



**Miljø- og
Fødevareministeriet**
Miljøstyrelsen

GasBoosteren

Miljøprojekt nr. 2008

April 2018

Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion:

Caroline Kragelund Rickers, Teknologisk Institut

Haris Kadrispahic, LiqTech International

ISBN: 978-87-93710-08-5

Miljøstyrelsen offentliggøre rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojek-ter inden for miljøsektoren, finansieret af Miljøstyrelsens undersøgelsesbevilling. 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 om-kring den danske miljøpolitik.

Må citeres med kildeangivelse.

Indhold

| | |
|-----------------------------------------------------------|-----------|
| Forord | 4 |
| Sammenfatning | 5 |
| Summary | 7 |
| 1. Introduktion og koncept | 9 |
| 1.1 Gasboosterkonceptet | 9 |
| 1.2 Udarbejdelse af strategi | 9 |
| 2. Pilotskalaforøg | 11 |
| 2.1 Pilotskalaforøg 1 – juni 2015 | 12 |
| 2.1.1 Massebalance – recirkulering af fibermateriale | 12 |
| 2.1.2 Biogaspotentiale | 14 |
| 2.1.3 Partikelstørrelsesfordeling efter membranfiltrering | 15 |
| 2.1.4 Konklusion pilotskalaforøg 1 | 16 |
| 2.2 Pilotskalaforøg 2 – november 2016 | 17 |
| 2.2.1 Massebalance – recirkulering af fibermateriale | 18 |
| 2.2.2 Biogaspotentiale af fiberfraktioner | 19 |
| 2.2.3 Partikelstørrelsesfordeling | 23 |
| 2.2.4 Driftsdata fra membranfiltrering | 24 |
| 2.2.5 Mikrobiologisk karakterisering | 26 |
| 2.2.6 Nitrogen, fosfor og ammonium | 27 |
| 2.2.7 Konklusion pilotskalaforøg 2 | 28 |
| 3. Businesscase | 29 |
| 3.1 Merindtægt | 29 |
| 3.2 Flotation | 30 |
| 3.3 Flotation og membranfiltrering | 30 |
| 4. Udvikling af fuldskalaanlæg | 33 |
| 4.1 Udvikling af et anaerobt flotationsanlæg | 33 |
| 4.1.1 Dannelse af mikrobobler | 33 |
| 4.1.2 Flotationskammer | 33 |
| 4.1.2.1 Modstrømsflotationsanlægget | 34 |
| 4.1.2.2 Kegleformet flotationsanlæg | 35 |
| 4.1.2.3 Dobbeltkammerflotation | 36 |
| 4.2 Skruepresse kombineret med flotation | 37 |
| 5. Fuldskalatest af GasBoosteren | 38 |
| 5.1 Testplan | 38 |
| 5.2 Resultater | 39 |
| 5.2.1 Gasproduktion fra reaktoren | 39 |
| 5.2.2 Separationseffektivitet | 39 |
| 5.2.3 Opsummering | 40 |

Forord

Dette er afslutningsrapporten for projektet "GasBoosteren – øget gasudbytte gennem effektiv separation", der er gennemført med tilskud fra Miljøministeriets tilskudsordning MUDP. Projektet blev gennemført i perioden januar 2015 til oktober 2017 i et samarbejde mellem Bio-Aqua, LiqTech International A/S og ComBigaS. I projektet har Teknologisk Institut været underleverandør i forbindelse med test og dokumentation af det udviklede teknologikoncept.

Projektets styregruppe bestod af:

- Johnny Marcher (LiqTech International)
- Erik Jessen (Bio-Aqua)
- Anders Buhl Larsen (ComBigaS).

Formålet med projektet er at udvikle en separationsteknologi - bestående af en kombination af flotation og membranfiltrering til recirkulering af tørstof internt på et biogasanlæg. Enheden filtrerer tørstof fra med en flotationsenhed efterfulgt af en keramisk filterenhed i et anaerobt miljø, således at svært omsætteligt tørstof og gavnlige bakterier kan føres tilbage til processen.

Sammenfatning

Der pågår en national satsning vedr. implementering af vedvarende energi formaliseret i bl.a. energiaftalen, hvilket bl.a. medfører, at antallet af biogasanlæg i øjeblikket bliver udbygget betragteligt. Økonomien for gyllebaserede anlæg kan være en udfordring, da gylle er et lavværdiprodukt, og det betyder, at der er et stort behov for teknologiudvikling for at kunne øge rentabiliteten i disse anlæg.

I dag drives gyllebaserede biogasanlæg ofte med et højt tørstofindhold. For mange biogasanlæg – især anlæg, som anvender korte/mellemlange opholdstider – betyder dette, at den afgassede biomasse stadig indeholder relativt meget uudnyttet tørstof. Der er derfor et væsentligt gaspotentiale, der ikke udnyttes, idet der ikke eksisterer en teknologi, som billigt og effektivt kan fremme en højere gasdannelse.

I nærværende projekt er der udviklet og testet et nyt koncept (GasBoosteren), der består af en kombination af flotation og membranfiltrering, og som gør det muligt at udnytte hele biomassens energipotential ved at tilbageholde biomassen i processen, indtil den omsættelige fraktion er omsat anaerobt. Endvidere boostes effektiviteten af biogasanlægget, idet de gavnlige bakterier tilbageholdes i processen, og ikke som nu følger det afgassede materiale ud af systemet.

GasBoosteren er udviklet af Bio-Aqua A/S og LiqTech International A/S i samarbejde med ComBigas og Teknologisk Institut. Udviklingen blev indledningsvis foretaget i pilotskala, hvorefter to fuldskalaløsninger er blevet implementeret og testet.

Pilotskalaforsøgene viste, at flotationstrinnet kunne recirkulere 57 % af tørstofindholdet, hvilket svarer til 36 % af restmetanpotentialet i den udgående biomasse. Ved at inkludere membranfiltreringen var det muligt at recirkulere 90 % af tørstofindholdet svarende til 70 % af restmetanpotentialet i den udgående biomasse. Ved at sænke restmetanpotentialet af den udgående biomasse er det forventeligt, at emissionen af drivhusgasser ved markudlægning reduceres tilsvarende. Altså vil der potentielt kunne udbringes mere afgasset gylle pr. hektar, såfremt de generelle gødskningsregler mht. nitrogen og fosfor overholdes.

Med udgangspunkt i de gennemførte test vil der kunne produceres 4 % mere biogas pr. m³ biomasse, som tilledes reaktoren alene ved flotation, og 8 % mere biogas ved flotation og membranfiltrering. Det skal dog bemærkes, at restmetanpotentialet og biogaspotentialet i den indgående biomasse er lav for den anvendte reaktor ved ComBigas ift. hovedparten af andre gyllebaserede biogasreaktorer¹. Dette bevirker, at det recirkulerede materiale har et lavt metanpotential. De ovenfor udregnede merudbytter vil derfor i mange tilfælde være højere for andre gyllebaserede biogasanlæg. Således vil det være forventeligt, at merudbyttet vil være væsentligt højere for en reaktor med en højere organisk belastning og kortere opholdstid. Det er derfor ikke muligt at foretage en direkte sammenligning med andre teknologikoncepter. Endvidere vil GasBoosteren kunne anvendes til at øge belastningen i en reaktor fx, med kilde-sorteret organisk dagrenovation, uden at tørstofindholdet i den udgående biomasse øges, hvilket vil kunne 'booste' biogasudbyttet fra eksisterende biogasanlæg.

Testene viste desuden, at der tilbageføres en betydeligt mængde biologisk materiale bestående af bakterier og arkea, hvilket vil bidrage positivt ift. effektiviteten af reaktoren. Således sti-

¹ Udvikling og effektivisering af biogasproduktionen i Danmark, Biogas Taskforce, Henrik Møller, 2015

ger koncentrationen i reaktoren af de langsomt voksende bakterier, der er ansvarlige for omsætningen af fx gylle og kildesorteret organisk dagrenovation (hydrolyserende og metanproducerende bakterier og arkea).

På baggrund af de gennemførte pilotskalatest - og inden udviklingen og implementeringen af fuldskalaanlægget - blev det besluttet at estimere merindtægter samt investerings- og driftsudgifter ved implementering af GasBoosteren. Beregningerne viste, at tilbagebetalingstiden for flotationsdelen var mindre end 1 år, hvorimod membranfiltreringsdelen havde en meget lang tilbagebetalingstid (over 15 år). Beregningerne er forbundet med stor usikkerhed og vil endvidere være afhængig af driften og typen af biogasanlægget. Med udgangspunkt i beregningerne blev det besluttet kun at inkludere flotationstrinnet i fuldskalaanlægget.

I projektet er der blevet udviklet et flotationsanlæg, som på mange måder adskiller sig fra mere traditionelle flotationsanlæg, idet flotationsanlægget skal kunne fungere anaerobt (ATEX-sikret), ligesom gassen i dispergervandet skal kunne indgå i den samlede produktion af biogas. Endvidere skal flotationsanlægget kunne behandle den udgående biomasse fra et biogasanlæg, som har et højt indhold af uorganisk materiale og indhold af større partikulært materiale, som potentielt vil kunne resultere i tilstopning. I projektet er der blevet udviklet og afprøvet flere udformninger af flotationsanlægget (modstrømsflotation, kegleformet og dobbeltkammerflotation samt skruetpresse kombineret med flotation).

Dobbeltkammerflotationsanlægget og skruetpresse kombineret med dette har over en længere periode været anvendt på et af ComBigas' biogasanlæg. Da der kun er én reaktor på anlægget, er det meget svært at måle en direkte effekt af GasBoosteren. I den sidste testperiode, hvor skruetpressen kombineret med flotation blev anvendt, er gasproduktionen løbende blevet monitoreret. På grund af store fluktuationer i gasproduktionen over tid er det meget vanskeligt at tilskrive GasBoosteren eventuelle ændringer. Tørstofindholdet i begge de recirkulerede prøver er dog forholdsvis højt (hhv. 20 % og 10 %). Endvidere observeres det, at TS- og VS-indholdet i fraktionerne er stabile, uanset om der tilføres kildesorteret organisk affald til reaktoren eller ej. Tilbageholdelsesgraden for fuldskalaløsningen er dog en anelse mindre ift. de to gennemførte pilotskalaforløb, hvilket kan skyldes stor usikkerhed på flowbestemmelserne.

Der er i projektet gennemført en række formidlingsaktiviteter, hvor GasBoosterkonceptet er blevet præsenteret. Dette inkluderer bl.a. et åbent følgegruppemøde med fremvisning af GasBoosteren, en posterpræsentation ved en international conference (Regatec) samt en præsentation på en national temadag afholdt på Teknologisk Institut.

ComBigas overvejer på nuværende tidspunkt at inkludere teknologien fremadrettet ved opførelse af nye anlæg. Efter projektets afslutning vil teknologien blive testet på en rådnepan på et renseanlæg, hvor teknologien også forventes at have en meget positiv indvirkning på driftsøkonomien (baseret på indledende pilottests). I nærværende projekt er der altså udviklet og afprøvet et teknologikoncept, som kan markedsføres, og som forventes at kunne finde bred anvendelse nationalt såvel som internationalt – både i gylle- og slambaserede biogasanlæg.

Summary

The national effort to implement renewable energy as stated among others in the Danish Energy Agreement, has currently resulted in a substantial increase in the number of biogas plants being constructed. The economic aspects of a manure-based plant can be a challenge, because manure is a low-value product and requires development of new technologies in order to be able to increase the profitability of these plants.

Today, manure-based biogas plants are operated with a high dry matter content. This means that in many biogas plants, especially those using short/medium retention times, the degassed biomass still contains a relatively large amount of unused dry matter. This means that a large residual gas potential remains, because there is no technology available that can facilitate larger gas production both effectively and at a low cost.

Within this project, a new concept (GasBooster) has been developed and tested, which combines flotation and membrane filtration and allows using the entire energy potential of biomass by withholding it in the process until the respective fraction is converted anaerobically. Furthermore, the efficiency of the biogas plant is boosted, because beneficial microorganisms are withheld in the process, and are not led out of the system together with the degassed material.

GasBooster has been designed by Bio-Aqua A/S and LiqTech International A/S in collaboration with ComBigas and the Danish Technological Institute. The development of the new technology was initially performed at pilot scale, and subsequently two full-scale solutions were implemented and tested.

Pilot scale trials showed that the flotation stage was able to recirculate 57% of the dry matter content, which corresponds to 36% of the residual methane potential in the output biomass. By including the membrane filtration, it was possible to recirculate 90% of dry matter content corresponding to 70% of the residual methane potential in the output biomass. It is expected that by lowering the residual methane potential of the output biomass the greenhouse gas emissions for manure application in the field will be reduced. Hence, it will potentially become possible to deliver more degassed manure per hectare as long as the general fertilizing regulations for nitrogen and phosphorus are followed.

According to the performed tests, it will be possible to produce 4% more biogas per m³ biomass, added to the reactor by flotation alone, and 8% more biogas by flotation and membrane filtration. However, it must be noted that the residual methane potential and biogas potential in the ingoing biomass is low for the reactor at ComBigas compared to the majority of other manure-based biogas reactors². This leads to the fact that the recirculated material has a low methane potential. In many cases, the increased profits calculated above will be higher for other manure-based biogas plants, which means that the increased profit is expected to be considerably higher for a reactor with a higher organic load and shorter retention time. Therefore, it is not possible to make a direct comparison to other technology concepts. Also, GasBooster can be used to increase the load in a reactor, e.g. with source separated organic refuse, without increasing the dry matter content in the outgoing biomass, and thereby “boosting” the biogas yield from the existing biogas plant.

² Development and optimization of biogas production in Denmark, Biogas Taskforce, Henrik Møller, 2015

Tests also showed that a considerable amount of biological material consisting of bacteria and archaea is transferred back, which has a positive influence on the efficiency of the reactor. This will ensure that the concentration of slowly growing bacteria responsible for the conversion of e.g. manure and source separated organic refuse (hydrolyzed and methane-producing bacteria and archaea) will increase in the reactor.

After the completed pilot scale test and before the development and implementation of the full-scale plant, it was decided to make an estimation of the additional profits and the investment and operational costs for the implementation of the GasBooster. Calculations showed that the payback period for the flotation part was less than a year, whereas for the membrane filtration part the payback period was very long (more than 15 years). The latter calculations are connected to a great uncertainty and will also depend on the biogas plant operations and type. These calculations have therefore led to the decision to only include the flotation stage in the full-scale plant.

In this project, a flotation plant was developed that in many ways differs from a more traditional flotation plant. The newly developed flotation plant must be able to function anaerobically (ATEX secured), and the gas in the dispersed water must be included in the total production of biogas. Furthermore, the flotation plant must be able to process the output biomass from the biogas plant, which has a high content of inorganic material as well as larger particulate materials, which potentially would cause blockage. This project has focused on developing and testing several flotation plant designs (counter-flow, conical, double chamber flotation as well as screw press combined with flotation).

The double chamber flotation plant combined with screw press have been used in one of the ComBigaS biogas plants for a longer period of time. Since there is only one reactor at the plant, it is very hard to measure the direct effect of the GasBooster. In the final test period, where the screw press combined with flotation was used, the gas production was monitored regularly. Due to large fluctuations in the gas production over time, it is very difficult to ascribe potential changes to the GasBooster. The content of dry matter in both recirculated test samples is considerably high (20% and 10% respectively). In addition, it is also observed that TS and VS content in fractions are stable, and are not affected regardless whether or not source separated organic waste is added to the reactor. The retention degree for full-scale solution is slightly lower according to the completed pilot-scale tests, which can be caused by the great uncertainty about flow requirements.

In this project, a series of dissemination activities have been completed, where the GasBooster concept was presented. This includes, among others, an open expert monitoring group, where the GasBooster was presented, a poster presentation at an international conference (Regatec) and a presentation at the national seminar at the Danish Technological Institute.

At the moment, ComBigaS is considering to include the technology in the production of new plants. After the end of the project, the technology will be tested on a digester tank in a treatment plant, where the technology is also expected to have a very positive influence on the operating economy (based on initial pilot tests). In this project, a marketable technological concept has been developed and tested, and it is expected to find a broad area of application on a national and international scale both in manure and sludge-based biogas plant.

1. Introduktion og koncept

Der pågår en national satsning vedr. implementering af vedvarende energi formaliseret i energiaftalen, hvilket bl.a. medfører, at antallet af biogasanlæg i øjeblikket bliver udbygget betragteligt. Økonomien for gyllebaserede anlæg har været udfordret, da gylle er et lavværdiprodukt, og der er derfor et stort behov for teknologiudvikling for at kunne øge rentabiliteten i disse anlæg.

I dag drives biogasanlæg ofte med et højt tørstofindhold. For mange biogasanlæg – især anlæg som anvender korte/mellemlange opholdstider – betyder dette, at den afgassede biomasse stadig indeholder relativt meget uudnyttet tørstof. Der er derfor et væsentligt gaspotentiale, der ikke udnyttes, da der ikke eksisterer en teknologi, som billigt og effektivt kan fremme en højere gasdannelse.

I nærværende projekt er der udviklet et nyt koncept (GasBoosteren), der består af en kombination af flotation og membranfiltrering, og som gør det muligt at udnytte hele biomassens energipotential ved at tilbageholde biomassen i processen, indtil den omsættelige fraktion er omsat anaerobt. Endvidere boostes effektiviteten af biogasanlægget, idet de gavnlige bakterier tilbageholdes i processen, og ikke som nu følger det afgassede materiale ud af systemet.

I det følgende afsnit og kapitler gennemgås udviklingen af GasBoosteren.

1.1 Gasboosterkonceptet

Den forventede løsning var en enhed, der tilsluttes et eksisterende biogasanlæg, hvor aftapningen af den afgassede biomasse foregår. I det anaerobe miljø skulle enheden filtrere tørstof fra med en flotationsenhed efterfulgt af en keramisk filterenhed, således at tørstof og gavnlige bakterier kunne føres tilbage til processen. Den filtrerede væskefraktion skal efterfølgende anvendes direkte til udsprengning på marker. Teknologikonceptet er skitseret i FIGUR 1.

Igennem en recirkulering af ikke-omsat tørstof og aktivt bakterielt materiale var det forventningen, at Gasbooster-teknologikonceptet ville:

- forbedre biogasudbyttet af den indgående biomasse, og/eller
- reducere den hydrauliske opholdstid, uden at biogasudbyttet af den indgående biomasse ville blive reduceret
- øge muligheden for at inkludere mere biomasse i reaktoren, som fx kildesorteret organisk dagrenovation, uden at øge restmetanpotentialet i den udgående biomasse og samtidig bidrage til en forbedret økonomi for biogasanlæggene.

En bedre omsætning af den indgående biomasse vil endvidere bevirke en reduktion i udledningen af metan-/lattergas (potente drivhusgasser) fra den ikke-afgassede gylle, som i dag spredes direkte på markerne.

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.

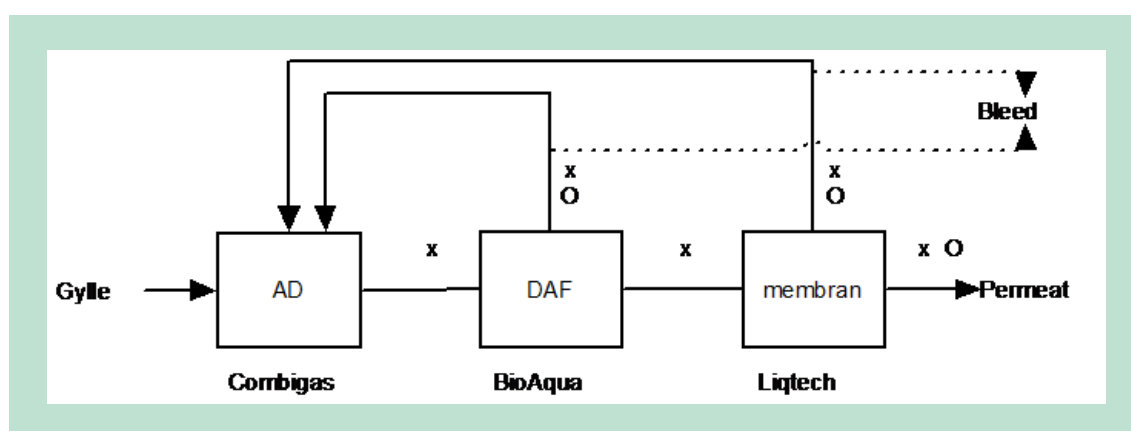
Litteraturundersøgelsen viste, at der findes en række teknologikoncepter, som har nogen lighed med grundidéen bag GasBooster-teknologikonceptet – effektivt reaktordesign gennem recirkulering/tilbageholdelse af ikke-omsat materiale. Langt hovedparten af identificerede teknologikoncepter adskiller sig dog væsentligt fra GasBoosteren, idet separationen/tilbageholdelsen som oftest foretages direkte i reaktoren, hvorfor koncepterne ikke kan tilbygges på eksisterende anlæg.

Anoxic Gas Flotation (AGF) er det teknologikoncept, som har størst lighed med GasBoosteren, idet der også i dette koncept anvendes flotation til separation. Hovedparten af patenterne inden for AGF er enten udløbet eller tæt på forældelsesdato, og det blev derfor vurderet, at de ikke ville kunne få indvirkning på en eventuel markedsføring af GasBoosteren. Det er i flere tilfælde blevet vist, at AGF kan forbedre omsætningseffektiviteten af den indgående biomasse. Således har det været muligt at opnå samme omsætning af det organiske materiale ved en opholdstid på blot en tredjedel i forhold til en konventionel reaktor. AGF-konceptet viste, at det var muligt at øge omsætningen med 22 % af det organiske materiale ved uændret opholdstid i forhold til en konventionel reaktor. Endvidere fremhæves det, at den forøgede, organiske belastning ikke øger koncentrationerne af ammonium og sulfid, idet disse forekommer i væskefasen. Både ammonium og sulfid kan være inhiberende ved høje koncentrationer³. Potentialet i teknologien er således beskrevet, og der optimeres på GasBoosterkonceptet, hvilket forventes at resultere i tilsvarende effekter. Den angivne meromsætning af det organiske materiale kan dog ikke umiddelbart overføres til GasBoosteren, idet effekten vil være påvirket af en lang række faktorer, herunder både drift (opholdstid, organisk belastning, m.m.) og type af reaktor (gyllebaseret/slambaseret).

³ Sutaryo, 2012. Optimisation and inhibition of anaerobic digestion of livestock manure. Department of Engineering, Aarhus University. Denmark. 35 pp. - Technical report BCE -TR-3

2. Pilotskalaforløb

I hhv. juni og november 2015 er der gennemført to forsøgsrunder i pilotskala ved ComBigas' biogasanlæg i Tarm. GasBoosterkonceptet består her af gylle fra ComBigas samt erhvervsfraktioner fra fødevarerindustri (AD – Anaerobic Digestion), som floteres i DAF-anlægget (Dissolved Air Flotation) for at tilbageholde en fiberfraktion. Permeatet fra DAF'en skal derefter membranfiltreres for at kunne tilbageføre mikroorganismer til ComBigas-anlægget. I FIGUR 1 er konceptet for GasBoosteren vist, og det er med "X" angivet, hvor der er udtaget prøver til massebalance og med "O" er det angivet, hvor der er udtaget prøver til mikrobiologiske analyser. I forsøgene blev inokulum grovfilteret på si inden anvendelse (herfra benævnt filtreret gylle), hvilket ikke er vist i figuren.



FIGUR 1. Oversigt over Gasboosterkonceptet med angivelse af prøvetagningssteder for pilotskalaforsøgene. 'X' angiver, hvor der er udtaget prøver til opstilling massebalance, og 'O' angiver, hvor der er udtaget prøver til mikrobiologiske analyser. AD: Anaerob Digestion. DAF: Dissolved Air Flotation. Bleed: Mulighed for at tage en delstrøm forbi separationstrinnene for dermed at undgå en evt. ophobning af uomsætteligt materiale.

Begge pilotskalaforløb er blevet gennemført under aerobe forhold, hvorfor de mikrobiologiske analyser kun omhandler bestemmelse af totalt antal bakterier og arkea til stede i prøverne. Der påregnes yderligere mikrobiologisk karakterisering ved komplet implementering af fuldskalakonceptet (se kapitel 5).

Det første forsøg blev gennemført i juni 2015 ved anvendelse af inokulum fra reaktor 1 fra ComBigas' biogasanlæg i Tarm (demonstrationsanlæg), og det andet forsøg blev gennemført i november 2015 ved anvendelse af inokulum fra gårdanlægget i umiddelbar forbindelse med kontorfaciliteterne ved ComBigas. I det første forsøg blev der anvendt tre forskellige membrantyper, nemlig 1 µm, 0,5 µm og 0,04 µm, hvorimod der i det andet forsøg udelukkende blev anvendt 0,04 µm. Endvidere blev membranfiltreringen i det andet forsøg foretaget over en længere periode, hvorved det blev muligt at opkoncentrere retentatet (permeat fra flotationen).

Forsøgene havde til formål at:

- Vurdere de to teknologiers (flotation og filtrering) evne til at recirkulere fibermateriale
- Karakterisere tilgængelig fraktion af organisk og uorganisk materiale i anlægget og i henhold til de forskellige teknologier

- Vurdere det ekstra biogaspotentiale af fibermaterialet, som kan opnås ved flotation og filtrering.

2.1 Pilotskalaforsøg 1 – juni 2015

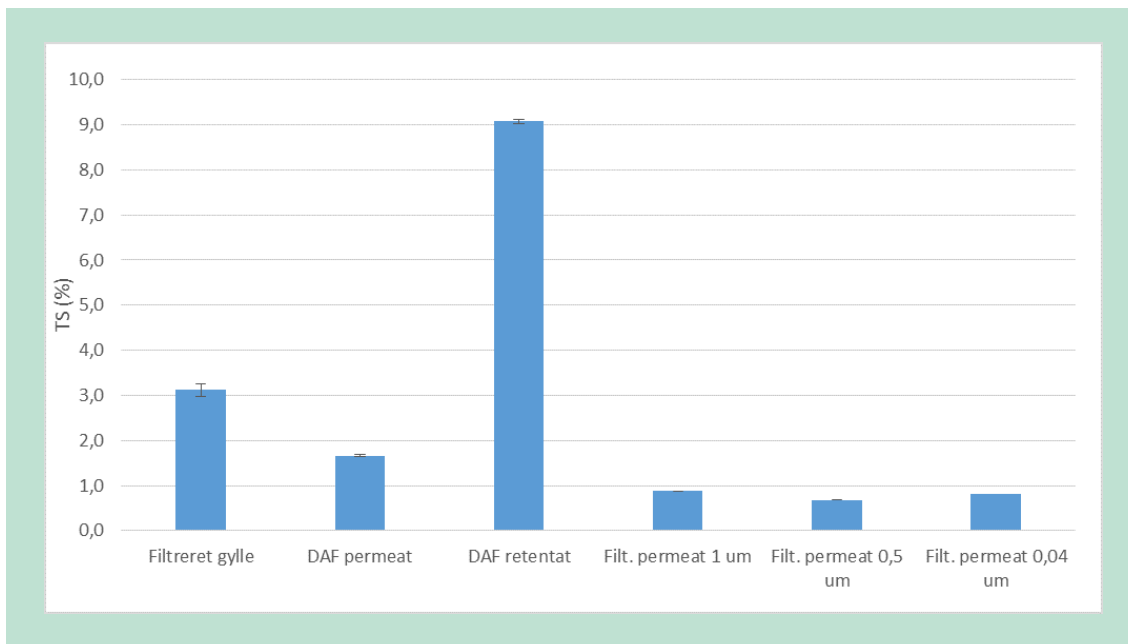
Billede 1 fra forsøget viser, hvordan filtreret gylle blev tilledt flotationstrinnet. Forsøget blev gennemført ved ComBigaS' store reaktor, der opererer med en meget lang opholdstid (ca. 90 dage).



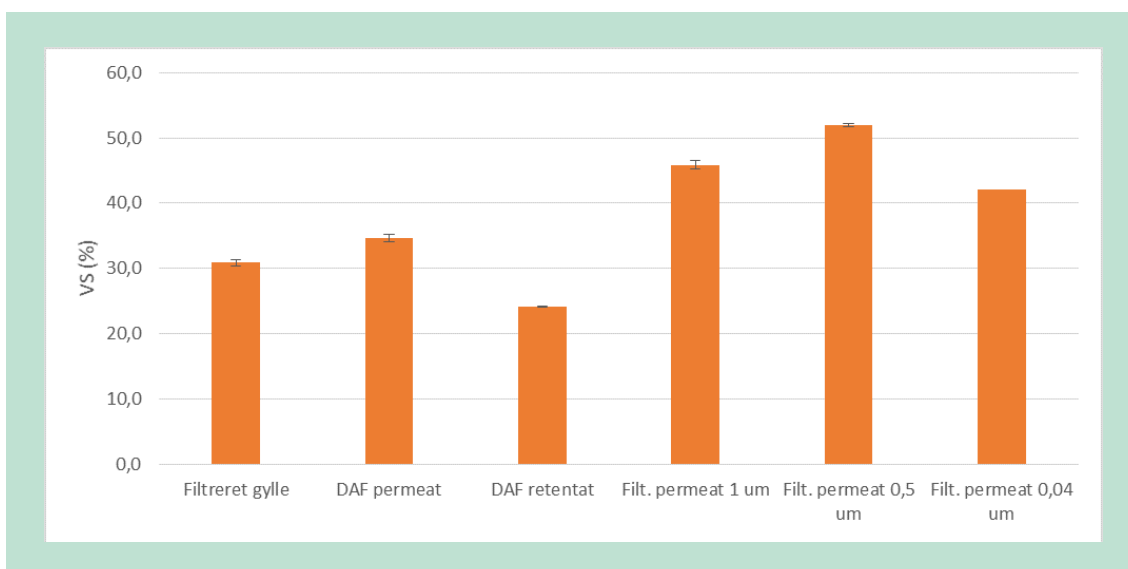
Billede 1 Flotationsanlæg og palletanke med filtreret gylle.

2.1.1 Massebalance – recirkulering af fibermateriale

I de nedenstående figurer er tørstof (TS) og indholdet af flygtige organiske stoffer (VS) vist for de udtagne prøver. Der blev målt på den indgående biomasse til flotationsanlægget (filtreret gylle), den floterede biomasse (DAF-rententat), permeatet fra flotationsanlægget (DAF-permeat) samt permeatet fra membranfiltreringsanlægget. Både TS og VS blev udført som duplikatmålinger ved henholdsvis 105 °C i 48 timer og 550 °C i 24 timer.



FIGUR 2. TS-indhold af prøver før og efter flotation og membranfiltrering.



FIGUR 3. VS-indhold af prøver før og efter flotation og membranfiltrering.

Som det fremgår af FIGUR 2, halveres tørstofindholdet efter både flotation og filtrering. Det organiske indhold af det anvendte inkulum udgør kun en tredjedel af tørstofindholdet, hvilket indikerer, at reaktoren indeholder store mængder uorganisk materiale (sand m.m.). Normalt udgør den organiske del mellem 50-80 %.

På baggrund af det gennemførte forsøg er der i TABEL 1 opstillet en overordnet massebalance for flotationstrinnet. Det har på baggrund af det gennemførte forsøg ikke været muligt at opstille en massebalance for filtreringstrinnet, idet der i forsøget kun blev filtreret meget små volumener.

TABEL 1. Overordnet massebalance for flotationstrinnet.

| Biomasse | Volumen (l) | TS (%) | VS (%) | TS (kg) | VS (kg) |
|-----------------|-------------|------------------------|--------|---------|---------|
| Filtreret gylle | 260 | 3,12 | 30,87 | 8,11 | 2,50 |
| DAF-permeat | 208,8 | 1,66 | 34,65 | 3,47 | 1,20 |
| DAF-retentat | 51,2 | 9,07 | 24,17 | 4,64 | 1,12 |
| | | TS tilbageført: 57,2 % | | | |
| | | VS tilbageført: 44,8 % | | | |

Det første pilotskalaforøg viser således, at flotationstrinnet er i stand til at recirkulere 57,2 % af tørstoffet og 44,8 % af det organiske materiale, hvilket er sammenligneligt med tidligere testede teknologier (buesigte) gennemført af Teknologisk Institut.

2.1.2 Biogaspotentialer

Biogaspotentialer (BMP) bestemmes ved brug af Bioprocess Control-udstyr. Permeatet fra filtreringsprocessen indeholder mindre end 1 % tørstof, hvilket betyder, at et eventuelt biogasudbytte er yderst begrænset. Der er derfor ikke bestemt BMP på permeatet fra filtreringsprocessen.

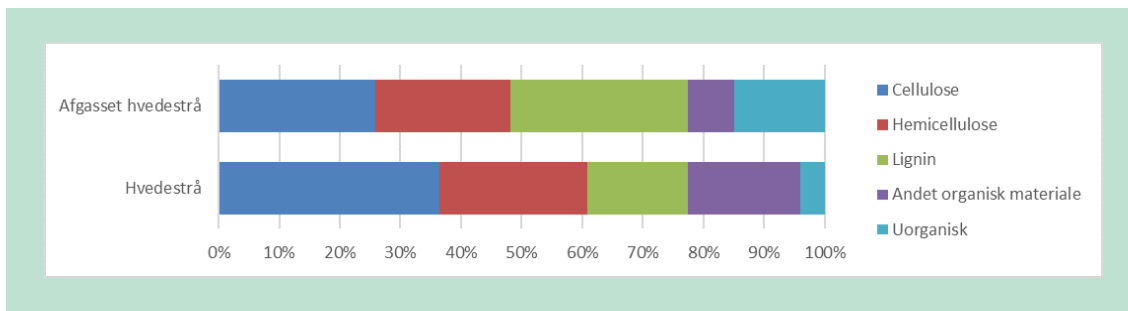
Der er ved nærværende test benyttet følgende fremgangsmåde:

- Termofil udrådning ved 52 °C i Bioprocess Control-udstyr med anvendelse af inokulum fra CombiGaS
- Tripelbestemmelse af alle prøver
- Dobbeltbestemmelse af cellulosereference (mikrokrystallinsk cellulose).

Udrådningen blev afsluttet efter ca. 20 dage. Data for akkumuleret metanproduktion er angivet som målt værdi i nml CH₄/gVS efter udrådning.

Biogaspotentialer for både den filtrerede gylle samt permeatet og retentatet fra flotationstrinnet er meget lavt (data ikke vist). Det lave BMP for alle prøverne skyldes, at der er en relativt stor mængde uorganisk stof i prøverne, som derved giver et meget lille udbytte. Den organiske fraktion er samtidig svært nedbrydelig, hvilket sandsynligvis skyldes et højt indhold af lignin. Dette er ikke overraskende, idet der ved ComBigaS anvendes forholdsvis meget dybstrøelse/strå. Ydermere har reaktoropholdstiden i forsøgsperioden været meget lang, hvorfor størstedelen af det tilgængelige organiske materiale allerede er omsat. Denne meget lange opholdstid er usædvanlig for biogasanlægget og resulterede desværre i, at udrådningsdata ikke er retvisende for det forventede udbytte. Dog viste forsøget med tydelighed, at de anvendte separationsteknologier var effektive ift. at kunne recirkulere fibermaterialet.

For at vurdere potentialer af hvedestrå ved udrådning blev der gennemført en række kontrolrede forsøg, hvor fordelingen af cellulose, hemicellulose og lignin blev undersøgt før og efter udrådning. Undersøgelsen blev gennemført med henblik på at vurdere potentialer af den recirkulerede biomasse. I FIGUR 4 er sammensætning før og efter udrådning vist.



FIGUR 4. Sammensætning før og efter udrådning.

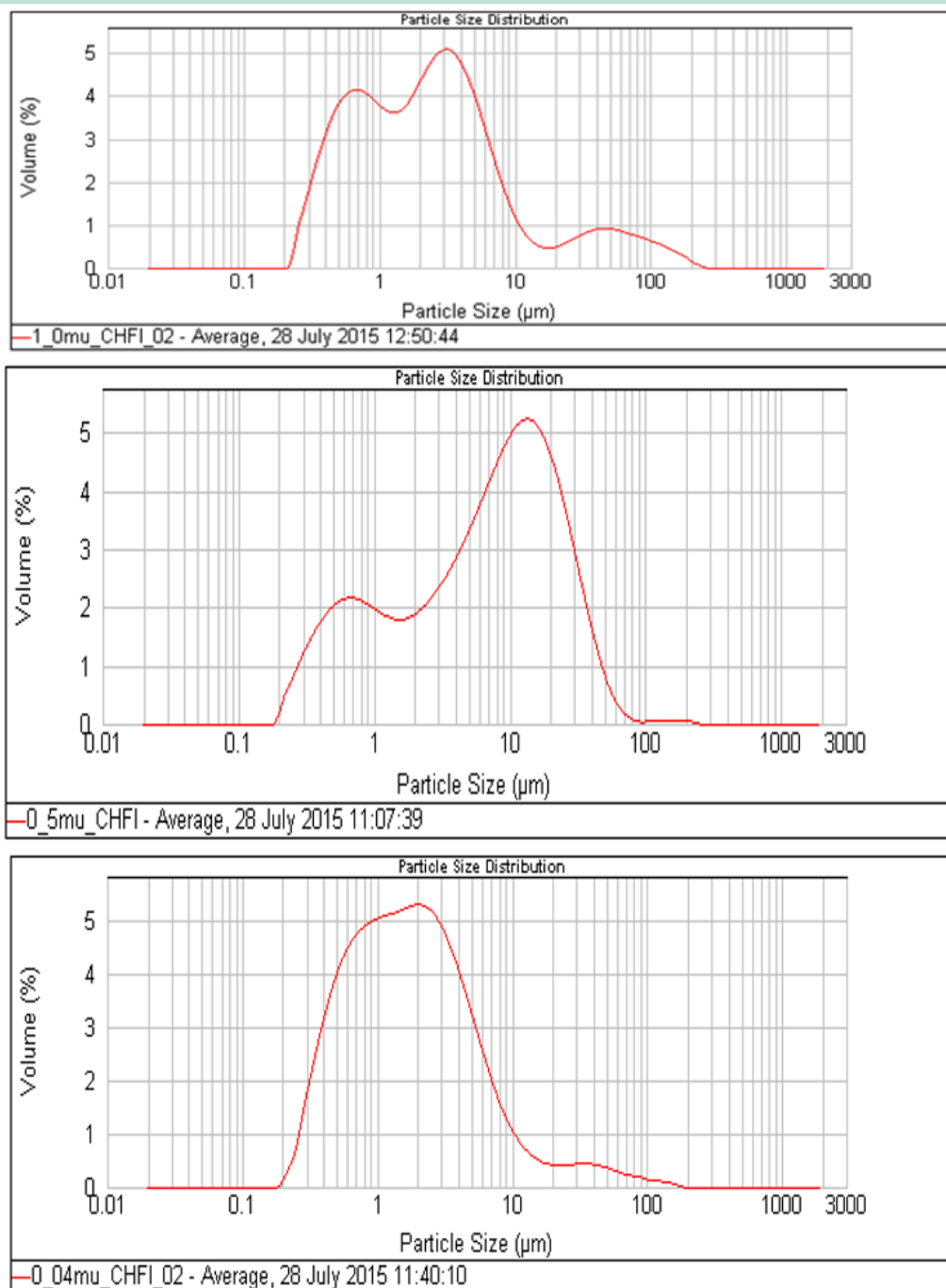
Biogasudbyttet af hvedestrå er på ca. 240 ml CH₄ pr. gVS og udbyttet af den afgassede hvedestrå er på 140 ml CH₄ pr. gVS. Dette indikerer med tydelighed, at svært omsættelige substrater kan recirkuleres og bidrage til en øget gasproduktion, samtidig med at emissionen af drivhusgasser ved udlægning af den afgassede biomasse reduceres.

Det skal dog bemærkes, at restmetanpotentialet og biogaspotentialet i den indgående biomasse er lav for den anvendte reaktor ved ComBigaS. Således er gaspotentialet af den indgående biomasse beregnet i Biogas Taskforce til 20,75 Nm³/ton, hvilket er 50 % lavere end gennemsnittet⁴. Dette bevirker, at det recirkulerede materiale derfor også har et lavt metanpotentiale.

2.1.3 Partikelstørrelsesfordeling efter membranfiltrering

Partikelstørrelsesfordelingen af permeatet fra filtreringstrinnet er blevet bestemt ved brug af laserdiffraktion (MasterSizer 3000). Til bestemmelserne er der anvendt et refraktivt index på 1,48 (referenceværdi for cellulose). Partikelstørrelsesfordelingen er vist som en volumenbaseret fordeling, hvilket betyder, at store partikler procentuelt har stor effekt på fordelingen.

⁴ Udvikling og effektivisering af biogasproduktionen i Danmark, Biogas Taskforce, Henrik Møller, 2015



FIGUR 5. Partikelstørrelsesfordeling af forskellige fraktioner af filtreringspermeat.

Som det fremgår af FIGUR 5, er partikelstørrelsen fordelt på 3 fraktioner: mellem 0,1-1 µm, mellem 1-20 µm og fra 10-100 µm. Det ser ikke ud til, at der er en entydig sammenhæng mellem partikelstørrelse og membranstørrelse, hvilket er noget overraskende. Årsagen hertil er formodentlig, at noget af permeatet er lækket ved siden af membranen og derved influerer på den målte størrelsesfordeling.

2.1.4 Konklusion pilotskalaforsøg 1

Den overordnede konklusion af forsøget er:

- Flotationstrinnet recirkulerer 57 % af tørstofindholdet og 45 % af det organiske materiale
- Biogaspotentialt af de undersøgte prøver er meget lavt, hvilket indikerer, at det organiske materiale indeholder en høj andel af svært omsættelige forbindelser (eksempelvis lignin).

Med den nuværende drift af den anvendte reaktor ved ComBigaS indikerer forsøget, at det ikke vil være profitabelt at reintroducere retentatet fra flotationstrinnet. Det er dog sandsynligt, at GasBoosterkonceptet vil kunne anvendes til at reducere opholdstiden i reaktoren, idet allerede omsat materiale passerer hurtigere igennem reaktoren, hvilket også vil kunne udgøre en økonomisk gevinst i tilfælde af, at reaktoren vil kunne tilføres mere biomasse som fx organisk dagrenovation.

På baggrund af dette forsøg blev det besluttet at gennemføre et nyt forsøg ved en anden reaktor ved CombiGaS, der i højere grad bliver drevet som reaktorer i andre biogasanlæg, dvs. med lavere opholdstid.

2.2 Pilotskalaforsøg 2 – november 2016

Der er i det andet forsøg anvendt inokulum fra en gårdreaktor ved CombiGaS. Denne drives ved mere normale betingelser (væsentligt lavere opholdstid), hvorfor det formodes, at fiber materialet vil være mindre omsat. Dette blev endvidere verificeret i et laboratoriesøg (data ikke vist). Her blev fiber materialet frafiltreret, og efterfølgende blev biogaspotentialt heraf bestemt. Forsøgene viste således, at biogaspotentialt af fiber materialet var 2-3 gange højere end observeret i det første pilotskalaforsøg.

Nedenstående ses billeder fra forsøget.



Billede 2 Flotationsanlæg. I baggrunden ses membranfiltreringsanlægget.



Billede 3 Membranfiltreringsanlæg.

2.2.1 Massebalance – recirkulering af fibermateriale

I TABEL 2 er tørstof (TS) og indholdet af flygtige organiske stoffer (VS) vist for de udtagne prøver. Med undtagelse af den filtrerede gylle er målingerne (både TS og VS) foretaget som duplikatmålinger ved henholdsvis 105 °C i 48 timer og 550 °C i 24 timer.

TABEL 2. Tørstof og askeindhold af udtagne prøver fra pilotskalaforsoget i november 2015.

| Prøve | TS (%) | VS (%) | VS STDAFV | TS STDAFV |
|------------------|--------|--------|-----------|-----------|
| Ufiltreret gylle | 2,25 | 59,10 | 0,0767 | 0,003 |
| Filtreret gylle | 2,0 | 54,9 | | |
| Gyllefibre | 12,22 | 83,27 | 0,0778 | 0,225 |
| DAF-permeat | 1,15 | 57,73 | 0,0935 | 0,001 |
| DAF-retentat | 6,92 | 66,86 | 0,0200 | 0,021 |
| UF-permeat | 0,60 | 40,04 | 0,0686 | 0,002 |
| UF-retentat | 1,54 | 64,09 | 0,0218 | 0,002 |

Som det fremgår af TABEL 2, er tørstofindholdet i den ufiltrerede gylle på 2,25 %, hvilket er meget lavt. Dette indikerer altså, at denne reaktor ligeledes er lavt belastet. Dog er den organiske andel af tørstoffet generelt højere i prøverne fra denne reaktor. Herudover var andelen af gyllefibre langt højere i forhold til det første forsøg.

På baggrund af TS- og VS-målingerne samt de noterede volumener fra forsøget er der opstillet en overordnet massebalance. Som udgangspunkt for opstillingen er det bl.a. antaget, at densiteten af alle prøver er den samme. Overordnet set stemmer massebalancen dog nogenlunde for både tørstof og VS:

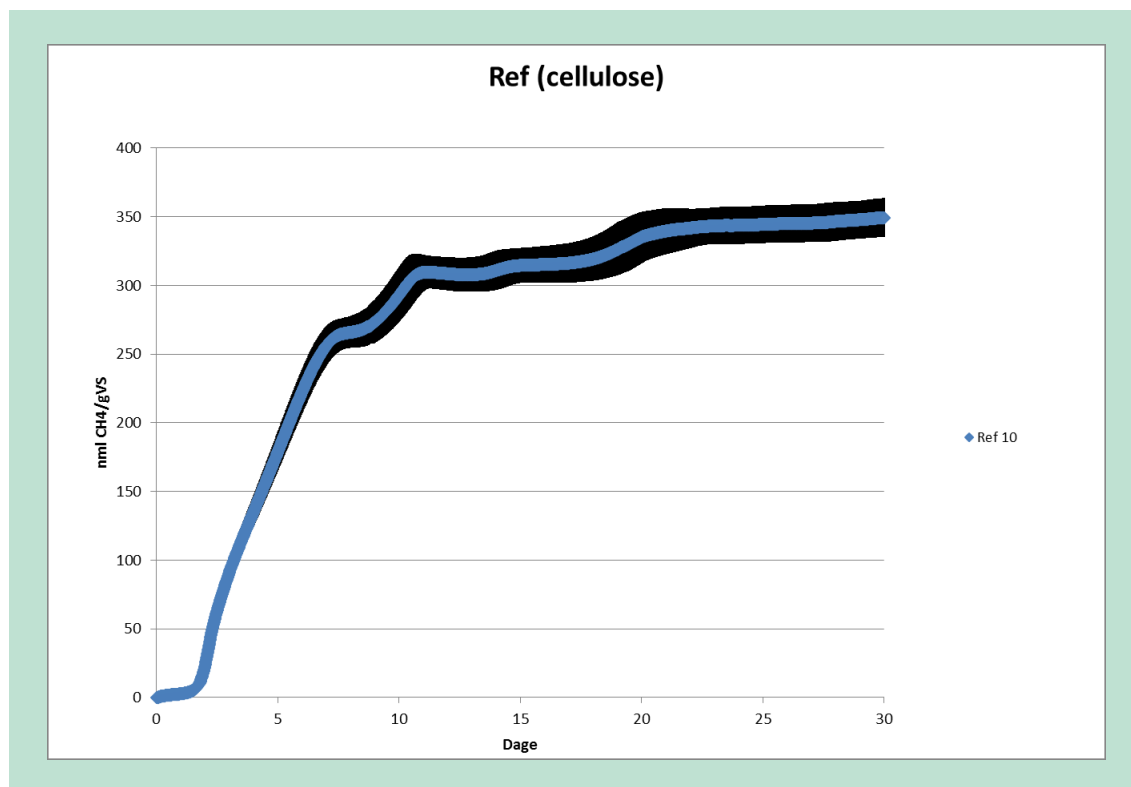
- Grovfiltrering: 15 % af tørstof og 21 % af VS tilbageholdes
- DAF: 50 % af tørstof og 61 % af VS tilbageholdes (total: 57 % af tørstof og 69 % VS).
- UF: 77 % af tørstof og 85 % af VS tilbageholdes (total: 90 % af tørstof og 100 % af VS)

Tilbageholdelsesgraden af flotationstrinnet minder i vid udstrækning om det første pilotskala-forsøg. I tillæg er der udarbejdet en massebalance for total-nitrogen, total-fosfor og ammonium, som er beskrevet i afsnit 2.2.6.

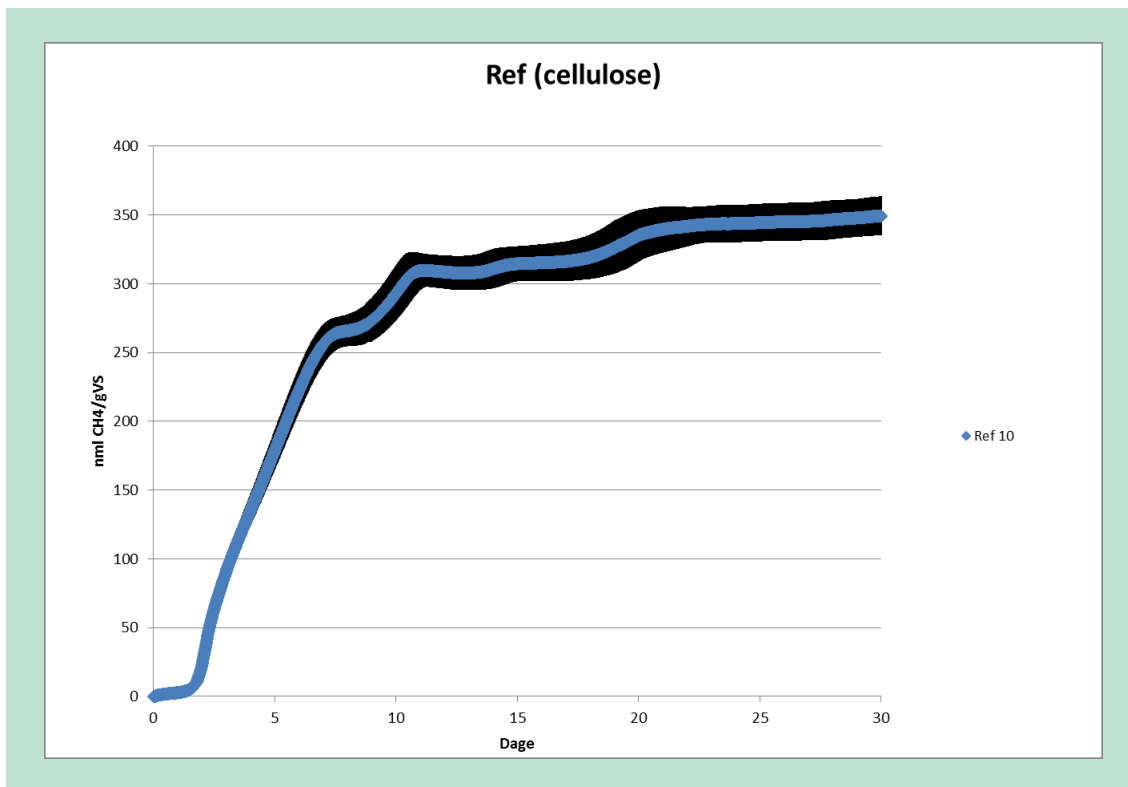
2.2.2 Biogaspotentiale af fiberfraktioner

Biogaspotentialet (BMP) bestemmes ved brug af Bioprocess Control-udstyr. Metoden er kort beskrevet i afsnit 2.1.2.

Som det fremgår af FIGUR 6 er biogasudbyttet af den mikrokrystallinske cellulose på ca. 350 nml CH₄/gVS, hvilket er tæt på det forventede udbytte (375 ± 25 nml CH₄/gVS). Det anvendte inokulum er altså aktivt.



FIGUR 6. Biogaspotentiale af mikrokrystallinsk cellulosereference udført som dobbeltbestemmelse.

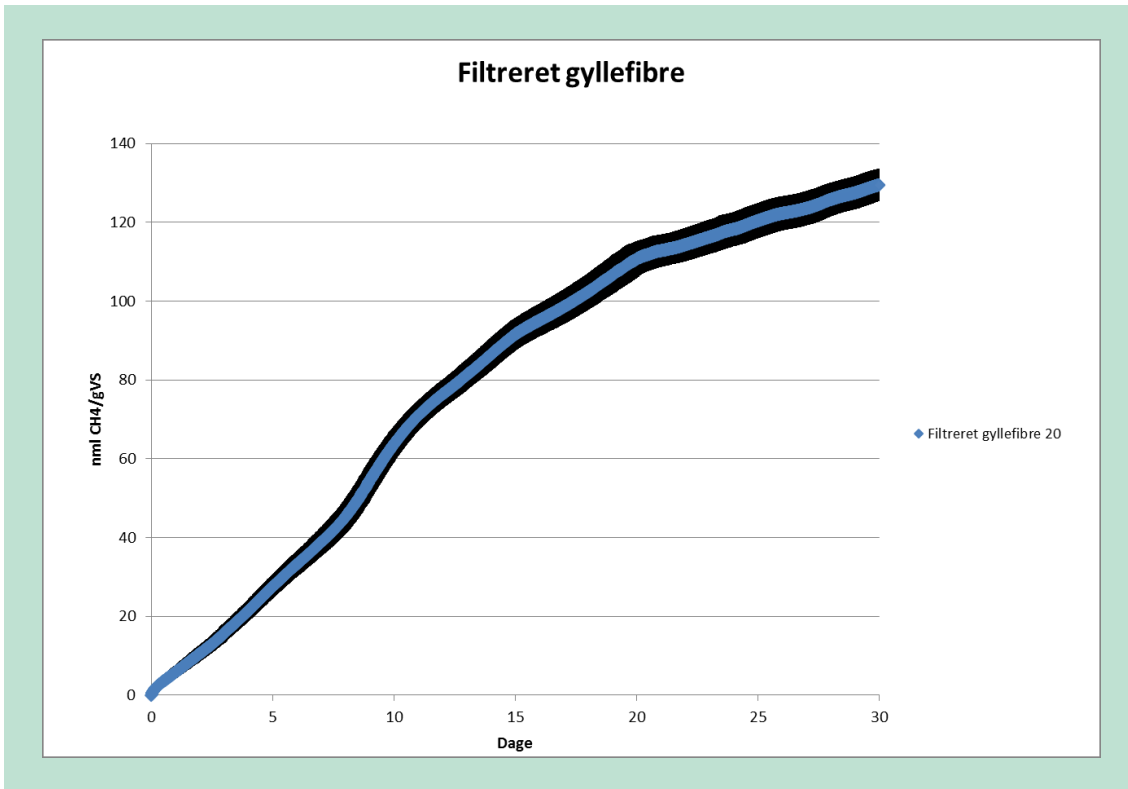


FIGUR 7. Biogaspotential af mikrokrystallinsk cellulosereference udført som dobbeltbestemmelse.

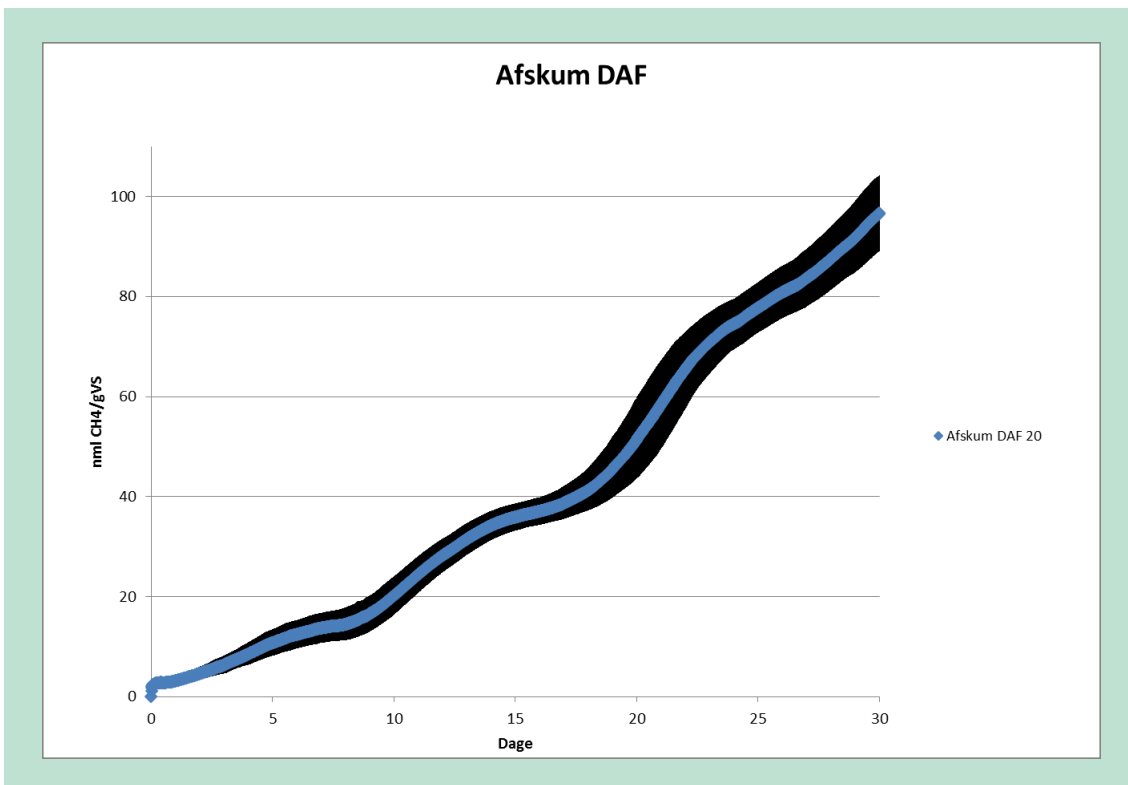
Som det fremgår af FIGUR 7, er biogaspotential af de filtrerede gyllefibre på 140 nml CH₄/gVS efter 30 dage. Dette udbytte er meget lig biogaspotential målt i tidligere forsøg på fiber materiale fra gyllebaseret biogasanlæg gennemført af Teknologisk Institut.

Biogaspotential af fiber materialet fra flotationstrinnet er på 95 nml CH₄/gVS (se FIGUR 9) hvilket er lidt lavere end af de filtrerede gyllefibre. Det ses på figuren, at biogasproduktionen stadig er stigende, samt at raten er lav.

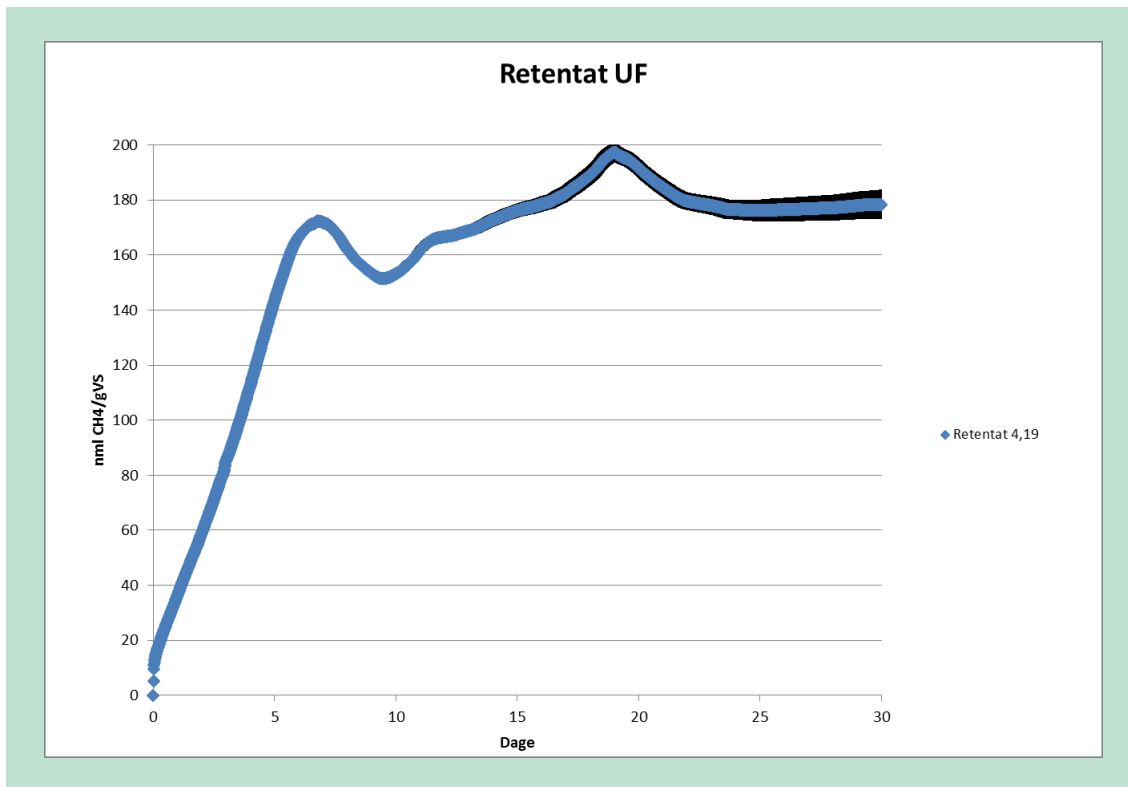
Biogaspotential af UF-retentatet er derimod højt, ca. 200 nml CH₄/gVS, og raten de første dage er meget høj (se figur 10). UF-retentatet må derfor overvejende bestå af nemt omsætteligt organisk materiale.



FIGUR 8. Biogaspotentiale af filtrerede gyllefibre.



FIGUR 9. Biogaspotentiale af rententat fra flotation (afskum).



FIGUR 10. Biogaspotential af rententat fra ultrafiltrering.

Med udgangspunkt i tørstof- og VS-massebalancen samt de målte biogasudbytter er det udregnet, hvor stor en procentdel af biogaspotential af biomassen som i dag ikke udnyttes i reaktoren:

- Grovfiltrering: 13 %
- Grovfiltrering og DAF: 36 %
- Grovfiltrering, DAF og UF: 70 %.

Dette svarer til, at der pr. m³ biomasse, som tilledes reaktoren, kan opnås følgende merudbytte (under forudsætning af at recirkuleringen ikke ændrer stabiliteten af reaktoren, og at udrådningen er fuldstændig):

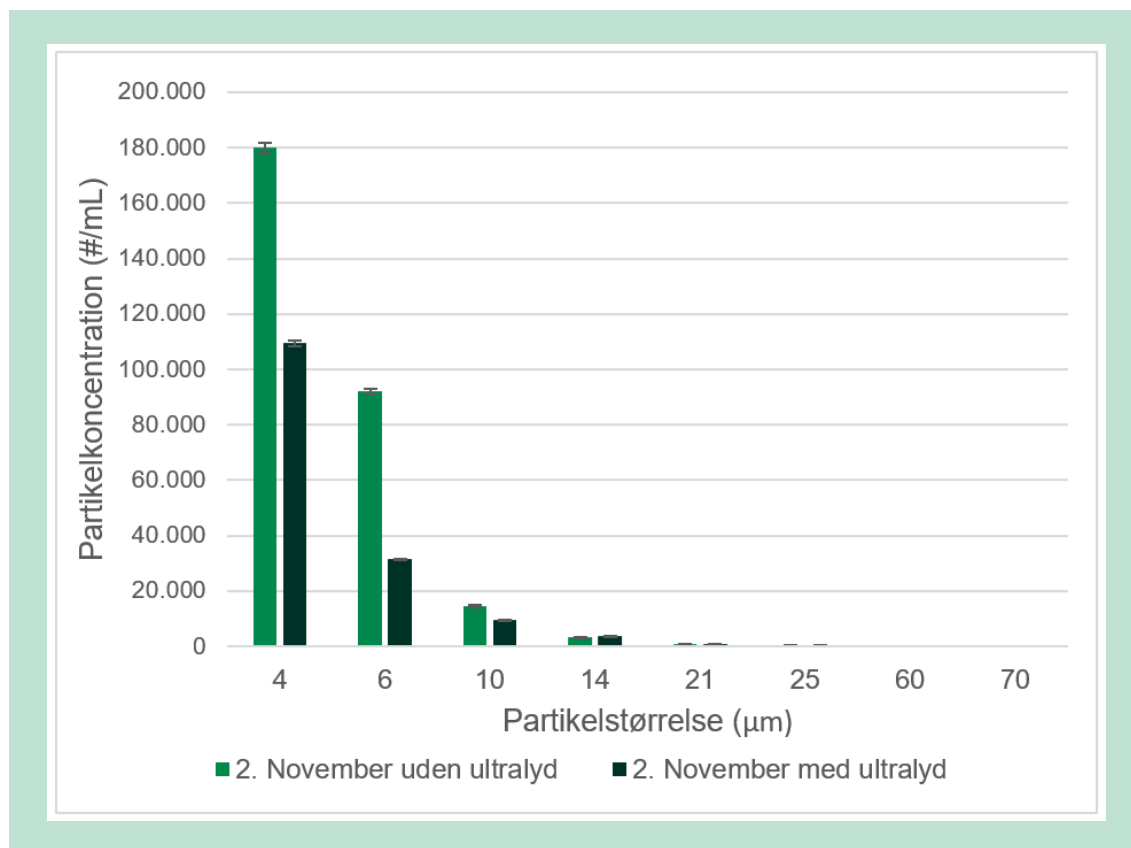
- Grovfiltrering: 0,4 m³ CH₄ svarende til 0,6 m³ biogas*
- Grovfiltrering og DAF: 1,0 m³ CH₄ svarende til 1,6 m³ biogas*
- Grovfiltrering, DAF og UF: 1,9 m³ CH₄ svarende til 3,2 m³ biogas*

* ved antagelse af et metanindhold på 60 %.

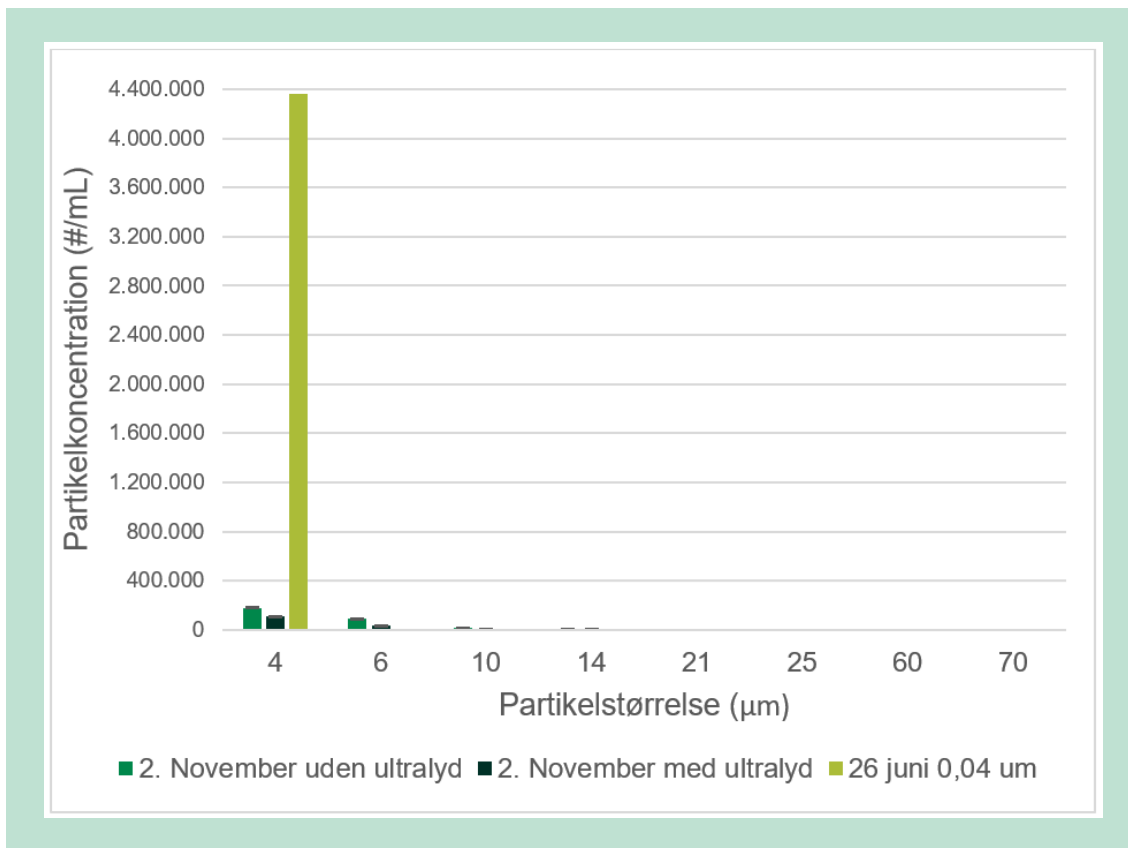
De ovenfor udregnede merudbytter vil være meget afhængige af reaktortypen. Således vil det være forventeligt, at merudbyttet vil være væsentligt højere for en reaktor med en højere organisk belastning. Ovenstående merudbytter vil svare til, at der pr. m³ biomasse som tilledes reaktoren opnås 4 % og 8 % mere biogas. Dog viser en nyligt udgivet rapport fra Biogas Taskforce (2015), at metanpotential i den indgående biomasse for langt hovedparten af de danske gyllebaserede biogasanlæg er lavere end for det anvendte anlæg ved ComBigas. På denne baggrund er det derfor overvejende sandsynligt, at GasBoosteren kan implementeres med et højere eller lignende udbytte og med mulighed for at øge tilsætning en af biomasse i reaktoren som fx kildesorteret organisk dagrenovation.

2.2.3 Partikelstørrelsesfordeling

På UF-permeatet er der målt partikelantal og størrelsesfordeling, se FIGUR 11. Denne vises som antal partikler pr. milliliter, som er over den angivne partikelstørrelse. Partikelantalsfordelingen viser, at der på trods af en membran med en nominel porestørrelse på 0,04 μm er et betydeligt antal partikler, som er noget større. I forhold til membranfiltreringen ved forsøget i juni er antallet af partikler dog væsentligt mindre (>faktor 200), på trods af at der er anvendt en membran med samme nominelle porestørrelse, se FIGUR 12. Dette viser, at membranfiltreringen fra juni ikke er forløbet efter hensigten.



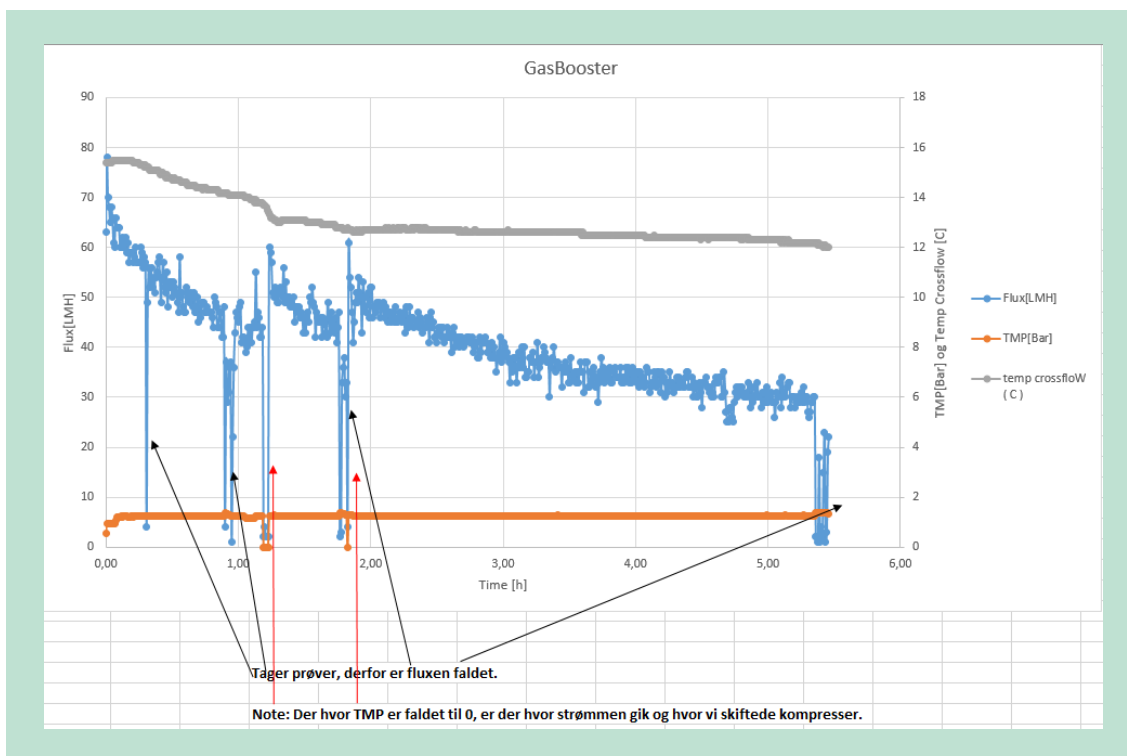
FIGUR 11. Partikelantalsfordeling af membranfiltreringspermeatet fra den 2. november. Til forsøgene er der anvendt en membran med en nominel porestørrelse på 0,04 μm .



FIGUR 12. Partikelantalsfordeling af membranfiltreringspermeatet fra den 2. november og 26. juni. De viste data er alle med en nominal porestørrelse på 0,04 µm. I forsøget den 26. juni er der ikke anvendt ultralyd, umiddelbart inden målingen er foretaget.

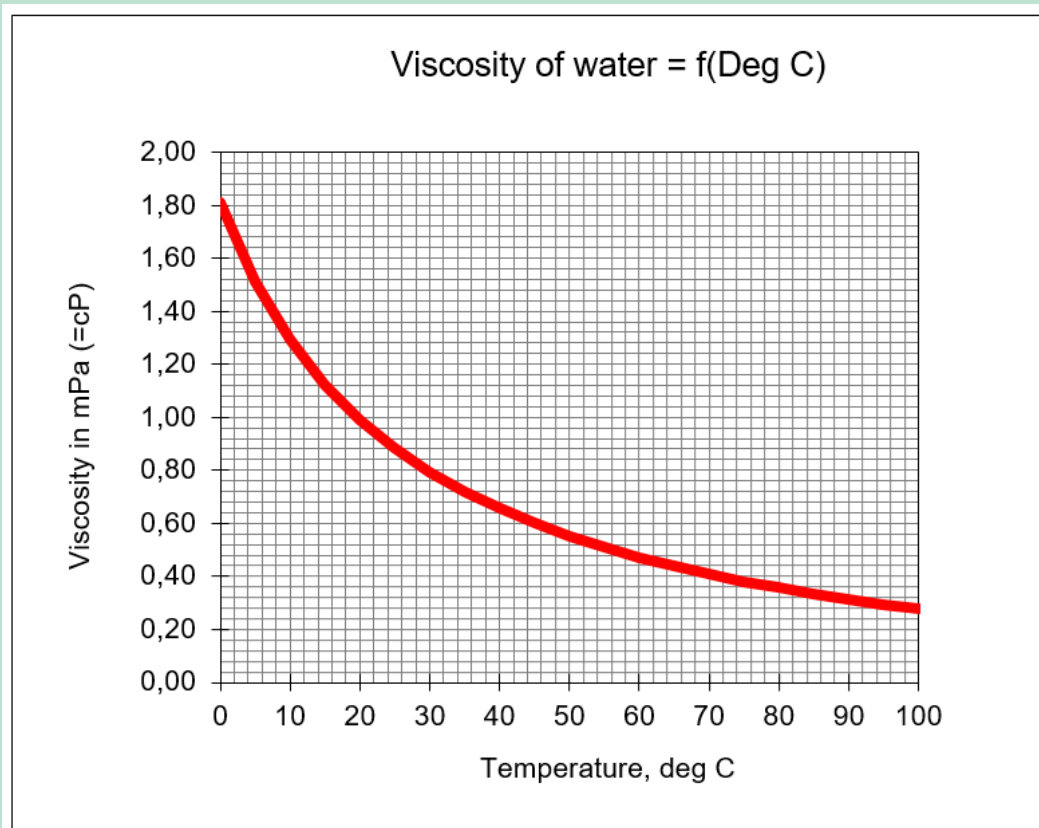
2.2.4 Driftsdata fra membranfiltrering

I den nedenstående graf er driftsdata (flux, TMP samt temperatur) vist for det gennemførte forsøg. Det skal bemærkes, at forsøget blev udført over en periode på 5½ time, hvilket ikke gør det muligt at inkludere effekterne ved længere drift. Formålet med pilottesten var i højere grad at undersøge tilbageholdelseseffektiviteten af tørstof og kortlægge, hvor meget biogas der vil kunne produceres på denne fraktion. Som det fremgår af FIGUR 13, falder fluxen fra 50 til 30 LMH over den målte periode.



FIGUR 13. Driftsdata fra membranfiltrering (flux, transmembrantryk og temperatur).

Crossflowtemperaturen under pilotforsøget faldt fra 15 °C til 12 °C (se Figur 13). Forsøget blev udført i november, hvorfor der er forekommet nogen afkøling. For vand medfører faldende temperatur en stigende viskositet. Det antages, at DAF-permeatet udviser samme viskositetsændringer som vist i FIGUR 14. Ved en kontinuerlig drift af et fuldskalaanlæg vil temperaturen på DAF-permeatet være meget lig temperaturen på reaktoren. Dette vil bevirke, at viskositeten vil være 0,55 mPa og ikke 1,12 mPa som i det gennemførte pilotskalaforløb. En lavere viskositet vil resultere i en højere membranpermeabilitet og flux. Fluxen forventes dog at være betydeligt højere ved en driftstemperatur på 50 °C. Den faldende flux i pilotforsøget vurderes ikke udelukkende at være forårsaget af viskositetsændringer (fra 15 °C til 12 °C).



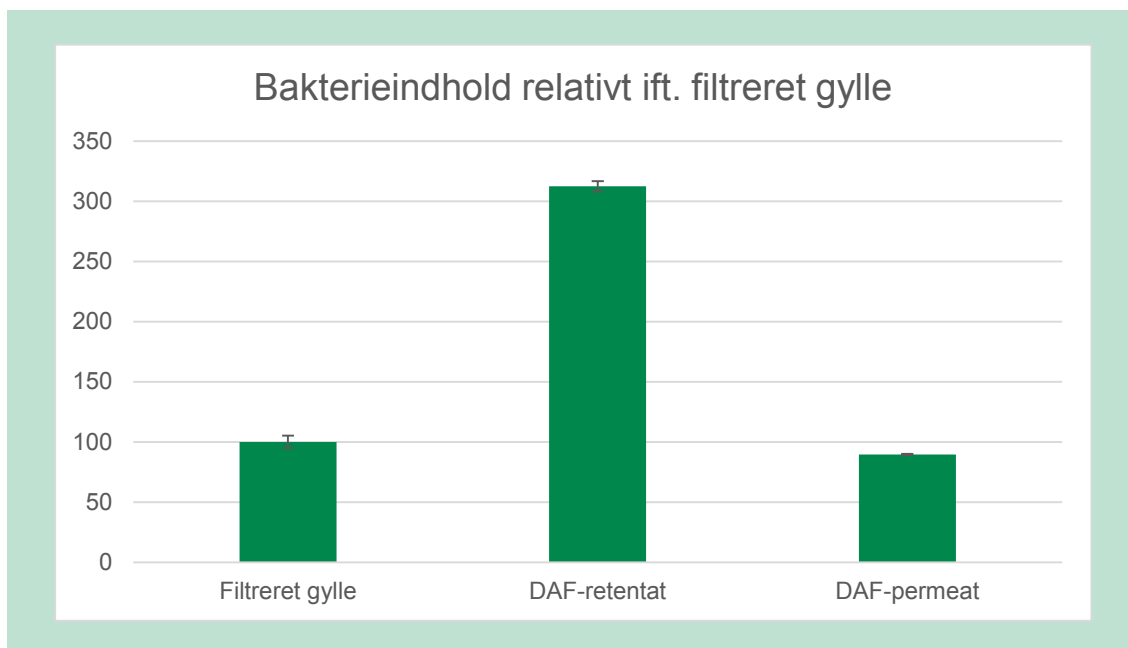
FIGUR 14. Forhold mellem temperatur og viskositet for vand.

2.2.5 Mikrobiologisk karakterisering

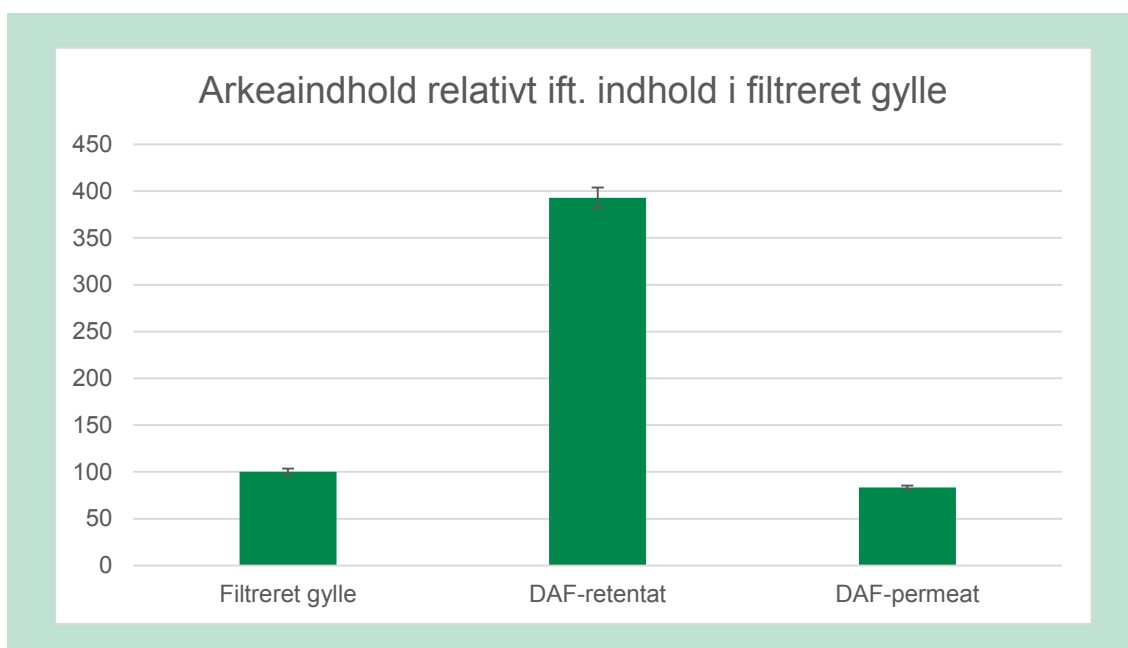
I tillæg til at recirkulere omsætteligt organisk materiale tilbage til biogasreaktoren, og derved forbedre reaktoreffektiviteten, var det forventeligt, at der ligeledes ville blive recirkuleret de aktive mikroorganismer. Denne recirkulering vil være af stor betydning ift. at biogasreaktoren vil skulle omsætte mere organisk materiale og derfor kræver en stor aktiv population af mikroorganismer.

For at dokumentere dette blev indholdet af bakterier og arkea i den filtreret gylle samt i DAF-permeat og DAF-retentat bestemt ved qPCR fra pilotforsøgene i november 2016. I de nedestående figurer er indholdet af mikroorganismer i DAF-permeat og DAF-retentat sat relativt i forhold til den filtreret gylle. Som det fremgår af figurerne, er indholdet af bakterier og arkea i DAF-retentatet ca. tre gange højere end i den filtrerede gylle. Tørstofindholdet i DAF-retentatet er ca. 3,5 gange højere end i den filtrerede gylle. Det er således god overensstemmelse mellem koncentrationsgraden af tørstof og bakterier/arkea, hvilket ikke er overraskende idet disse i nogen grad forventes at være associeret med det partikulære materiale. Indholdet er derimod 10 % og 17% lavere i DAF-permeatet for henholdsvis bakterier og arkea.

De mikrobiologiske analyser er kun foretaget på enkelte punktprøver, hvorfor forholdet kun giver en indikation af effekten. De dokumenterer dog, at der tilbageføres en betydeligt mængde biologisk materiale bestående af uomsatte gyllefibre og mikroorganismer. Der er ikke inkluderet prøver fra membranfiltreringsanlægget. Det forventes dog, at langt hovedparten af bakterier og arkea vil blive tilbageholdt ved membranfiltreringen.



FIGUR 15. Bakterieindhold i udtagne prøver fra pilotforsøgene i november 2016, sat ift. udgangsmaterialet filtreret gylle.



FIGUR 16. Arkeaindhold i udtagne prøver fra pilotforsøgene i november 2016, sat ift. udgangsmaterialet filtreret gylle.

2.2.6 Nitrogen, fosfor og ammonium

I tillæg til ovenstående massebalancer er der ligeledes målt total-nitrogen, total-fosfor og ammonium i prøverne (se TABEL 3).

For både total-nitrogen, total-fosfor og ammonium observeres der en reduktion i koncentrationen i DAF-permeat ift. den ufiltrerede gylle, og UF-permeat reduceres yderligere ift. DAF-permeat. For total-fosfor var dette forventeligt, idet koncentrationerne forventes at følge tørstofindholdet, som reduceres på tilsvarende vis. For ammonium er dette dog lidt overrasken-

de, idet ammonium er vandopløseligt og derfor i højere grad burde fordele sig ligeligt mellem permeatet og retentatet.

TABEL 3. Total-nitrogenindhold, total-fosforindhold og ammoniumindhold i prøver.

| Prøve | Total-N (mg/l) | Total-P (mg/l) | NH ₄ ⁺ (mg/l) |
|------------------|----------------|----------------|-------------------------------------|
| Ufiltreret gylle | 4050 | 424 | 3465 |
| DAF-permeat | 2670 | 159 | 2135 |
| DAF-retentat | 4080 | 400 | 3010 |
| UF-permeat | 2225 | 319 | 1930 |
| UF-retentat | 3050 | 266 | 2185 |

2.2.7 Konklusion pilotskalaforsøg 2

Den overordnede konklusion af forsøget er, at:

- Grovfiltrering og flotationstrinnet recirkulerer 57 % af tørstofindholdet og 69 % af det organiske materiale, hvilket svarer til 36 % af restmetanpotentialet i den udgående biomasse.
- Grovfiltrering, flotation og membranfiltrering recirkulerer 90 % af tørstofindholdet og 100 % af det organiske materiale, hvilket svarer til 70 % af restmetanpotentialet i den udgående biomasse.
- Biogaspotentialet af de undersøgte prøver er langt højere end af de tilsvarende prøver fra det første forsøg, hvilket skyldes driftsforhold og substratsammensætning.
- Der tilbageføres en betydeligt mængde biologisk materiale bestående af bakterier og arkea. Dette forventes at bidrage positivt ift. effektiviteten af reaktoren.

3. Businesscase

Med udgangspunkt i de gennemførte pilotskalatest - og inden udviklingen og implementeringen af et fuldskalaanlæg - blev det besluttet at estimere merindtægter samt investerings- og driftsudgifter ved implementering af GasBoosteren.

Overordnet set kan GasBoosteren anvendes på to måder:

- Uændret opholdstid i reaktor, hvorved udnyttelse af ressourcerne forbedres, idet restmetanpotentialiet af den udgående biomasse reduceres. Mængden tilledt biomasse er uændret, hvorfor driftsudgifterne til biogasanlægget er uændrede.
- Reduceret opholdstid i reaktor, men samme tørstofindhold af den udgående biomasse. Dette vil øge reaktorkapaciteten og giver dermed mulighed for at øge produktionen fra reaktoren. Tilledningen af biomasse vil øges, hvorfor driftsudgifterne til biogasanlægget også vil stige. Kildesorteret organisk dagrenovation vil være et af de mulige biomasser, som kan anvendes.

I de nedenstående beregninger er der taget udgangspunkt i en uændret opholdstid, hvor restmetanpotentialiet udnyttes gennem GasBoosteren.

3.1 Merindtægt

I beregningerne er der taget udgangspunkt i separationseffektiviteten fra pilotforsøgene og i de målte biogaspotentialer. Disse vil være meget afhængige af biogasanlægget, hvorfor den økonomiske merværdi kan variere betragteligt. Beregningerne viser, at separationstrinnene vil kunne resultere i følgende merudbytte og forventede økonomiske merværdi:

- Grovfiltrering og flotation: 4,9 kr. pr. m³ biomasse
- Grovfiltrering, flotation og UF: 9,6 kr. pr. m³ biomasse.

I de ovenstående beregninger er der antaget en pris på 5 kr. pr. m³ biogas. I beregningerne er det forudsat, at alt biomasse recirkuleres, og at udrådningen er fuldstændig. Dog viser en modellering, at recirkuleringen potentielt kan medføre en ophobning af tørstof, hvilket vil bevirke, at recirkuleringsgraden må reduceres. På et mellemstort biogasanlæg (HRT: 30 dage; reaktorvolumen: 6000 m³) vil GasBoosteren således kunne resultere i en årlig økonomisk merindtægt på maksimalt:

- Grovfiltrering og flotation: 583.000 kr. pr. år.
- Grovfiltrering, flotation og UF: 1.167.000 kr. pr. år.

Den økonomiske merindtægt vil dog være afhængig af, hvor stor en andel, der, for at imødegå ophobning, ikke ledes via separationstrinnene. I de ovenstående estimater er ikke inkluderet evt. effekt af tilvænnning til en større fibermængde. Denne kan formodes at gøre udrådningen af det recirkulerede materiale mere effektiv over tid. Endvidere er beregningerne gennemført på et anlæg med lang opholdstid, hvor andelen af organisk materiale i det udgående materiale er meget lav, hvilket reducerer gevinsten.

I de ovenstående beregninger er GasBoosterkonceptet anvendt med henblik på at opnå et højere udbytte af den indgående biomasse ved uændret hydraulisk opholdstid og øget partikulær opholdstid. Der foreligger dog også den mulighed, at konceptet vil kunne anvendes til at reducere den hydrauliske opholdstid ved uændret opholdstid for partikulært materiale. Ved en sådan anvendelse af konceptet vil der kunne indføres mere biomasse pr. reaktorvolumen, hvorved effektiviteten af reaktoren vil kunne øges. Denne option er ikke inkluderet i de nedenstående beregninger.

3.2 Flotation

I TABEL 4 er OPEX og CAPEX for flotationsanlæg til behandling af den udgående biomasse fra et stort biogasanlæg estimeret.

TABEL 4. CAPEX og OPEX for GasBoosterkonceptet.

| | Pris |
|--------------------------------------|-----------------------|
| Flotationsanlæg 10 m ³ /h | 400.000 kr. |
| Isoleret container | 50.000 kr. |
| Strømforbrug | 1,8 kWh 16.000 kr./år |
| Total | 466.000 kr. første år |

Af TABEL 4 fremgår det, at CAPEX er ca. 450.000 kr. og OPEX ca. 16.000 kr. Dette betyder, at tilbagebetalingstiden vil være på under 1 år. Beregningen er forbundet med stor usikkerhed, men viser med tydelighed, at businesscasen er særdeles god.

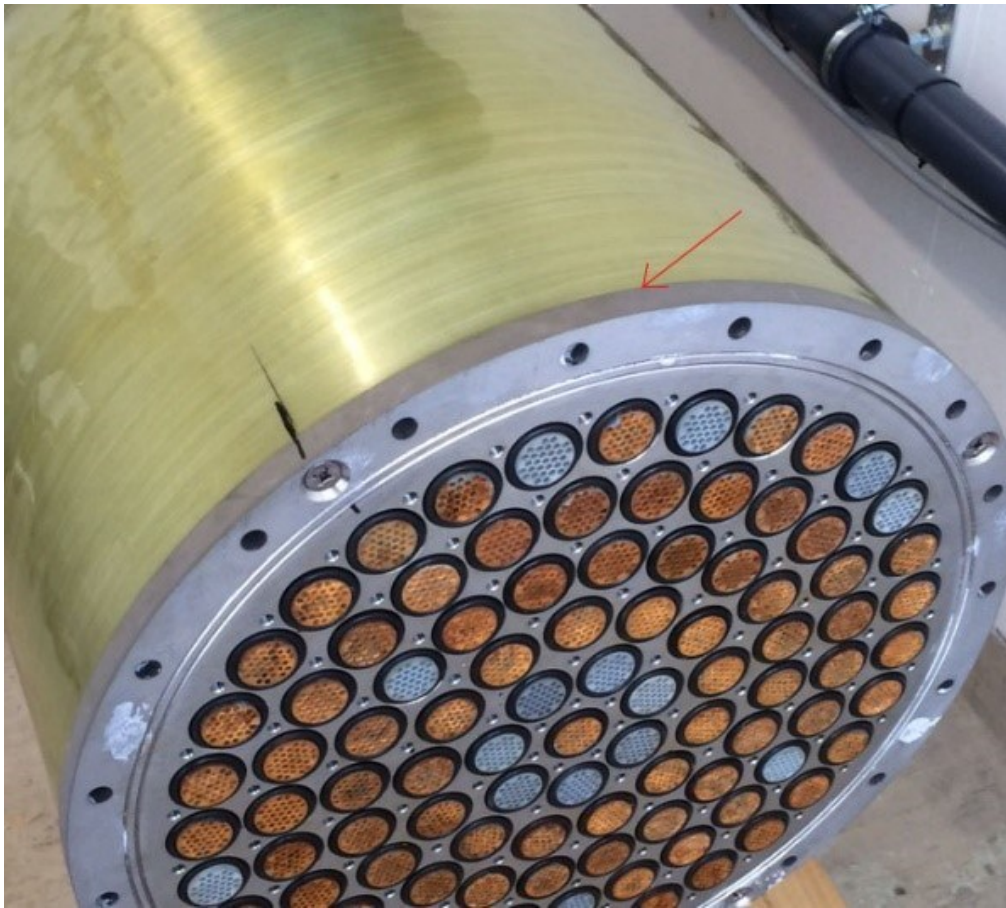
3.3 Flotation og membranfiltrering

På baggrund af de gennemførte pilotskalaforøg og erfaringsdata med fuldskalaanlæg til biogasanlæg (GFE-Krogenskær) er der opsat CAPEX og OPEX for forskellige designkonfigurationer af membranfiltreringsanlæg. Dette indbefatter membranfiltreringsanlæg, som vil kunne filtrere hele mængden fra flotationsanlægget samt halvdelen af mængden. Nedenfor præsenteres et udvalg af designkonfigurationerne. Det er valgt at designe konservativt, hvorfor den økonomiske overslagsberegning også er konservativ.

Alle konfigurationerne inkluderer:

- Fødepumpe, crossflowpumper, backflushpumpe, CIP-pumpe samt doseringspumper til anlægget. Fødepumpe samt crossflowpumper vil være frekvensstyret
- Membranerne installeret i et multihousing opbygget af stål, PP eller glasfiber
- Ventiler samt instrumenter som flowmåler, trykmåler samt temperaturmåler
- Rør og tanke i PP eller stål
- Styrepanel leveres med indbygget touchskærm.

I Billede 4 ses et multihousing med 99 membraner og Billede 5 et komplet membranfiltreringsanlæg.



Billede 4: Multihousing med 99 membraner.



Billede 5: Komplet membranfiltreringsanlæg.

I den nedenstående tabel er de vigtigste designparametre CAPEX og OPEX for konfigurationerne listet.

TABEL 5. Oversigt over designparametre for det komplette membranfiltreringsanlæg.

| | 1 | 2 | 3 |
|---------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| COMEM-membraner | 4x99 | 3x99 | 2x99 |
| Filteringsareal (m ²) | 135 | 102 | 67 |
| Behandlingskapacitet (m ³ /time) | 8,3 | 4,2 | 4,2 |
| Flux (LMH) | 52 | 35 | 53 |
| OPEX (kr./år) | 248.200 | 187.245 | 128.880 |
| CAPEX (kr.) | 3.573.800 | 2.965.800 | 2.417.800 |

Som det fremgår af afsnit 3.1, vil der på et stort biogasanlæg med et lavt restmetanpotentiale i det udgående materiale årligt være en potentiel merindtægt på 584.000 kr. til membranfiltreringen.

De ovenfor skitserede konfigurationer vil ikke behandle hele den udgående biomasse, men alene en delstrøm, hvorfor den potentielle merindtægt er mindre end 584.000 kr. Tilbagebetalingstider for alle konfigurationer er derfor meget lange. Det er dog vigtig at understrege, at gavnlige effekter ved recirkulering af aktive biologiske materiale ikke er taget i betragtning.

Endvidere er merindtægterne estimeret med udgangspunkt i en biogasreaktor med højt indhold af uorganisk materiale, hvorfor tilbagebetalingstiden kan vise sig at være bedre for andre biogasreaktorer.

4. Udvikling af fuldskalaanlæg

Med udgangspunkt i businesscasene blev det besluttet at fokusere udviklingen på flotationsdelen, idet denne del blev vurderet til at have en langt kortere tilbagebetalingstid. Endvidere blev det vurderet, at flotationsanlægget i langt højere grad end membranfiltreringsanlægget vil skulle modificeres i forhold til eksisterende løsninger. I de nedenstående afsnit er selve udviklingsforløbet frem til det færdige produkt beskrevet.

4.1 Udvikling af et anaerobt flotationsanlæg

De første test blev udført ved anvendelse af et mere traditionelt flotationsanlæg, der var åbent til atmosfæren (se kapitel 2). Testene blev udført for at identificere det overordnede potentiale i flotation på afgasset materiale fra et biogasanlæg. Kravene til et flotationsanlæg i GasBoosterprojektet adskiller sig på en række punkter fra mere traditionelle flotationsanlæg, idet:

- Flotationsanlægget skal kunne fungere anaerobt (ATEX sikres) ved, at den dannede biogas anvendes som input til dannelsen af dispergervand (væske med mikrobobler). Gassen i dispergervandet skal kunne indgå i den samlede produktion af biogas
- Flotationsanlægget skal kunne behandle den udgående biomasse fra et biogasanlæg. Biomassen vil have et højt indhold af uorganisk materiale samt indhold af partikulært større materiale, som potentielt vil kunne resultere i tilstopning
- Flotationsanlægget skal kræve meget lidt vedligeholdelse og justering.

4.1.1 Dannelse af mikrobobler

Traditionelt har der i flotationssystemer været anvendt en højtrykspumpe og en kompressor til at danne mikrobobler. Systemerne er kendetegnet ved at have et højt energiforbrug og samtidig være mere krævende i forhold til justering og vedligehold.

Til anvendelse på et biogasanlæg er det imidlertid nødvendigt med et flotationsanlæg, der kan være stort set selvkvørende. Derfor blev det valgt at anvende specielle turbinepumper, der direkte suger gassen ind, hvilket reducerer såvel energiforbruget som behovet for justering og vedligeholdelse.

Det er desuden en meget stor fordel ved dette system, at gassen suges ind i pumpehuset med vakuum, hvorfor det ikke er nødvendigt at tryksætte gassen. Endvidere er motoren på turbinepumpen gnistfri (ATEX), hvilket gør det muligt at anvende den meget brandbare biogas uden risiko for eksplosion. Dette kunne ikke lade sig gøre med brug af en traditionel højtrykspumpe og kompressor.

For at sikre dannelsen af mikrobobler blev der arbejdet med udvikling af en speciel, selvrensende dyse. Ved at udløse trykket fra turbinepumpen (cirka 5 bar) over en smal sprække opstår der momentant meget små bobler. Sprækken i dysen styres ved et statisk modtryk (trykluft). Denne konfiguration gør det samtidig muligt at holde dysen selvrensende, idet modtrykket, i korte intervaller, kan frakobles, hvorved flowet over dysen stiger kraftigt. Den selvrensende effekt har vist sig at være meget vigtig i denne applikation, hvor store partikler af halm, hår mv. kan forekomme. Således var der ved pilotskalaforsøgene ingen problemer med fx tilstopning.

4.1.2 Flotationskammer

I et traditionelt flotationsanlæg anvendes typisk et rektangulært kammer, hvor indløbet sker i den ene ende, og skummet skræbes over en kant i den anden. I traditionelle systemer anven-

des der som oftest atmosfærisk luft, og gassen i dispergervandet overgår løbende til den omkringliggende atmosfære. Idet der anvendes biogas som input til dispergervandet, er det nødvendigt, at gassen tilbageholdes i systemet, hvorfor flotationskammeret skal være lukket.

Derudover blev det valgt ikke at anvende en mekanisk skraber til GasBoosteren, da det er vanskeligt og dermed dyrt at lave en skraber som er gnistfri, hvilket er påkrævet, når der er anvendes brandbare gasser.

4.1.2.1 Modstrømsflotationsanlægget

Indledningsvis blev der udviklet et modstrømsflotationsanlæg, hvor væsken tilledes i toppen, og boblerne tilledes i bunden. Ved anvendelse af denne type anlæg opnår man maksimal udnyttelse af boblerne (lang opstigningstid) og det floterende materiale vil, per gravitation, selv løbe ud i toppen. Der blev konstrueret et 5 meter højt testanlæg udført i sort PE-plast. Det udviklede modstrømsflotationsanlæg kan ses i Billede 6.



Billede 6 Det udviklede modstrømsflotationsanlæg.

Det udviklede modstrømsflotationsanlæg blev opstillet på ComBigas' eget biogasanlæg og testet. Det viste sig hurtigt, at modstrømsprincippet var en meget effektiv separator, men desværre også at det var meget vanskeligt at få det floterende materiale ud af anlægget. Efter flere ændringer og en lang række test blev det besluttet, at det ikke ville være muligt at få dette anlæg til at køre kontinuert uden for mange driftsproblemer.

4.1.2.2 Kegleformet flotationsanlæg

For at overkomme ovenstående problemer blev det derfor besluttet at udvikle et nyt flotationsanlæg med en anden udformning af flotationskammeret. Et kegleformet flotationsanlæg blev således designet og konstrueret. I dette anlæg blandes gas og væske sammen ved dysen, hvorefter det via et stigrør løber op i selve anlægget. Herved løftes partikel/boble-aggregaterne til vejrs, mens den rensede væske strømmer mod afløbet i siden. En modeltegning af dette anlæg ses herunder.



Billede 7 Modeltegning af kegleformet, anaerobt flotationsanlæg.

Initialt var det hensigten, at det floterede materiale skulle løbe over kanten i toppen og per gravitation løbe tilbage til biogasreaktoren. Under de første forsøg viste det sig dog, at mængderne af floteret materiale var så store, at det var nødvendigt med en aktiv transport. Da det floterede materiale skal recirkuleres til biogasreaktoren, blev det valgt at pumpe det væk, for dermed at overkomme overtrykket i biogasreaktoren. Da der stadig er gas i det floterede materiale, og da dette samtidig kan være meget tykt og partikelholdigt, blev det valgt at anvende en slangepumpe (fra LMS) til denne applikation.

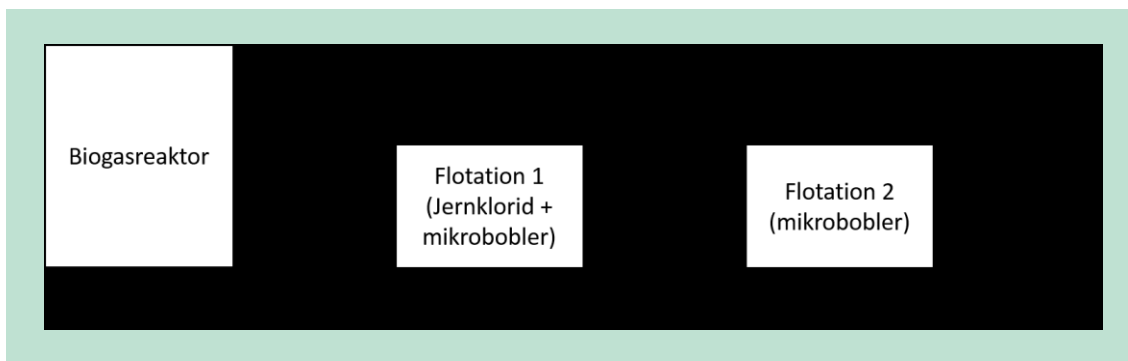
Det kegleformede anaerobe flotationsanlæg med slangepumpe fungerede efter hensigten. Der var dog fortsat betydelige mængder partikler i udløbet, hvilket indikerede en lidt lavere separationseffektivitet. På mange biogasanlæg tilsættes løbende jernklorid, som er en effektiv flokkulant. Det blev derfor testet, om dosering af jernklorid (almindelig dosering) umiddelbart inden indløbet til flotationsanlægget kunne forbedre separationseffektiviteten. Som konsekvens af trykfaldet over dysen og jernklorids betydning for pH i anlægget sker der en betydelig frigivelse af blandt andet CO₂. Denne CO₂ indløses dermed direkte i tanken og er medvirkende til en kraftig floterende effekt, som øges betragteligt ved tilsætning af jernklorid.

4.1.2.3 Dobbeltkammerflotation

Med udgangspunkt i erfaringerne fra det kegleformede flotationskammer og effekterne ved tilsætningen af jernklorid blev det besluttet at foretage en mindre justering af designet. Således er der nu konstrueret et anlæg, der består af to kamre: et første kammer, hvor der tilsættes mikrobobler og samtidig er mulighed for dosering af jernklorid, og et andet kammer, hvor der kun tilsættes mikrobobler. Væsken, der anvendes til mikrobobledannelse, udtages fra udløbet af det sidste kammer. Herved sikres en ren tilstrømning uden væsentlige partikler, der kan være ødelæggende for pumpen, der danner mikrobobler.



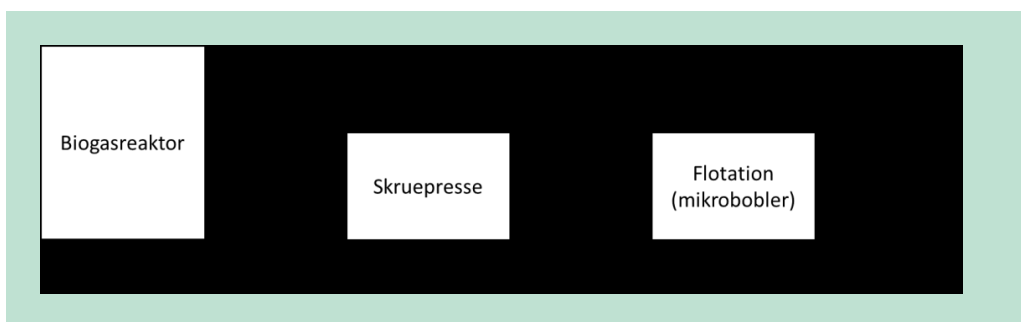
Billede 8 Implementering af det reviderede, kegleformede flotationsanlæg.



FIGUR 17. Oversigtstegning af dobbeltkammerflotation.

4.2 Skruepresse kombineret med flotation

Efter en længere testperiode med dobbeltkammerflotation blev det endnu en gang besluttet at modificere konceptet med henblik på at opnå en mere stabil proces. Således blev det første flotationskammer (se FIGUR 19) udskiftet med en specielt designet skruepresse. Ændringen resulterede i en langt mere stabil drift og at flotationen var mere effektiv (dvs. bedre separation af tørstof).



FIGUR 18. Oversigtstegning af skruepresse kombineret med flotation.

5. Fuldskalatest af GasBoosteren

I forbindelse med den endelige udvikling af det optimale anaerobe flotationsanlæg (se kapitel 4) har de forskellige flotationsprototyper været afprøvet i fuldskala ad flere gange. Der er således blevet gennemført adskillige test med forskellige konfigurationer af GasBoosteren. Flere af testene har dog kun været gennemført i kortere perioder, idet der har været problemer med at styre processen kontinuerligt.

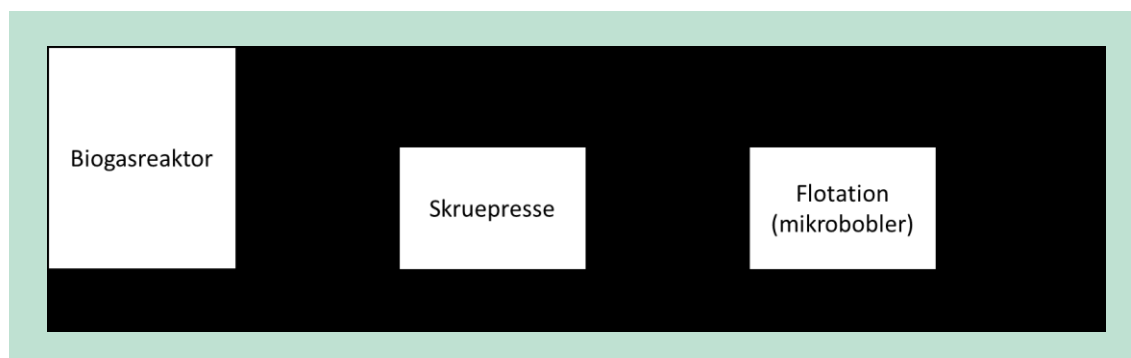
Den seneste udviklede designkonfiguration (skruepresse kombineret med flotation) af flotationsanlægget vurderes dog at kunne anvendes kontinuerligt uden for mange driftsproblemer. Kort tid efter implementeringen af denne designkonfiguration var der på grund af forkert dosering af en biomasse et længere driftsstop på biogasanlægget. For at kunne dokumentere effekten af GasBoosteren er det nødvendigt, at biogasanlægget har været i stabil drift i en længere periode. Således har det i projektperioden været nødvendigt at udskyde opstarten af fuldskalatesten flere gange, hvilket har reduceret længden af testperioden.

Fuldskalatesten er igangsat i den sidste måned af projektførløbet. Dataene fra den sidste testperiode præsenteres i det efterfølgende afsnit.

5.1 Testplan

Testene af dobbeltkammerflotationsanlægget blev påbegyndt i august 2017. Udover at sammenligne gasudbyttet i testperioden med udbyttet inden implementering, er der blevet udtaget en række prøver undervejs med henblik på at dokumentere effekten. En plan over prøvetagningssteder fremgår af FIGUR 20.

I den første del af testperioden blev der ikke tilført kildesorteret organisk affald til reaktoren, hvorimod der i den sidste periode blev tilført kildesorteret organisk affald. Reaktoren tilføres under hele forsøgsperioden en række affaldsstrømme fra fødevarerindustrier. Testen blev udført med henblik på at undersøge en eventuel indvirkning på tilbageholdelsesgraden af GasBoosteren.

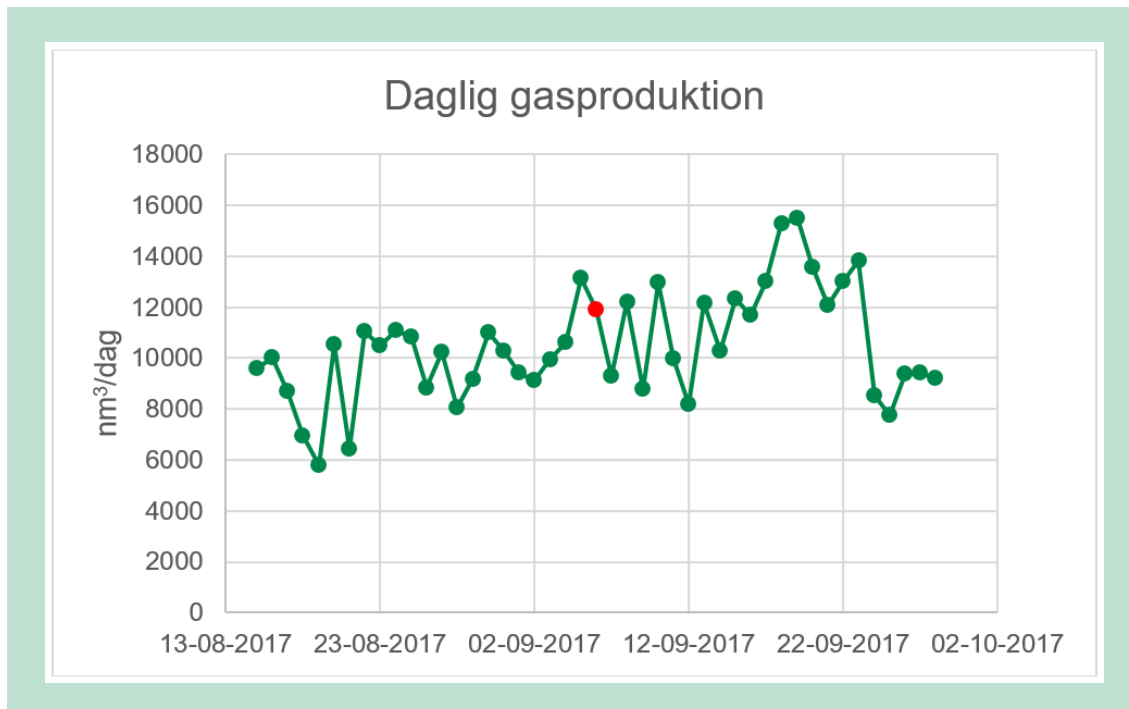


FIGUR 19. Oversigtstegning af dobbeltkammerflotation og prøvetagningssteder.

5.2 Resultater

5.2.1 Gasproduktion fra reaktoren

I testperioden er gasproduktionen løbende blevet monitoreret, se FIGUR 20. Som det fremgår af figuren er der store fluktuationer i gasproduktionen over tid, hvilket gør det meget vanskeligt at tilskrive GasBoosteren eventuelle ændringer.



FIGUR 20. Gasproduktion i testperioden. Den røde markering angiver tidspunktet, hvor doseringen af kildesorteret organisk affald er startet.

5.2.2 Separationseffektivitet

I Tabel 6 er tørstof (TS) vist for de udtagne prøver.

På baggrund af TS-målingerne samt de noterede flow fra forsøget er der opstillet en overordnet massebalance. Som udgangspunkt for opstillingen er det bl.a. antaget, at densiteten af alle prøver er den samme. Overordnet set stemmer massebalancen dog nogenlunde for både tørstof og VS. Af resultaterne fremgår det, at TS-indholdet i begge de recirkulerede prøver er forholdsvis høje (hhv. 20 % og 10 %). Endvidere observeres det, at TS- og VS-indholdet i fraktioner er forholdsvis stabile, hvilket indikerer, at tilsætningen af organisk affald ikke influerer på tilbageholdelsesgraden for GasBoosteren.

Tabel 6: Tørstof og askeindhold af udtagne prøver fra det sidste fuldskalaforsøg

| | 07-09-17 | 11-07-19 | 12-07-19 | 13-07-19 |
|------------------------------------|----------------------------------|-----------|------------------------------------|-----------|
| | Før tilførsel af organisk affald | | Efter tilførsel af organisk affald | |
| | % TS | | | |
| Ud Reaktor | 5,19 | 5,2 | 5,5 | 5,0 |
| Ret. Skrue. | 20,48 | 21,5 | 22,5 | 24,4 |
| Ret Flot. | 10,4 | 11,5 | 10,0 | 9,7 |
| Lagertank | 5,23 | 5,2 | 6,6 | 5,0 |
| | Kg TS/time | | | |
| Ud Reaktor | 415 | 417 | 438 | 402 |
| Ret. Skrue. | 15 | 16 | 17 | 18 |
| Ret Flot. | 104 | 115 | 100 | 97 |
| Lagertank | 311 | 306 | 394 | 300 |
| Tilbageholdelsesgraden (TS) | 29 | 31 | 27 | 29 |

Tilbageholdelsesgraden af fuldskalaløsningen er dog en anelse mindre ift. de to gennemførte pilotskalaforsøg. Det skal dog bemærkes, at tilbageholdelsesgraden er meget influeret af flovbestemmelserne, som er vanskeligt i denne skala, hvorfor resultaterne er forbundet med nogen usikkerhed.

5.2.3 Opsummering

I den sidste del af projektet er der testet en konfiguration af GasBoosteren, som over en længere periode har været driftsstabil. Forsøgene viser en tilbageholdelsesgrad på ca. 30 % af tørstoffet. I den sidste del af testperioden er der tilført reaktoren kildesorteret organisk affald, hvilket dog ikke har influeret på tilbageholdelsesgraden af tørstoffet.

GasBoosteren

Der er ofte et væsentligt gaspotentiale tilbage i den afgassede biomasse, der ikke udnyttes, idet der ikke eksisterer en teknologi, som billigt og effektivt kan fremme en højere gasdannelse. I dette MUDP projekt er der udviklet og testet et nyudviklet koncept (GasBoosteren), der består af et ATEX godkendt flotationskammer, og muliggør udnyttelsen af hele biomassens energipotential gennem tilbageholdelse i reaktoren, indtil den omsættelige fraktion er omsat anaerobt. Endvidere boostes effektiviteten af biogasanlægget, idet de gavnlige bakterier tilbageholdes i processen, og ikke som nu følger det afgassede materiale ud af systemet. Pilotskalaforsøgene viste, at flotationstrinnet kunne recirkulere 57 % af tørstofindholdet, hvilket svarer til 36 % af restmetanpotentialet i den udgående biomasse. De gennemførte tests viste en merproduktion af biogas på min. 4 % pr. m³ biomasse. Restmetanpotentialet var dog relativt lavt sammenlignet med andre gyllebaserede biogasreaktorer og det forventes derfor at merudbyttet vil være højere for reaktorer med en højere organisk belastning og kortere opholdstid end anvend i forsøget. Fordelen ved GasBoosteren er at det er muligt at øge belastningen i en reaktor fx, med kildesorteret organisk dagrenovation, uden at tørstofindholdet i den udgående biomasse øges, hvilket vil kunne 'booste' biogasudbyttet fra eksisterende biogasanlæg. Tilbagebetalingstiden er beregnet til at være ca. 1 år om end der er nogen usikkerhed forbundet med disse som bl.a. driften og typen af biogasanlægget.



Miljøstyrelsen
Haraldsgade 53
2100 København Ø

www.mst.dk