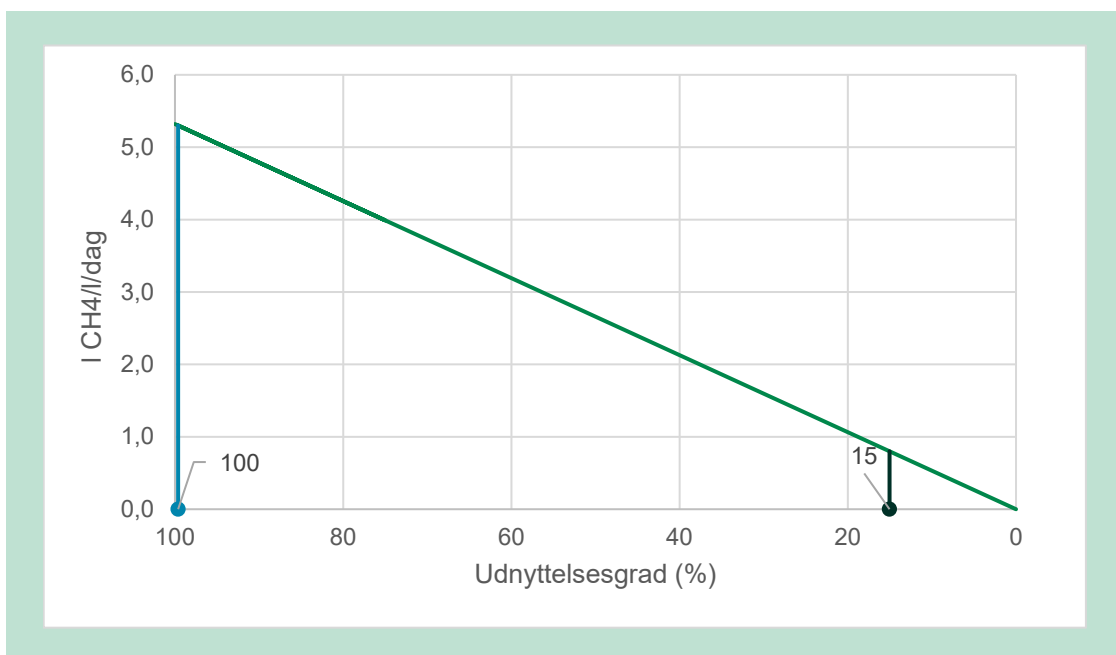
I den afsluttende del af forsøget blev der gennemført en forsøgsperiode, hvor der blev tilført biopulp fra KomTek iblandet primær slam og bioslam, svarende til en 30 %-dosering af biopulp. Desværre var der en del perioder, hvor gasproduktionen ikke blev målt på grund af problemer med tilstoppede gasflowmålere. Biopulp kan indeholde større partikulært materiale, som potentielt kan forårsage tilstopning af de blokmedier, som blev anvendt i den ene reaktor. Dog fremstilles biopulpen hos KomTek gennem en sol, som har en diameter på maks. 0,6 cm, hvilket bevirker, at der ikke kan findes partikulært materiale, der er større end dette. For at dokumentere renheden af biopulpen blev de anvendte batches bestemt vha. metoden "Bestemmelse af renhed af pumpbar pulp eller fast, våd biomasse produceret ud fra organisk affald med henblik på efterfølgende dosering til bioforgasningsanlæg", version 2 af 22. august 2016, som er udarbejdet af Teknologisk Institut. Alle urenheder i form af plast, metal, glas, keramik, gummi og genkendelige tekstilfiberstykker blev frasorteret ved visuel inspektion og vejjet.

Resultaterne fra renhedstesten dokumenterede et tørstofindhold på TS = 18,6 %. Efter forskrifterne fra renhedstesten blev i alt 13,1 g materiale opsamlet efter vask og tørring. Af dette udgjorde aluminium og plast hhv. 0,044 g og 0,0139 g. Det ses, at den analyserede prøve overholdt kravet til urenheder på 0,5 vægtprocent pr. kg TS i SPCR 120 2015/2016.



FIGUR 17. Renhedstest af anvendt biopulp - indsamlet og tørret organisk materiale.

I forsøgsperioden blev der anvendt en opholdstid på ca. 10 dage. Med denne opholdstid og med en fuldstændig omsætning af det indgående materiale vil den beregnede biogasproduktion være på $5,1 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{m}^3/\text{dag}$ (se FIGUR 18). I de sidste fire dage af forsøget, hvor gasproduktionen blev målt, var den gennemsnitlige biogasproduktion fra reaktoren med blokmedier på $5,3 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{m}^3/\text{dag}$, hvilket svarer til en udnyttelsesgrad på ca. 100 %. Det antages, at en udnyttelsesgrad på 100 % skyldes en tidligere ophobning af fede fedtsyrer (VFA), som i perioden med høj procestemperatur omsættes til biogas. Derimod blev der på intet tidspunkt målt højere produktionsrater end $0,8 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{m}^3/\text{dag}$ for referencereaktoren, hvilket svarer til en udnyttelsesgrad på 15 % (se nedenstående figur). Altså produceredes der 6-7 gange mere biogas i reaktoren med blokmedier. Noget af forskellen kan dog tilskrives, at der i en længere periode blev tilført nyt materiale til reaktoren ved en meget lav driftstemperatur, hvilket bevirkede, at det aktive materiale i referencereaktoren blev skyllet ud, uden at der blev genereret nyt.



FIGUR 18. Metanproduktion som funktion af udnyttelsesgrad.

I samudræningsforsøgene varierede metanindholdet mellem 60 % og 70 % for reaktorer med blokmedier. Metanindholdet i den udgående biogas fra referencereaktoren var derimod stabil på ca. 60 %.

Efter nedtagning af anlægget blev tankene åbnet, og der blev undersøgt for tilstopning af medierne. Der var intet, der tydede på, at dette var et problem. Tilsvarende blev der ikke oplevet væsentlige faldt i recirkuleringen undervejs i forsøgene, som ville have indikeret en tilstopning. Tilstopning er i tidligere studier vurderet som et af de væsentligste problemer med anvendelse af medier i biogasanlæg, men Exponets meget åbne struktur er med til at minimere denne risiko.

5.4 Mikrobiologi på blokmedier

For at muliggøre et mere kompakt reaktordesign eller mindske opholdstiden i reaktoren forudsættes en høj tilstedeværelse af aktive mikroorganismer, der repræsenterer hele nedbrydningskæden fra slam og/eller KOD til metanproduktion. Blokmedierne muliggør, at mikroorganismerne kan hæfte sig fast og derved undgår at blive skyllet ud med det udgående materiale. For at dokumentere den positive effekt af blokmedierne på den mikrobiologiske populationsstørrelse blev mængden af biomassen på udvalgte stykker fra blokmedierne bestemt. Yderligere blev indholdet af bakterier og arkea bestemt ved qPCR, så den præcise mikrobiologiske population kunne bestemmes.

Biomassen på blokmedier blev bestemt ved afrensning fra blokmedierne med en blød børste. Alt det organiske materiale blev opsamlet, og tørstofindholdet og glødetabet blev efterfølgende bestemt ved hhv. 105 °C og 550 °C. Nedenfor er vist forskellen mellem et stykke blokmedie før og efter biomassebestemmelse, se FIGUR 19.



FIGUR 19. Overblik over biofilm på biomedierne før og efter rengøring.

I alt blev biomassen fra fem plaststykker bestemt, og den totale biomasse, der var til stede på blokmedierne (Bioblokrør) blev derefter beregnet, se TABEL 2.

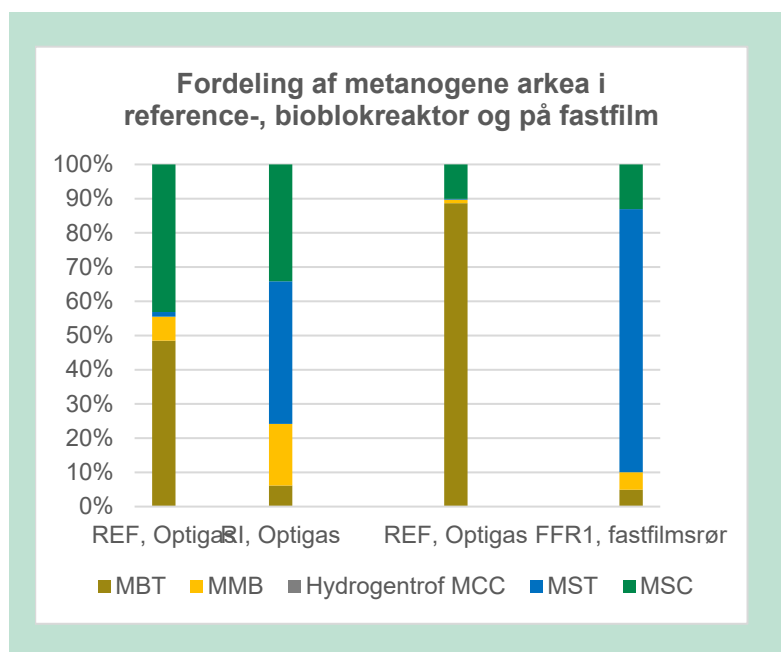
TABEL 2. Oversigt over biofilmdata fra Bioblokrørstykker.

Prøve	Vægt af fastfilmsrør (g)	Biomasse pr. fastfilmsrør (g)	Biofilm i alt i reaktor (kg)
1	1,91	20,7	
2	2,04	20,0	
3	1,88	40,0	
4	1,78	21,6	
5	1,79	12,0	
Gennemsnit		22,8	15

Af biomassen, bestemt på biomedierne, blev det antaget, at den mikrobiologiske biomasse udgjorde hovedparten af den organiske fraktion. Denne fraktion indeholdt også uomsat organisk materiale, bl.a. humuslignende materiale, som ikke kan omsættes i biogasreaktorer, da ilt ikke er til stede. Et simpelt estimat på den totale biomasse til stede i reaktoren blev således bestemt ud fra en gennemsnitsbiomassebestemmelse sammenholdt med antallet af blokmedier til stede i reaktoren. I alt beregnedes blokmedierne til at facilitere en yderligere biofilm i reaktoren på ca. 15 kg. Til sammenligning var der ca. 45 kg organisk materiale i reaktorerne, som ligeledes var en blanding af den mikrobiologiske population og uomsat organisk materiale. Dog vurderedes andelen af uomsat organisk materiale at være større i væskefasen, hvorfor tilstedeværelsen af blokmedier kraftigt forøgede den samlede mikrobiologiske population. Denne forøgelse muliggjorde meget høje biogasproduktionsrater, hvilket gjorde det muligt at reducere opholdstiden og/eller opnå en større reduktion af det organiske materiale.

Hvad angik bakterie- og arkeapopulationerne, blev et generelt qPCR-primersæt anvendt til bestemmelse af bakterier og arkea til stede i prøven. Tillige blev den metanogene population af arkea undersøgt i større detalje, således at der kunne skelnes mellem de mest hyppige acetoklaster og hydrogenotrofe metanogene arkea. De acetoklastiske metanogene arkea anvender overvejende acetat under produktionen af metan, hvorimod de hydrogenotrofe metanogene arkea anvender CO₂ og H₂. Der blev gennemført qPCR-analyser på DNA-ekstraktioner fra det udgående materiale fra begge reaktorer og på ekstraktioner fra stykker af blokmedierne. Den herved opnåede viden var vigtig i forhold til at kunne se en evt. ændring i sammensætningen af den metanogene population under de vidt forskellige driftsbetingelser.

Ud fra qPCR-dataene ses det, at andelen af både bakterier og arkea var i samme størrelsesorden i udløbsmaterialet fra hhv. reference- og blokmediereaktoren samt i fastfilmen. Gennem de mere detaljerede analyser af sammensætningen af de metanogene arkea kunne en differentiering mellem fordelingen af de hydrogenotrofe og de acetoklastiske metanogene arkea observeres. Som det fremgår af FIGUR 20, var der en ligelig fordeling mellem acetoklastiske og hydrogenotrofe arkea i referencereaktoren, hvorimod der for biofilmen på blokmedierne og reaktorindholdet sås en dominans af acetoklasterne. Det er dog relativt få prøver, som ligger til grund for disse data, så en grundigere undersøgelse er nødvendig for at kunne konkludere, at den observerede populationsdifferentiering for de metanogene arkea var en medvirkende årsag til, at blokmediereaktoren kunne producere metan ved den lavere opholdstid. Dog kan det konkluderes, at mængden af aktive mikroorganismer øgedes til ca. det dobbelte ved at etablere blokmedier i en biogasreaktor, hvilket muliggjorde en reduktion i opholdstid.



FIGUR 20. Fordeling af metanogene arkea i det udgående materiale fra hhv. referencereaktor (REF, uden blokmedier), blokmediereaktoren (RI) samt biofilm fra fastfilmreaktoren (FFR1). Hydrogenotrofe arkea er angivet i gule og grå farver, hvorimod de acetoklastiske arkea er blå og grønne.

5.5 Opsummering af pilotskalaforsøg

De gennemførte pilotskalaforsøg viste med tydelighed, at den biofilmbaserede reaktor var i stand til at opretholde en meget høj omsætning af organisk materiale ved en kort opholdstid og en høj organisk belastning. Som vist ovenfor var produktionsraten i den biofilmbaserede reaktor ca. fem gange højere end i den konventionelle reaktor i de gennemførte forsøg. I de separate udrådningforsøg med slam var gasproduktionsraten således fem gange højere for den biofilmbaserede reaktor ift. fuldskalareaktoren ved Avedøre Renseanlæg ved en opholdstid, som var fem gange kortere (25 dage vs. fem dage). Data dokumenterer dermed potentialet i biofilmbaserede biogasreaktorer, da tilstedeværelse af biofilmen muliggør design af en mere kompakt reaktor med høj produktionsrate sammenlignet med konventionelle reaktorer. Denne meromsætningskapacitet tilskrives den øgede mængde af aktivt biologisk materiale, som udgjorde biofilmen på blokmediere, og som i projektet var kvantificeret til at være ca. en fordobling ift. reaktoren uden blokmedier. Tillige observeredes der en højere metanprocent i den producerede gas, hvilket mindskede behovet for en efterfølgende gasrensning.

Konstruktionen og driften af pilotskalareaktorerne har ikke været uproblematisk i forhold til dimensioner af rørføring, vejrlig og skumning. Igennem forsøgene er der genereret viden, som gør det muligt at overkomme disse problematikker fremadrettet.

5.6 CAPEX/OPEX

I forbindelse med beregning af CAPEX og OPEX for et fuldskalaanlæg blev det antaget, at det var muligt at reducere volumenet til 1/5 af det volumen, der påkræves i en traditionel reaktor. Denne antagelse bundede i de gennemførte pilotforsøg.

Reaktorvolumen

Ved en 5 x produktionsrate er det muligt at reducere reaktorvolumenet til 20 % af en traditionel reaktor. Dette vil medføre lavere byggeudgifter til konstruktionen af reaktoren. For at kunne vurdere, hvad en tank på 20 % af den originale tank koster at opføre, har BIO-AQUA kontaktet det danske firma Combigas, der projekterer biogasanlæg, og forelagt data om OptiGas-

konceptet for dem. Combigas råder over et dimensioneringsværktøj, som er blevet anvendt med ovenstående antagelser. Combigas har taget tre forskellige tanke som udgangspunkt og vurderet ud fra disse, og det samlede estimat er, at en tank på 20 % af den originale tank vil koste cirka 35 % af den originale pris at bygge. Prisen inkluderer alle de væsentligste komponenter, såsom omrøring, opvarmning, isolering, indfødnings og styring.

Opvarmning

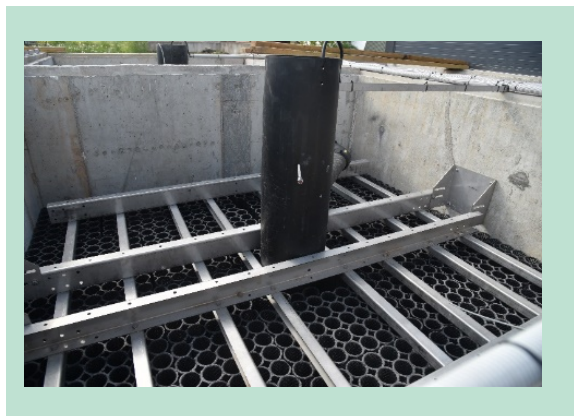
Da den indkommende biomasse er tilsvarende for de to reaktortyper, vil den initiale opvarmning af slammet være tilsvarende, mens den løbende opvarmning af tankvolumenet vil falde. Idet en større biogasreaktor har et mindre-overflade-til-volumen-forhold, vil det løbende energibehov til opvarmning med stor sandsynlighed være lidt mindre end 80 %. For at bestemme dette tal mere præcist er der taget udgangspunkt i BIOFOS' eksisterende anlæg med fire rådnetanke. BIO-AQUA har kontaktet Per Ruby fra Ørsted, der til daglig arbejder med energioptimering på renseanlæg, og bedt ham om at udregne den sparede mængde varme. I dag anvendes godt 2 GWh (2.000.000 kWh) om året til opvarmning af de fire rådnetanke, og med en reduktion på 80 % i volumenet vil der kunne spares >1.000.000 kWh per år. Ørsteds vurdering er, at der potentielt kan spares op imod 10 % af det samlede energiforbrug på renseanlægget.

Gashåndtering

Den producerede gasmængde vil være den samme, og der vil således ikke være ændringer i hverken CAPEX eller OPEX.

Blokmedier

Blokmediene skal opbygges på en rustfri ramme inde i tanken. Dette vil medføre en samlet merpris på cirka 2.420 DKK/m³ reaktolvolumen. BIO-AQUA har bygget en lang række af sådanne reaktorer til aerob, biologisk spildevandsrensning og har udviklet et system, der ned-sænkes direkte i tanken.



FIGUR 21. Biologisk reaktor med Exponet (aerob).

Recirkulering

For at få den optimale udnyttelse af medierne er det nødvendigt, at væsken konstant recirkuleres over medierne. Traditionelle reaktorer bliver også opblandet for at forhindre døde zoner, men i OptiGas-konceptet skal denne recirkulering være horisontalt. I de udførte forsøg har der været anvendt hastigheder fra 8,71 til 11,36 meter/time, hvilket har været tilstrækkeligt til at opretholde den høje produktion. I de konkrete forsøg blev der anvendt en Flygtpumpe, som er udrustet med en 2 kW motor, og som gav et flow på 26 m³/h. Dette svarer til et forbrug på cirka 77 Wh/m³ flyttet væske. I en fuldskalaløsning vil dette energiforbrug blive mindre, da der kun er installeret et lag Exponet i reaktoren. I beregningen er der antaget otte lag Exponet svarende til en løftehøjde på seks meter vandsøjle.

OptiGas

Formålet med projektet var at udvikle et kompakt og højeffektivt reaktorkoncept til bioforgasning af kilde-sorteret organisk affald og spildevandsslam. Reaktor-konceptet baserede sig på et system, hvor biofilm fast-holder den aktive mikrobiologi på blok-medier med en stor overflade, hvilket øger den samlede mængde mikrobiologi og dermed potentielt faciliteter en mere effektiv omsætning. De gennemførte pilotskala-forsøg viser med tydelighed, at den biofilmbaserede reaktor var i stand til at opretholde en meget høj omsætning af organisk materiale ved en kort opholdstid og en høj organisk belastning. Således var produktionsraten i den biofilmbaserede reaktor ca. fem gange højere end i den konventionelle reaktor i de gennemførte forsøg. Grundet udfordringer med temperaturstyring, skumning, hydraulik, gasflowmåling og svovlbrinte har det kun været muligt at genere produktionsdata i meget korte perioder. De opnåede resultater er således forbundet med store usikkerheder, ligesom langtidseffekter og stabilitet ikke er undersøgt. Igennem forsøgene er der dog genereret viden, som gør det muligt at overkomme disse problematikker fremadrettet.



Miljøstyrelsen
Haraldsgade 53
2100 København Ø

www.mst.dk