

BIOMASSE FORBEHANDLING OG OPTIMERING

Energi- og omkostningsoptimering af bionaturgasproduktion
EUDP j.nr. 64018-0512

HENRIK B. MØLLER, LU FENG, CRISTIANE ROMIO, JACOB ROSHOLM MORTENSEN, FEBRUAR 2021



AARHUS
UNIVERSITET



Indhold

Forord	3
Sammendrag og konklusioner	3
Baggrund	5
1.1 Aktiviteter	5
1.2 Kortlægning af tilgængelige forbehandlingsmetoder	6
1.2.1 Hammermølle neddeling (Hüningen)	6
1.2.2 Ekstrudering.....	7
1.2.3 Brikettering.....	8
1.2.4 Overblik over tidligere rapporterede neddelingsmetoder.....	8
1.2.5 Andre forbehandlingsstrategier	9
2. Undersøgte forbehandlingsmetoder og biomasser	10
2.1 Grinding og NH ₃ behandling	10
2.1.1 N-steaming	18
2.2 Selektiv opholdstid (Genudrødning af fiber)	22
2.3 Biogrinder BHS.....	27
2.4 Disruptor.....	31
2.5 Ultralyd	36
Litteratur.....	39

Forord

Denne rapport er udarbejdet i projektet "Energi- og Omkostningsoptimering af Bionaturgasproduktion", EUDP jr. nr. 64018-0512. De deltagende parter er Dansk Gasteknisk Center a/s (projektleder), PlanEnergi, Aarhus Universitet, Biogas Danmark, Evida og Dansk Fagcenter for Biogas.

Projektets formål er at foreslå tiltag, der kan forøge indtægter og at reducere omkostninger til produktion af opgraderet biogas, samt foreslå tiltag, der kan reducere klimabelastningen.

Projektet er delvis finansieret af det Energiteknologiske Udviklings- og Demonstrationsprogram (EUDP), der er en offentlig tilskudsordning. Ordningen støtter ny teknologi på energiområdet, som kan bidrage til at indfri Danmarks målsætninger inden for energi og klima. Projektet startede i januar 2019 og afsluttes i september 2020.

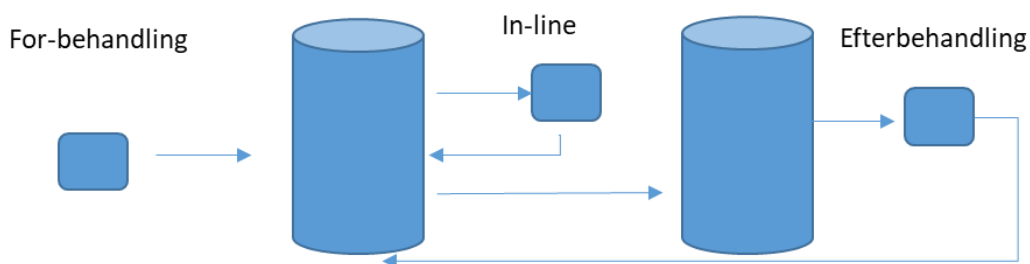
Denne rapport er resultatet af arbejds pakken AP 4 – Biomasse forbehandling og optimering og er udarbejdet af Henrik B. Møller, Aarhus Universitet og Jacob Rosholm Mortensen, PlanEnergi.

Henrik B. Møller, Lu Feng og Cristiane Romio har været ansvarlig for gennemførelse og beskrivelse af de udførte test medens Jacob Rosholm Mortensen, PlanEnergi har været ansvarlig for udarbejdelse af kapitel 1.2 Kortlægning af tilgængelige forbehandlingsmetoder.

Sammendrag og konklusioner

Biomasse forbehandling er en metode til at øge gasudbyttet fra biomassen. Den traditionelle forbehandling dækker over teknologier der behandler biomasse inden det tilføres biogas processen med henblik på at øge gasudbyttet eller muliggøre anvendelsen af biomasser, der vanskeligt kan anvendes i en traditionel biogas proces. Udtrykket "forbehandling" kan imidlertid anvendes i en bredere forstand ved at inkludere teknologier, der senere i processen kan anvendes til at øge gasudbyttet og/eller sænke viskositeten i reaktoren således, at der kan behandles en større mængde af vanskeligt håndterbar biomasse som halm og dybstrøelse. "Forbehandling" dækker således over en række teknologier hvoraf flere af metoderne ikke er placeret før selve tilsætningen til biogasreaktoren.

I nedenstående figur fremgår placeringen af de forskellige teknologier opdelt i forbehandling, in-line og efterbehandling.



Figur 1 Principskitse

I projektet er der undersøgt en række forbehandlingsteknologier, herunder 2 typer grinding (AST og BHS), 2 typer selektiv opholdstid, Disruptor og ultralyd. Disruptor teknologien er udviklet og markedsføres af Vogelsang. Disruptoren sikrer en kraftig mekanisk neddeling og monteres på et recirkulerings loop på en reaktor og tager en delstrøm ud der udsættes for en kraftig neddeling, hvorved viskositeten kan sænkes og gasudbyttet øges.

AST-systemet til biomassebehandling består af flere trin. I første trin neddeles biomassen i en Seko neddelers og føres via fødekasse til grunderen. I grunderen sker der en kraftig mekanisk forbehandling der giver en biomasse der er nem at håndtere med et højt gasudbytte. Anlægget kører i dag som en ydelse, hvor en entreprenør ejer og driver udstyret centralt. Entreprenøren behandler og leverer forbeholdt biomasse til forskellige biogasanlæg.

Selektiv opholdstid fungerer ved at opholdstiden af tungt nedbrydeligt organisk stof øges i forhold til den hydrauliske opholdstid. Metoden fungerer i praksis ved separation og recirkulering af fiberfraktionen hvorved opholdstiden af den tungtomsættelige del af biomassen forlænges. Separation og recirkulering af fiberfraktionen kan enten udføres i et åbent system med skruepresse eller ved en teknologi hvor fiberen recirkuleres i en lukket system.

Ved ultralyds teknologien sker der en disintegration af organisk materiale ved omdannelse af elektriske svingninger til mekaniske vibrationer. Disse vibrationer overføres til det omgivende medium ved hjælp af en sonotrode. Ultralydsfrekvensen forårsager høje positive og negative trykfaser. Denne proces kaldes kavitation og processen får de omkringliggende mikroorganismer og fibre til at disintegrere. Den afprøvede teknologi er udviklet af det Tyske firma Weber Entech. Ultralydsteknologien er testet i sidste del af projektet og det har ikke været muligt at udføre detaljerede økonomiske beregninger på denne teknologi. Forsøgene med ultralyd har givet nogle lovende resultater i form af forøget gasudbytte og reduceret viskositet. Forsøgsdata har således vist at gasudbyttet at halm kan øges med 13% og der vil blive udført yderligere forsøg for at bekræfte dette.

I tabel 1 er nøgletal for udvalgte teknologier beregnet. Der er udvalgt 4 teknologier der dækker forbehandling. Forbehandling i form af biogrinder og AST vil kun have en effekt på den faste biomasse der tilføres anlægget, medens selektiv opholdstid og Disruptor har effekt på den samlede mængde biomasse der behandles.

Tabel 1 Nøgletal for udvalgte teknologier.

Teknologi	Enhed	Selektiv opholdstid ²	Disruptor	Biogrinder	AST
Behandlingstype		Efterbehandling	In-line	Forbehandling	Forbehandling
Biomasse		100%	100%	Fast	Fast
Samlede omkostninger	kr/ton	4,65	2,66	28,46	55
Ekstra gasudbytte	Nm ³ CH ₄ /ton	2,30	0,55	7,00	15
Samlet besparelse ¹	kr/ton	-9,15	-0,64	-13,54	-23
Produktions pris ekstra metan	kr/m ³ CH ₄	2,26	4,83	4,07	4,23

¹Samlet besparelse er beregnet som værdi af ekstra gas med en værdi på 6 kr/m³ CH₄ fratrukket CAPEX og OPEX.

²Gennemsnit for 2 typer anlæg til genudråkning af fiber.

Det fremgår af tabel 1, at alle teknologier giver en besparelse når der forudsættes en metan pris på 6 kr/m³. Prisen for at producere en ekstra m³ metan spænder fra 2,3 til 4,8 kr/m³ CH₄ og hvis et

biogasanlæg behandler råvarer, der har en højere råvarepris end disse priser vil det være økonomisk fordelagtigt at fortrænge de dyreste råvarer og anvende forbehandling i stedet. Det vurderes at resultaterne fra de enkelte teknologier i et vist omfang kan adderes. Det forventes således at disruptoren vil have den beregnede effekt selv om der er installeret en biogrinder eller et AST anlæg. Til gengæld vil det ikke give effekt at have 2 traditionelle forbehandlinger som Biogrinder og AST sammen.

Selektiv opholdstid forventes ligeledes at have den beregnede effekt, selv om der er installeret forbehandling i form af disruptor og Biogrinder eller AST.

Baggrund

Arbejdspakken skal medvirke til at indsamle den nyeste viden om forbehandling og indsamle data om forskellige teknologier. De mest lovende teknologier vil blive undersøgt i detaljer, og der vil blive udført test med 5 forskellige anlæg og forskellige biomasser, hvor der vil blive indsamlet data om energiforbrug, driftsomkostninger og investering. Der vil blive udtager prøver før og efter forbehandling, som vil blive analyseret for gasudbytte i laboratorie-forsøg.

Arbejdspakkens formål er:

- Foreslå tiltag til biomasseforbehandling, der kan forøge biogasudbyttet i biogasproduktionen ved omkostningseffektive metoder.
- Foreslå tiltag til at optimere biomasseforbehandling.

1.1 Aktiviteter

Der er gennemført en række aktiviteter i projektet.

1. Kortlægning af tilgængelige forbehandlingsmetoder, inkl. overslag over CAPEX, OPEX og forøget gasudbytte på baggrund af litteratur, artikler m.v.
2. Test af 5 lovende biomasseforbehandlingsmetoder til detaljering.
3. Test og prøveindsamling fra 5 forbehandlingsanlæg til undersøgelse af effekt på gaspotentiale
4. Dataindsamling på anlæg i kommerciel drift og demonstrationsanlæg.
5. Behandling af data og detaljerede beregninger af CAPEX, OPEX, energiforbrug og forøget biogasudbytte.

1.2 Kortlægning af tilgængelige forbehandlingsmetoder

I de kommende afsnit er præsenteret forskellige forbehandlingsmetoder til faste biomasser med varierende tørstofindhold, såsom halm (højt tørstofindhold) og dybstrøelse (lavt til middel tørstofindhold). Forbehandlingsmetoderne omhandler primært neddeling (fx snitning, ekstrudering og brikettering mm.) da disse nemt kan implementeres på biogasanlæg. Fordelen ved neddeling er reduktionen af flydelag i reaktoren samt større overfladeareal af biomassen. Både reduceret flydelag og større overfladeareal sikrer bedre kontakt mellem biomasse og mikroorganismer, og sikrer dermed at biomassen omsættes til biogas.

1.2.1 Hammermølle neddeling (Hüningen)



Figur 2 Hüningen hammermølle ved Thorsø Miljø- og Biogasanlæg a.m.b.a

Faste biomasser tilføres en container før de doseres til hammermøllen. Containeren har et "bevægeligt gulv", som transporterer biomassen til en snegl. For enden af containeren er der en opriver, der doserer materialet til et sneglesystem, der transporterer biomassen videre til hammermøllen. Containeren fyldes manuelt med en teleskoplæsser eller der aflæsses direkte deri. Tidligere forsøg har vist at der har været en stor udfordring med at behandle halm (Biogas Taskforce, 2015).

Forbruget af el er tidligere blevet kortlagt til 7.053 kWh pr. måned, hvor hammermøllen står for ca. 58 % af forbruget. Elforbruget hos Thorsø Biogas er kortlagt til ca. 12 kWh/ton. Behandling af dybstrøelse er kortlagt til 8 kr/ton, mens behandling af ren halm er kortlagt til 69 kr/ton – dette er i rent elforbrug, og ikke slitage (Energistyrelsens Biogas Taskforce, 2016). Slitagen udgør ca. 1700 kr. pr. måned.

Gevinsten ved anvendelse er rapporteret til maksimalt 18 % efter 12 dage. Efter 20 dage er gevinsten reduceret til 6 %, og der er derfor begrænset gevinst for anlæg med over 20 dages opholdstid. Teknologien kan imidlertid være nødvendig for at behandle dybstrøelse og halmrige biomasser.

1.2.2 Ekstrudering



Figur 3 Ekstruder ved Forskningscenteret AU Foulum

Ved AU Foulums biogasforsøgsanlæg, er der etableret et forbehandlings- og indfødningssanlæg. Materialet tilføres biomikseren (venstre del). Efter opblanding føres biomassen til ekstruderen via transportbånd, hvor den behandles. Ved hjælp af to snegle presses biomassen sammen under højt tryk. Friktionen i ekstruderen gør, at biomassen også varmebehandles. Når biomassen forlader maskinen, lettes trykket pludseligt, hvilket medvirker til at sprænge plantecellerne. Biomassen 'åbnes' således og får en større overflade, og modvirker flydelag yderst effektivt. Det gør også at reaktoren kan belastes yderligere, så længe de tekniske specifikationer (fx omrøring) kan holde til højere tørstofindhold.

El forbruget for systemet er ca. 20-120 kWh pr. ton afhængigt af hvilken type biomasse der anvendes. Der er typisk en sammenhæng mellem det anvendte forbrug og tørstofindholdet. Jo højere tørstofindhold, jo mere strøm skal der anvendes. Vedligeholdelse af ekstruderen er rapporteret til ca. 20 kr/ton biomasse, baseret på ca. 2 års drift hos AU Foulum (Energistyrelsens Biogas Taskforce, 2016).

Gevinsten der vindes ved ekstrudering ligger ml. 1-27% ekstra metan afhængigt af opholdstid. For opholdstider ml. 20-30 dage er der rapporteret 15-27% ekstra metan. Langtidsudrådninger (> 60 dage) vinder ca. 1-10% ekstra metan ift. ubehandlet materiale.

Investeringen ved ekstruderen ved AU Foulum er ca. 1.3 mio. DKK.

1.2.3 Brikettering



Figur 4 Briketteringsanlæg hos Forskningscenter AU Foulum

Briketterings anlægget hos AU Foulum består primært af en hammermølle til neddeling med efterfølgende briketpresse fra CF Nielsen A/S. Konfigurationen i Foulum har en kapacitet på 0,9 – 1,4 tons/time med briketter på 75mm i diameter. Briketterings teknologien er udviklet af CF Nielsen, og består af en mekanisk induceret damp eksplosionsmotor (55 kW) med gentagen kompression-dekompression cyklusser ved tryk mellem 1.500 og 2.000 bar og ved atmosfærisk.

Forbruget ved briketteringsanlægget ligger på omk. 118-135 kWh/ton, og afhænger af typen af hammermølle der anvendes til neddeling. Brikettering i sig selv anvender ca. 84,3 kWh/ton. Gevinsten ved neddeling og brikettering er gennem forsøg målt til ca. 10% ved en udrådningstid på 20-30 dage. Ved tilsætning af lud under brikettering kan der udvindes op til 20% mere metan. Dette gælder kun for korte opholdstider, hvor merudbyttet ved lange opholdstider er begrænset. AU Foulum har dog lavet forsøg med halmbriketter, hvor op til 14% tørstof i reaktoren (høj tank) blev opnået uden dannelse af flydelag. Forsøgene viste at tilførsel af halmbriketter kunne fordoble gasproduktionen ift. ren gylle. Briketteringsanlæg har en investering på 10. mill. DKK.

1.2.4 Overblik over tidligere rapporterede neddelingsmetoder

Den faglige rapport som foreligger fra Energistyrelsen Biogas Taskforce fra 2016 vurderer neddelingsmetoderne ift. synkeevne, energiforbrug, gasudbytte samt vurdering af økonomi. Resultatet fra 2016 vurderede macerering til at have lavest effekt, hvor brikettering + ludbehandling havde størst effekt på synkeevnen. Energiforbruget lå ml. 70-150 kWh/ton for halm og 9-23 kWh/ton for dybstrøelse. Ift. gasproduktionen blev det konkluderet, at ekstrudering havde effekt på anlæg med kort opholdstid (< 25 dage) og disse kunne forvente en mulig gevinst på 15% ekstra gas. Ved lang opholdstid (> 40 dage) kunne der ikke opnås en gevinst. Biogas taskforcen vurderede yderligere, at den økonomiske gevinst i halm var ml. 266-590 kr/ton afhængig af opholdstid, og 128-179 kr/ton for dybstrøelse med kort opholdstid. Der var ingen yderligere gevinst ved forbehandling af dybstrøelse ved lang opholdstid udover håndteringsmæssige

gevinster. For yderligere information om ovenstående neddelingsstrategier henvises til den nævnte faglige rapport, og disse metoder er derfor ikke yderligere beskrevet i denne rapport.

I stedet undersøges nye implementerede kommercielle neddelingsstrategier, herunder Grinding og NH_3 fra Advanced Substrate Technology (AST) A/S og en Biogrinder fra BHS placeret ved Rybjerg. Der laves desuden forsøg på AU Foulum med en DisRuptor fra Vogelsang. Disse metoder er grundigt beskrevet med tilhørende resultater i kapitel 2.

1.2.5 Andre forbehandlingsstrategier

Ensilering

Ensilering er en semi-kontrolleret mikrobiologisk proces, hvor biomasse tildækkes og sammensluttes med en membran, så atmosfærisk ilt ikke kan tilgå biomassen. Efterhånden som ilten opbruges forbedres vilkårene for mælkesyrebakterier, og mælkesyre dannes derfor over tid i processen. Resultatet af dette er en sænkning i pH så biomassen konserveres og undgår omsætning. Omsætning sænker udbyttet af biomassen når den føres til biogasanlægget, da der er mindre materiale for bakterierne i biogasanlægget at udnytte til dannelsen af biogas. Ensilering er desuden en effektiv måde at opbevare sine råvarer, og er også relevant ift. nye biomasser.

Kemisk forbehandling

Kemisk forbehandling har gennem studier vist at være effektiv til at nedbryde plantecelle-netværket og kan potentielt give en øget gasproduktion. De mest studerede kemiske forbehandlingsstrategier er kraftig syrebehandling (enten ved brug af salt- eller svovlsyre), ludbehandling (natron- eller kalilud) samt ammoniakbehandling. Der er en del udfordringer med kemiske forbehandlinger. Nogle udfordringer omhandler bl.a. 1) Kemien skal i kontakt med biomassen, og kræver derfor ofte en neddeling først for at øge overfladearealet. 2) Der skal udvikles teknologier så kemikalierne kan genanvendes, og disse teknologier er på nuværende tidspunkt ikke udviklede til formålet i storskala. 3) Der er ikke udført studier med kemisk behandling i fuldskala, og selve håndteringen af store mængder kemikalier er en stor udfordring og kræver specielle sikkerhedsforanstaltninger.

Ultralydsbehandling

Ultralyd er kendt som effektiv til at nedbryde bakteriecellevægge. Gennem de sidste 10 år har der været forsket i ultralydsbehandling, især af slam på spildevandsanlæg for at øge mængde af organisk materiale der udrådnes samtidig med at biogasproduktionen øges på renseanlæggene. Data fra Pérez-Elvira et. al (2009) viser en mulig forøgelse af gasproduktionen på 37% i kontinuerlige 100L reaktorer. Desuden viser data at samme gasproduktion opnås fra sonikeret slam ved en opholdstid på 15 dage, sammenlignet med ubehandlet slam ved 20 dages opholdstid.

Ultralydsbehandling er derfor en potentiel forbehandlingsteknologi, som kræves undersøgt i større skala. Denne er mere dybdegående beskrevet i kapitel 2.

2. Undersøgte forbehandlingsmetoder og biomasser

Der er udvalgt forskellige forbehandlingsmetoder. Følgende metoder er blevet analyseret nærmere:

1. Grinding og NH₃ behandling – AST
2. Selektiv opholdstid (Genudråkning af fiber) – Brdr. Madsen/Rybjerg
3. Bio grinder BHS – Rybjerg
4. Disruptor
5. Ultralyd

Der er udført en række forsøg med de udvalgte teknologier.

2.1 Grinding og NH₃ behandling

Der er gennemført en række undersøgelser af forbehandling af halm og andre tungt omsættelige biomasser ved forbehandling med AST systemet som en del af regional midt projektet "fremtidens biogas".

Forbehandlingen er foretaget ved mekanisk neddeling med "grinder" og ammoniak forbehandling i N-steamer. I projektet er der udviklet og afprøvet et nyt mobilt mekanisk forbehandlingssystem bestående af en neddeler og grinder, der over en 13 måneders drifts periode har behandlet over 13.000 tons biomasse, der løbende er leveret til biogasanlæg. Det samlede elforbrug til processen har været ca. 40 kwh/tons for hele processen og de samlede omkostninger har været 47 kr/tons tørstof. I driftsperioden er der ligeledes udført kontrollerede forsøg med energiforbrug og effekt på gasudbyttet ved grinding. Grinding har vist positiv effekt på de testede biomasser på 3-13% ved en opholdstid på 90 dage og har samtidig en positiv effekt på hastigheden hvormed gassen bliver produceret.

AST-systemet til biomassebehandling er opdelt i forskellige dele. I den første del transporteres biomassen til en Seko neddeler og mixer med to skruer, der opblander og neddeler biomassen. Derefter føres biomassen til en anden enhed gennem et transportbånd (figur 4), hvor sten, metal og lignende sorteres fra. Endelig går biomassen via fødekasse til grunderen (figur 5) hvor biomassen under tryk maceres, neddeles og åbnes for sluttelig med transportbånd at blive læsset direkte uden yderligere håndtering i walking floor containere - klar til levering og direkte indfødnings i biogasanlæg.



Figur 5 *Neddeling og tilførsel af biomasse*



Figur 6 *Grinder*

Der er gennemført en række test på forskellige lokaliteter i hhv. Skanderborg, Gram og på AU-Foulum.

Forsøg i Skanderborg

Tre typer biomasse blev testet. De testede biomasser var hvedehalm, elefantgræs (*Miscanthus*) og tækkerør. Både elefantgræs og tækkerør blev oplagret i 1 - 3 uger før de blev forbehandlet. Yderligere frisk græs blev høstet fra en gård tæt på Skanderborg for at kunne bruges til sam-ensilering. Alle biomasser blev neddelte og blandet og forbehandlet i Seco'en til en størrelse på 2-3 cm i længden, medens en delmængde blev formalet yderligere med Grinder.



(a) Hvedehalm

(b) *Miscanthus*

(c) Tækkerør

Figur 7 Biomasse før og efter grinding (Venstre: neddelt, Højre: Neddelt og grinded)

Efter forbehandling blev alle prøver opsamlet og opbevaret ved AU Foulum ved -18 °C før biogas test og yderligere analyser. Tabel 1 viser de vigtigste egenskaber ved de undersøgte substrater. Processen med grinding påvirkede primært hemicellulose med forholdsvis små ændringer af de øvrige fraktioner.

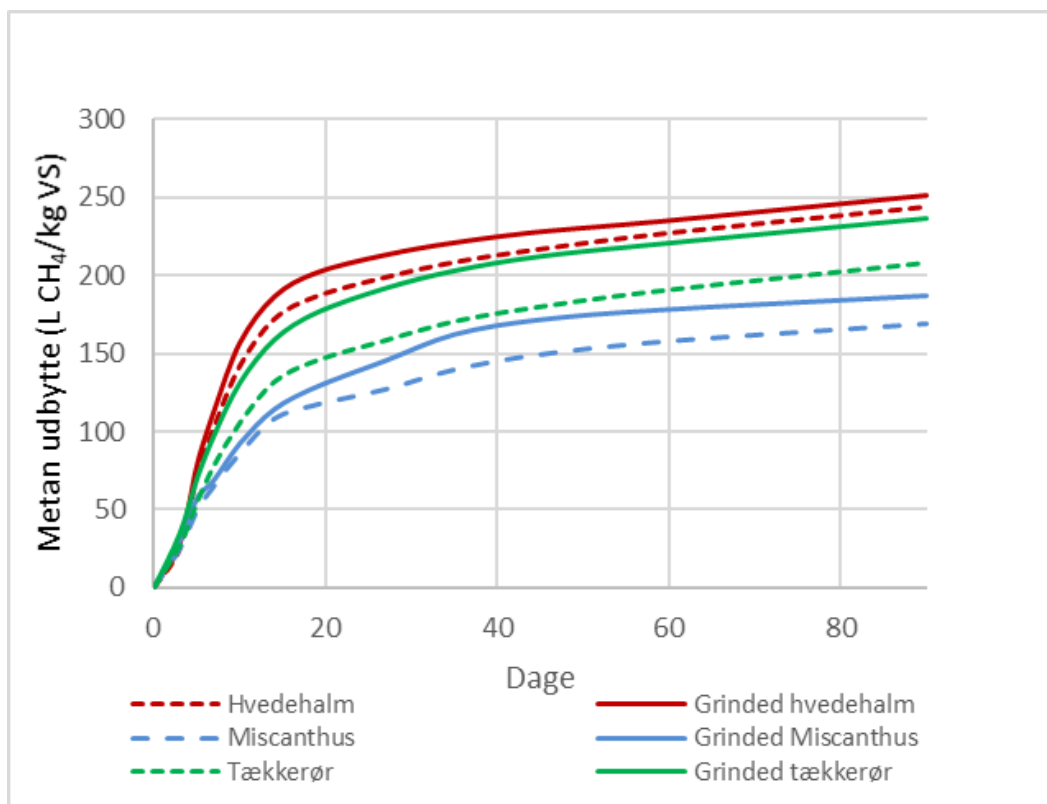
Tabel 1 Karakteristika for substrater i forsøget i Skanderborg

Substrat	TS %	VS %	Fiber sammensætning		
			Cellulose (%)	Hemicellulose (%)	Lignin (%)
Hvede halm	69.05	65.04	44.16	29.99	5.41
Grinded	67.67	63.02	41.38	27.50	5.07
Miscanthus	50.26	47.58	45.21	26.02	10.89
Grinded	50.26	47.43	48.13	23.65	11.01
Tækkerør	62.61	55.41	37.73	22.21	9.28
Grinded	62.51	55.28	34.74	18.80	7.91
Frisk græs*	19.10	15.71	--	--	--

* Anvendt som substrat til co-ensilering

Metan udbytter

Der er udført biogas batch-test ved termofil temperatur (51 °C) i 90 dage. Det akkumulerede metan udbyttet fra neddelt og grinded biomasse er illustreret i figur 8.



Figur 8 CH_4 udbytte af neddelt og grinded hvedehalm, miscanthus og tækkerør.

Der var en positiv effekt af grinding i alle forsøg. Grinding resulterede i hhv. 3; 10 og 13% højere metanudbytte efter 90 dage sammenlignet med biomasse der udelukkende var neddelt. Et andet interessant forhold - gældende for alle 3 biomasser – er at gassen kommer hurtigere. Det vil sige at man kan opnå samme gasproduktion på kortere tid og dermed øge et given biogasanlægs kapacitet med op til 50% på samme reaktor volumen med de givne biomasser.

Forsøg i Gram

Der blev udført et kontrolleret forsøg på anlægget i Gram med henblik på at udregne energiforbruget. Følgende biomasser blev behandlet og energiforbruget registreret:

- 6 ton of hestegødning
- 13 ton blandet hestegødning og halm
- 1,15 ton hvedehalm



(a) Heste gødning

(b) Blandet hestegødning og halm

(c) Hvedehalm

Figur 9 Biomasse før (venstre) og efter grinding (højre)

Indholdet af tørstof og organisk tørstof før og efter grinding er vist i tabel 2.

Tabel 2 TS og VS i hestegødning, halm og blanding af hestegødning og halm

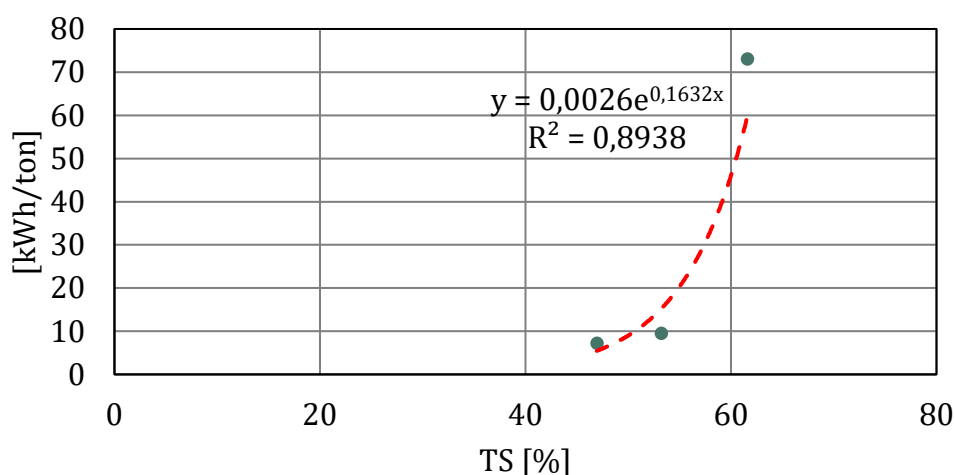
Biomasse	Mængde [ton]	Neddelt		Grinded	
		TS [%]	VS [%]	TS [%]	VS [%]
Heste gødning	6	44.39	38.49	46.94	36.77
Hestegødning + halm	13	49.6	43.3	53.22	45.97
Halm	1.15	73.86	68.36	61.58	54.87

Energiforbruget til behandling af hver type biomasse er vist i tabel 3. Energiforbruget til behandling af halm var 5 gange større end det, der kræves til hestegødning.

Tabel 3 Energiforbrug

Biomasse	Mængde [ton]	Tidsforbrug [h:min]	Energi [kWh]	Energi [kWh/ton]	Energi [kWh/Tons TS]
Heste gødning	6	1:35	43	7.17	16.14
Heste gødning og halm	13	2:22	123	9.46	19.08
Halm	1.15	2:00	84	73.04	98.89

I figur 10 er energiforbruget ved forskellige tørstof procenter vist. Det fremgår at så længe tørstofprocenten er under 55% er energiforbruget under 10 KWh/ton medens det stiger kraftigt når tørstofprocenten øges.



Figur 10 Energi forbrug vs tørstof [%].

AST har leveret neddelte og grindet biomasse til Bevtoft Biogas over en 13 måneders periode (august 2018 - august 2019).

De anvendte biomasser var komprimeret (vådt) halm i bigballer, wrap baller, hestemøg, havreskalmel, gulerodshalm og græs. Den relativ store variation i VS af TS – 72,4% i juli 2019 og 92,0% i september 2018 – skyldes miks af biomasser og andel af biomasser, der har ligget på "lager" og "tabt" en del af det let omsættelige tørstof.

Tabel 4 Biomasse levering til Bevtoft Biogas

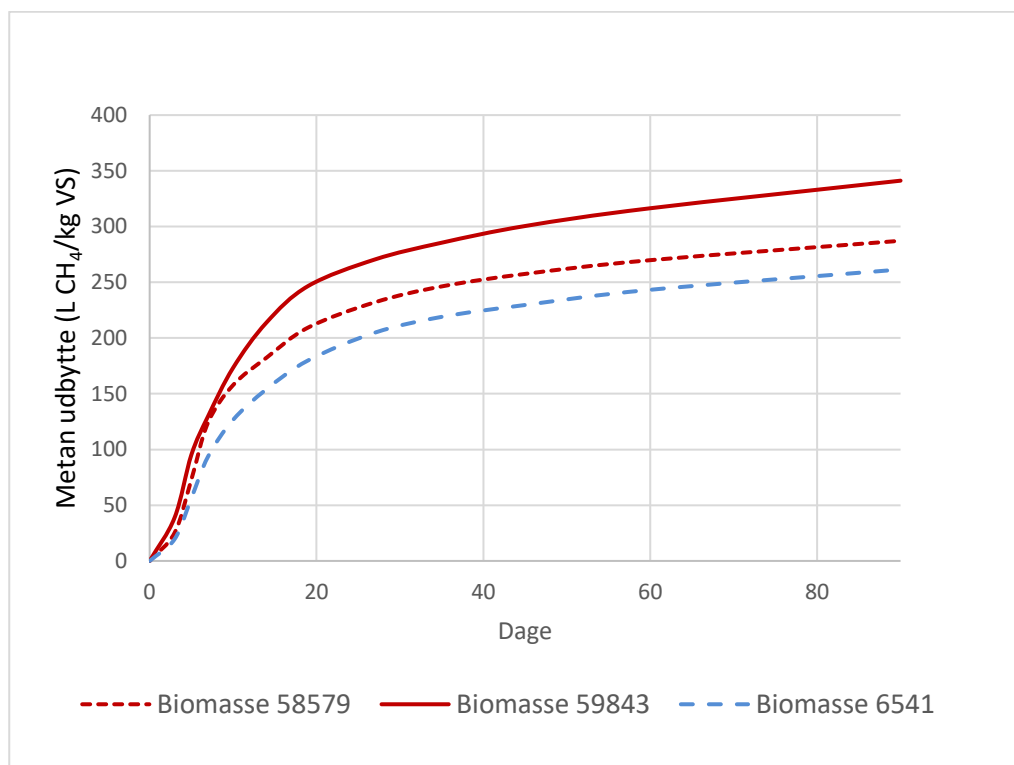
2018 - 2019							
		Ton	TS	Tons TS	VS af TS	Ton VS	Rest kontrakt
7	2018 Juli	18,9	90,0%	17,0	95,0%	16,1	7.983
8	August	685,2	62,5%	428,0	88,8%	380,0	7.555
9	September	128,3	77,5%	99,5	92,0%	91,5	7.456
10	Oktober	755,4	72,4%	546,8	86,9%	475,3	6.909
11	November	809,7	65,9%	533,9	89,6%	478,4	6.375
12	December	1353,8	51,9%	702,2	82,7%	580,7	5.673
1	2019 Januar	1842,2	47,5%	874,9	76,3%	667,8	4.798
2	Februar	1319,1	54,5%	719,0	81,5%	586,0	4.079
3	Marts	1313,0	54,9%	720,8	80,3%	578,7	3.358
4	April	1087,0	56,5%	614,0	79,3%	486,9	2.744
5	Maj	1304,8	56,5%	736,8	81,0%	596,7	2.007
6	Juni	919,0	59,8%	549,7	79,6%	437,5	1.458
7	Juli	915,1	64,6%	591,4	72,4%	427,9	866
8	August	1398,2	62,0%	867,3	83,8%	726,7	-1
I alt		13849,6	57,8%	8001,2	81,6%	6530,2	
Kontraktsmængde		8000 Tons					

Der blev gennemført udrådningforsøg løbende af Bevtoft Biogas med anvendelse af inokulum fra deres anlæg og med en andel på tørstof basis, der svarer til den andel som det grindede biomasse udgjorde af

den samlede mængde tilført biomasse. Parallelt er der udført udrådningforsøg på AU-Foulum med inokulum fra deres anlæg og med grinded biomasse svarende til 50% på tørstofbasis.

Resultaterne af testene (GVS-40) varierede meget (242 til 282 for AU-Foulum og 284 til 323 for Bevtøft Biogas). Gennemsnittet for testene gav 288 m³ metan pr ton VS (40 dage)

Til anskueliggørelse af gasudviklingen over tid er resultaterne fra test på AU-Foulum vist i figur 11.



Figur 11 CH₄ udbytter og udvikling over tid målt af AU-Foulum

Ved leverancens afslutning blev der gjort status og opnået enighed om et GVS – 40 niveau på 275 – 295 m³ metan pr ton VS svarende til en samlet gasproduktion på 1,8 – 1,9 mio m³ metan eller 130 – 140 m³ metan pr ton leveret.

Fuldskala forsøgene viser at gassen kommer hurtigere. Der kan nås samme gasniveau på 25 dage ved grinded biomasse som på 40-50 dage på ubehandlet biomasse (se figur 4).

Økonomi

Den samlede økonomi i neddeling og grinding afhænger af:

1. Værdi af den grindede biomasse
2. Omkostninger til biomasser
3. Transport af biomasser og grindet biomasse

4. Omkostninger til el, diesel mm
5. Reparation og vedligehold
6. Bemanding og øvrig drift
7. Forrentning og afskrivning

Ad. 1: Værdi af den grindede biomasse leveret på biogasanlæg kan estimeres ud fra værdien af de alternative biomasser, som biogasanlæggene kan erstatte med grindet biomasse. Det kan være et miks af majsensilage – på grund af begrænsninger – og importeret glycerin – på grund af pris – eller mere direkte mangel på let håndterbare biomasser med interessante gaspotentialer.

Med ovennævnte som udgangspunkt er en værdi på 3,50 – 4,00 kr pr m³ metan realistisk ~ 450 til 550 kr pr ton grindet biomasse eller 800 til 1000 kr pr ton TS.

Ad. 2: Omkostninger til biomasse vil variere over året og være afhængig af flere forhold. Nogle biomasser har reelt negativ eller meget lav værdi – hestemøg, gulerodshalm og våd halm – andre kan have en markedspris på grund af alternative anvendelsesmuligheder – havreskalmel eksempelvis.

Ad. 3 Omkostninger til transport af biomasser afhænger primært af afstand og mængde pr træk. Det afgørende er at det der transporteres har reel værdi. Erfaringer fra Gram viser, at der kan transporteres + 32 tons med 55% TS i en 90 m³ walking floor trailer. En transport med sammenlagt 100 km kørsel, tid til læsning, vejning og aflæsning koster ca 1900 kr eller 60 kr/ton.

Ad. 4 Omkostninger til energi – el og diesel - til drift af anlæg i produktion blev i Gram registreret over en 4 måneders periode (feb-maj 2019) med de i tabel 5 viste resultater.

Tabel 5 Registreret energiforbrug – el og diesel

Dokumentation for forbrug og produktion		Neddeler og grinder - Gram																Periode: Feb-Maj 2019		
Specifikation	Uge	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	Total
Produktion	Ton	0	389	379	291	324	308	257	326	366	374	338	27	255	309	294	277	295	254	5065
El-forbrug	KWh	0	4390	3763	3168	2963	3360	3433	3353	2616	3429	3560	0	2103	3025	2528	2353	1481	1913	47438
Diesel til tractorer	liter	0	840	555	720	650	700	610	990	573	748	1192	0	705	964	795	723	835	708	12308
Diesel til læsser	liter	0	309	247	130	110	250	270	245	116	117	238	0	114	217	217	110	216	136	3042
El	KWh/ton	0,0	11,3	9,9	10,9	9,1	10,9	13,3	10,3	7,1	9,2	10,5	0,0	8,2	9,8	8,6	8,5	5,0	7,5	9,4
Diesel til tractorer	Liter/ton	0,0	2,2	1,5	2,5	2,0	2,3	2,4	3,0	1,6	2,0	3,5	0,0	2,8	3,1	2,7	2,6	2,8	2,8	2,4
Diesel til læsser	Liter/ton	0,0	0,8	0,7	0,4	0,3	0,8	1,0	0,8	0,3	0,3	0,7	0,0	0,4	0,7	0,7	0,4	0,7	0,5	0,6

El-forbruget for neddeleren udgjorde i gennemsnit 14,4 KWh ~ 9 kr pr ton TS og for grinderen 26,2 KWh ~ 16 kr pr ton TS.

Ad. 5 Omkostninger til reparation og vedligehold inklusive reservedele og mandtimer over perioden august 2018 til og med maj 2019 blev også registreret i Gram. Den samlede produktion på 6000 ton TS ~ til 75% af den samlede behandlede mængde. Med dette som udgangspunkt kan omkostningerne pr ton TS opgøres som følger:

- Reservedele 33,90 kr pr ton TS
- Mandtimeforbrug 13,00 kr pr ton TS

Det er højere end det forventede niveau på 36,00 kr pr ton TS. Hvilket primært skyldes 2 forhold:

- Problemer med funktion og kontrol af mængde over stenfraskiller
- Kvaliteten af de anvendte biomasser – specielt hestemøg og ”gulerodshalm” – med højere indhold af sand, småsten og metalstykker

Ad. 6 Omkostninger til mandskab og øvrig drift omfatter primært lønninger til operatør. Gram anlægget blev drevet af 1 mand, der stod for indtag, håndtering, neddeling og grinding af biomasser. Behandlingskapaciteten er 7 ton TS eller 12 tons pr time. Med en effektiv opetid på 80% eller 6 fuldlast timer pr dag svarer det til 18000 tons pr år pr skift. Med en brutto lønudgift på 35000 pr måned giver det omkostning på 25 kr pr ton eller 45 kr pr ton TS.

Ad. 7 Omkostninger til forrentning (5% p.a) og afskrivning (10 år) vil på Gram anlægget andrage i gennemsnit 48 kr pr ton ved 18000 ton pr år.

Den samlede økonomi ved neddeling og grinding vil endvidere afhænge af placering af anlæg. Hvis anlægget placeres på biogasanlæg, sådan at det grindede biomasse kan ledes direkte til biogasanlæg vil den samlede transport begrænses til tilførsel af biomasser.

AST anlægget kører i dag som en ydelse hvor en entreprenør ejer og driver udstyret centralt. Entreprenøren behandler og leverer forbehandlet biomasse til forskellige biogasanlæg. I forbindelse med fastsættelse af økonomien anvender entreprenøren nedenstående nøgletal:

Investering:

Neddeler & Grinder som stationæranlæg: 7,2 mio kr

Levetid i driftstimer 20000

Afskrivning pr time 360 kkr

Kapacitet pr time ved 55% TS er 12 ton

Afskrivning pr ton 30 kr

Drift:

Anlægget betjenes af 1 mand pr skift inkl håndtering af biomasse til anlæg og læsning af grindet produkt:

25 kr/ton

El-forbrug pr ton 11 Kwh

Rep + vedligehold pr ton 25 kr

2.1.1 N-steaming

Der har været udført en række forsøg med N-steaming i lab-skala og i kommerciel skala på AST anlægget i Foulum. Der har været gennemført en test af Seko, grinder på et veldefineret biomassemiks bestående af hvedehalm, dybstrøelse og græs. Effekten af hhv. Seko og grinder på biogaspotential er målt og den grindede biomasse er efterfølgende blevet N-steamet.

Følgende forsøg er gennemført med ammoniak behandling:

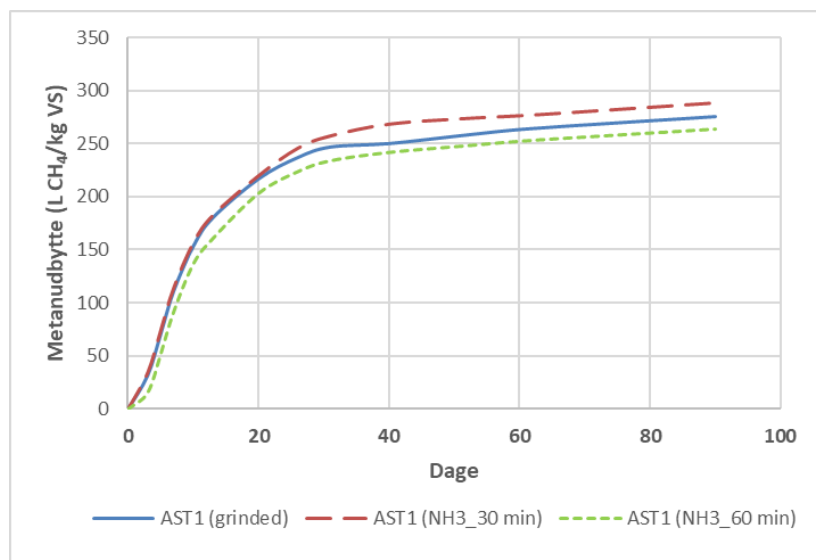
- Fuld skal test med 2 forskellige opholdstider på 0,5 og 1 time.
- Lave NH₃ koncentrationer: 10 forskellige ammoniak koncentrationer i intervallet 0-5%
- Høje NH₃ koncentrationer: Koncentrationer i intervallet 0-25% har været afprøvet.
- Koncentrationer på 0, 1, 5 og 10%

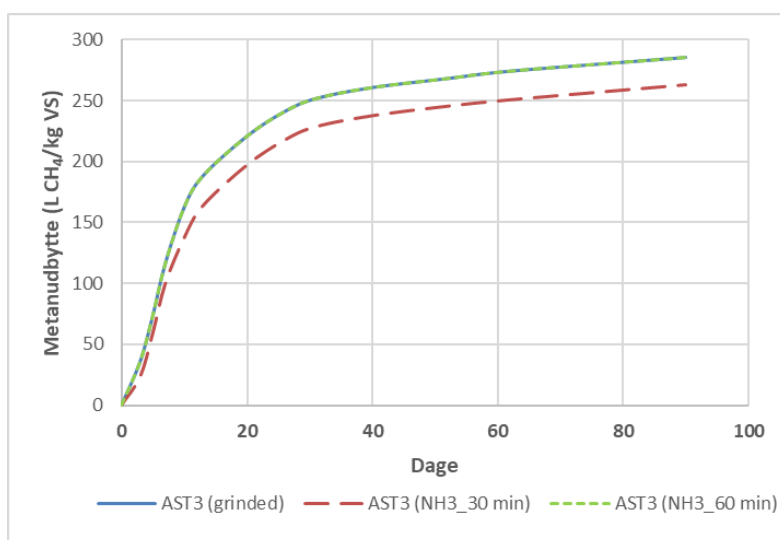
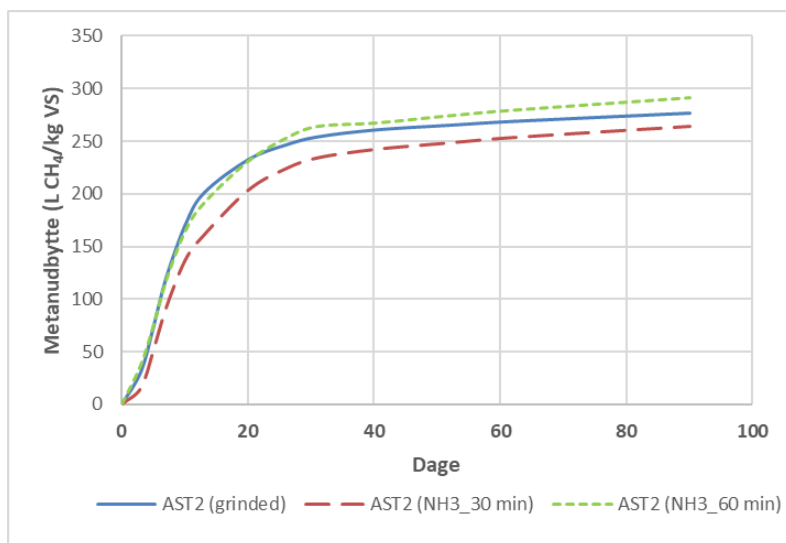
Inden ammoniakbehandlingen er en blanding af halm, fast gødning og græs blevet produceret og der er taget prøver 3 gange i forløbet.

Tabel 6 Blandinger af halm, fast gødning og græs før og efter grinding.

Substrat	Forbehandling	TS (%)	VS (%)
Prøve 1	Neddelt	50.20	43.71
	Grinded	52.02	45.30
Prøve 2	Neddelt	50.46	37.79
	Grinded	47.51	36.34
Prøve 3	Neddelt	56.66	51.02
	Grinded	55.82	50.78

Det grindedde materiale blev efterfølgende anvendt til forsøg med N-steaming.





Figur 12 *CH₄ udbytte fra en blanding af fast gødning, græs og halm før og efter N-steaming.*

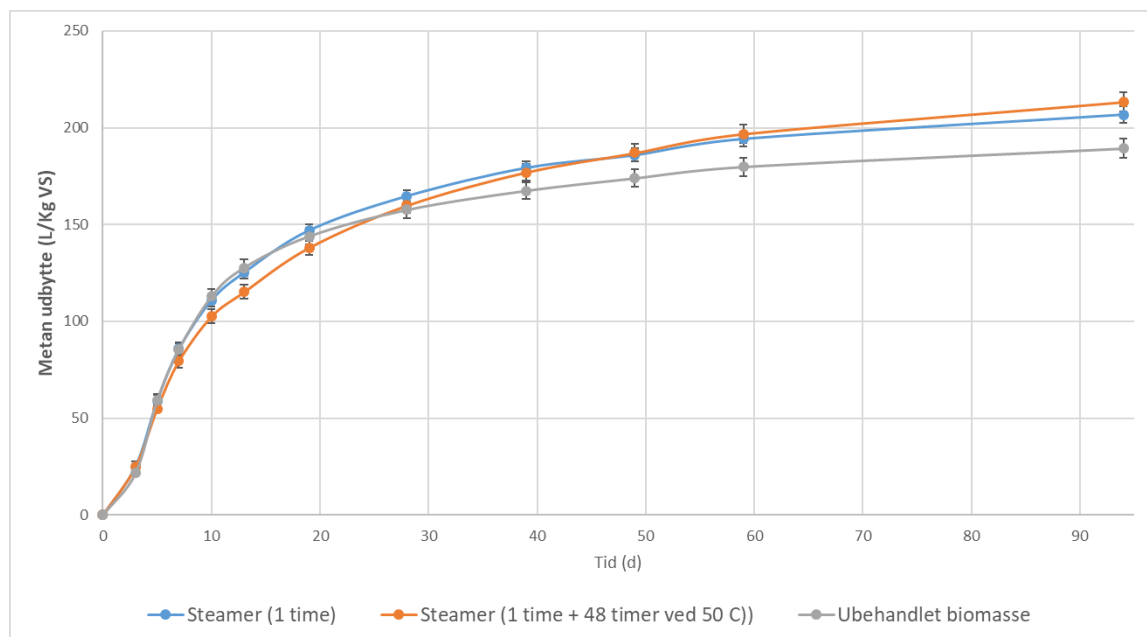
N-steaming ændrede ikke CH₄ udbyttet signifikant og der blev målt negativ effekt i flere tilfælde. Det tyder på at udtagning af repræsentative prøver har været vanskeligt og en vigtig årsag til, at det ikke har været muligt at drage klare konklusioner. Dette betød at det blev besluttet at udføre en række laboratorie forsøg hvor det var nemmere at have en veldefineret ammoniak koncentration.

Der blev udført endnu et fuldskala forsøg med N-steaming på Foulum biogas. N-steaming blev gennemført ved at blæse varm luft, gennem afgasset gylle og ammoniak beriget gas blev tilført biomasse blanding. Dampen indeholdt ca. 800-1000 ppm ammoniak. Biomasse blandingen bestod af hvedehalm, kløvergræs og dybstrøelse i et forhold på 2: 1: 1 baseret på våd vægt.

Tabel 7 *Tørstof (TS) og organisk tørstof (VS) i biomasse og blanding.*

Biomass	TS (%)	VS (%)
Hvede halm	71.36	97.13
Kløver græs	34.22	95.44
Dybstrøelse	45.15	92.2
Biomasse blanding	44.55	90.30

Biomasse blandingen blev N-steamet i 1 time. For at undersøge om der var ammoniak hæmning blev der tilsat et ekstra trin hvor en del af ammoniak behandlede biomasse blev behandlet ved 50 °C i 48 timer for at afdampe det ammoniak der var blevet bundet i biomasse. Efter opbevaring i 48 timer var restkoncentrationen af ammoniak ikke målbar, hvor den var 0,034% i den ammoniak steamede biomasse, og 0,014% i den ubehandlede biomasse (vægt/vægt, på biomasse tørstofbasis).



Figur 13 Akkumuleret metan udbytte fra grinded biomasse blanding af halm, græs og dybstrøelse med og uden N-steaming.

Figur 13 viser det kumulative CH₄-udbytte opnået fra grinded og N-steamet biomasse blanding. Den N-steamede prøve gav 13% højere methanudbytte i forhold til den ubehandlede biomasse. Derudover ændrede den ekstra opbevaringsproces ikke CH₄-udbyttet markant, idet prøven, der blev lagret, kun opnåede 3% højere metanudbytte i forhold til prøven uden ekstra opbevaring. Ammoniakkoncentrationen, i dampen der blev anvendt til N-steaming, var meget lav og det bør forventes en højere effekt hvis ammoniak koncentrationen kan øges.

2.2 Selektiv opholdstid (Genudrødning af fiber)

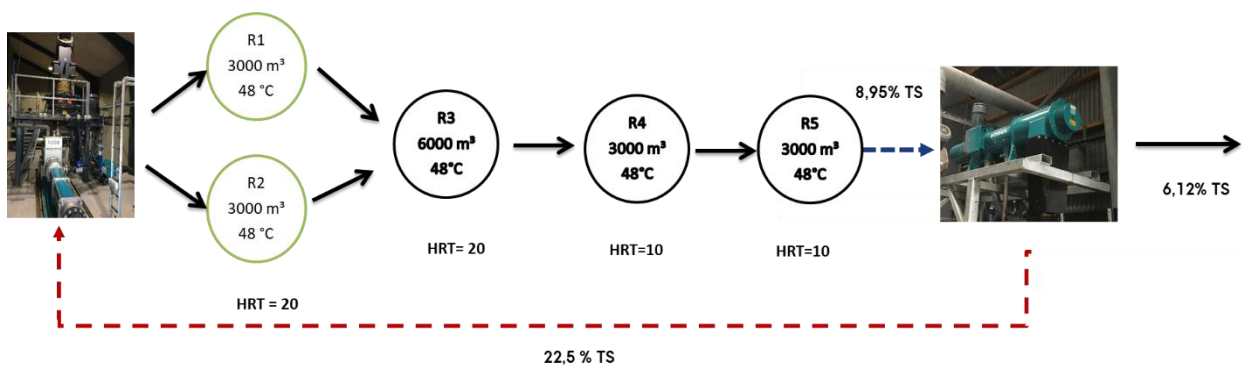
Selektiv opholdstid fungerer ved at opholdstiden af tungt nedbrydeligt organisk stof øges i forhold til den hydrauliske opholdstid. Metoden fungerer i praksis ved separation og recirkulering af fiberfraktionen hvorved opholdstiden af den tungtomsættelige del af biomassen forlænges. Separation og recirkulering af fiberfraktionen kan enten udføres i et åbent system med skruepresse eller ved en teknologi hvor fiberen recirkuleres i en lukket system. Metoden praktiseres bl.a. på Rybjerg biogas og ved Madsen Bioenergi.

Rybjerg biogas:

Tørstofindholdet i reaktorerne er ca. 12%, mens tørstofindholdet i efterlager 3 er ca. 9%. Ca. 75% af den afgassede biomasse fra efterlager 3 separeres i en Börger skruepresse med en 0,5 mm si, og fiberfraktionen køres igennem biogasanlægget igen via indfødningssystemet til fast biomasse. Tørstofindholdet i væskefraktionen er ca. 6%, dvs. det er kun de største partikler fra den afgassede biomasse, der recirkuleres.

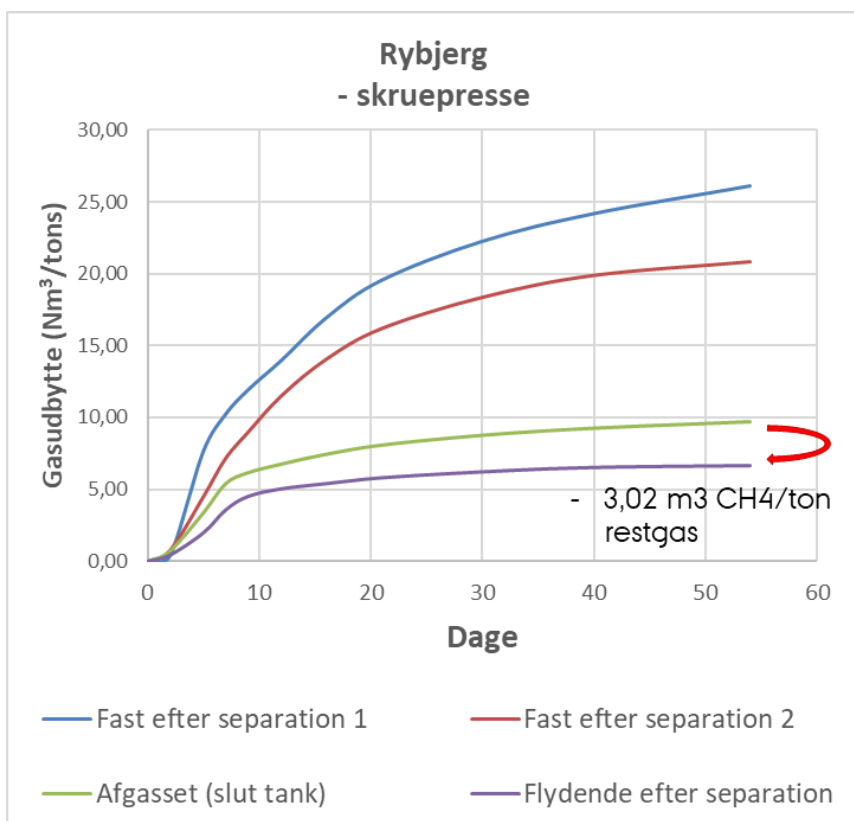


Figur 14 Börger skruepresse, der separerer ca. 75% af den afgassede gylle. Gyllefiberen køres igennem biogasanlægget igen.



Figur 15 Principskitse for genudrødning af fibre på Rybjerg biogas

Gasudbytte i det afgassede før separation og hhv. den faste og flydende fraktion efter separation fremgår af figur 16. Det fremgår at den faste fraktion har et gaspotentiale, der er væsentligt højere end i den flydende fraktion. Inden separationen har det afgassede materiale et restgaspotentiale på ca. 10 m³ CH₄/ton medens den flydende fraktion har et restgaspotentiale på ca. 7 m³ CH₄/ton. Dette betyder at processen kan generere ca. 3 m³ CH₄/ton for de 75% af den afgassede biomasse der recirkuleres svarende til, at det i gennemsnit kan forventes at der kan opnås et ekstra gasudbytte på ca. 3,02 m³ CH₄/tons biomasse.



Figur 16 Gasudbytte i forskellige fraktioner før og efter separation.

Investeringen i en separator på Rybjerg biogas har været 528.800 kr og de årlige omkostninger til drift af separatoren har i 2019 været 50.042 kr. I tabel er økonomien for et anlæg med separation beregnet med udgangspunkt i Rybjerg biogasanlæg. Den økonomiske gevinst ved anvendelse af genudråkning af fiber er beregnet til 13,55 og 14,11 kr/ton ved hhv. 5 og 10 års afskrivningsperiode. Omregnet til metan giver det en produktions pris per m³ ekstra metan på hhv. 1,5 og 1,3 kr/m³ CH₄. Der er således en betydelig gevinst ved anvendelse af separation og genudråknings teknologi på Rybjerg biogas.

Tabel 8 Beregninger for effekt og omkostninger ved anvendelse af genudråkning ved forskellige forudsætninger for levetiden med udgangspunkt i Rybjerg biogas. Forrentning er fastsat til 10%.

		Genudråkning fiber Rybjerg		
Biomasse	Type	Blandet	Blandet	
Levetid	år	5	10	
Gasudbytte	m ³ CH ₄ /ton	30	30	
El	kwh/ton	5	5	
Varme	kwh/ton	0	0	
Investering	Forbehandling	kr	528000	528000
Kapacitet		ton/år	95813	95813
El		kr/ton	2,4	2,4
Investering	Behandling	kr/ton	5,51	5,51
Investering	Infrastruktur	kr/ton/år	0	0
CAPEX		kr/år	139285	85930
CAPEX		kr/ton	1,5	0,9
OPEX	Sliddele	kr/ton	0,6	0,6
Samlede omkostninger		kr/ton	4,4	3,9
Ekstra gasudbytte		Nm ³ CH ₄ /ton	3	3
Værdi ekstra gas		kr/ton	18	18
Samlet værdi gas		kr/ton	193,55	194,11
Gevinst ved behandling		kr/ton	-13,55	-14,11
Produktionspris ekstra metan		kr/m ³ CH ₄	1,483	1,297

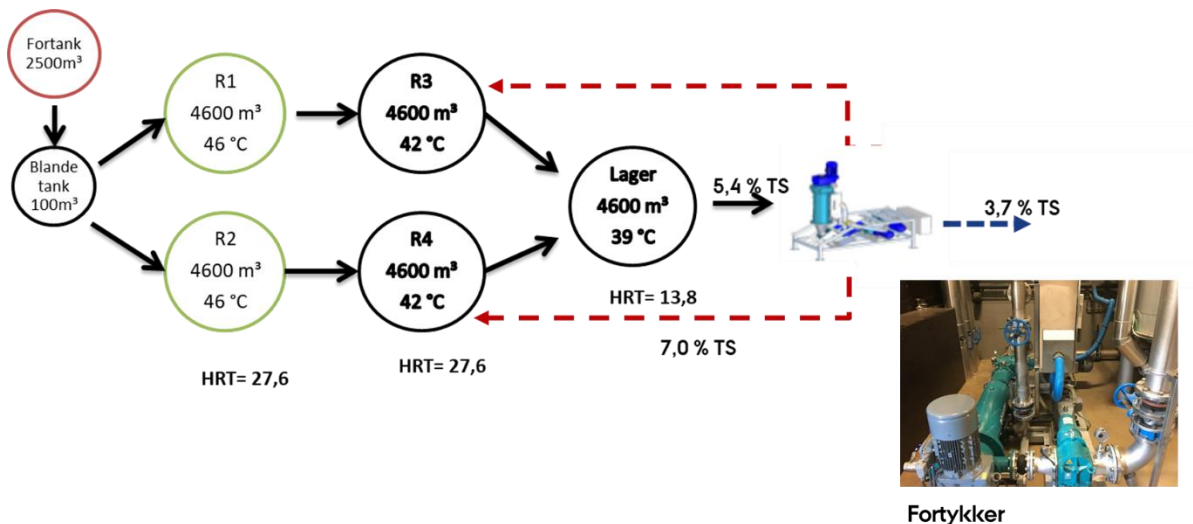
Madsen BioEnergi:

Anlægget er opført i 2014, som et stort Lundsby gårdanlæg, der årligt behandler ca. 120.000 tons biomasse. Det er primært kvæg- og svinegylle det behandles, men der suppleres med energiafgrøder som majs- og rughelsæd. Madsen Bioenergi får i øjeblikket tilbudt meget dybstrøelse som biomasse, dermed forventes andelen af dette øget, og mængden af energiafgrøder reduceres på sigt. Anlægget drives med en procestemperatur på ca. 46⁰ C faldende til 42⁰ C grader i sekundære reaktorer, og der er en opholdstid på ca. 90 døgn. Som forbehandling til dybstrøelse og græsensilage anvendes en Triolet biomikser, der doserer det ned i mikserfortanken. Majs og helsæd doseres med en Fliegl indfødningsskabe ned i samme fortank.



Figur 17 Madsen Bioenergi

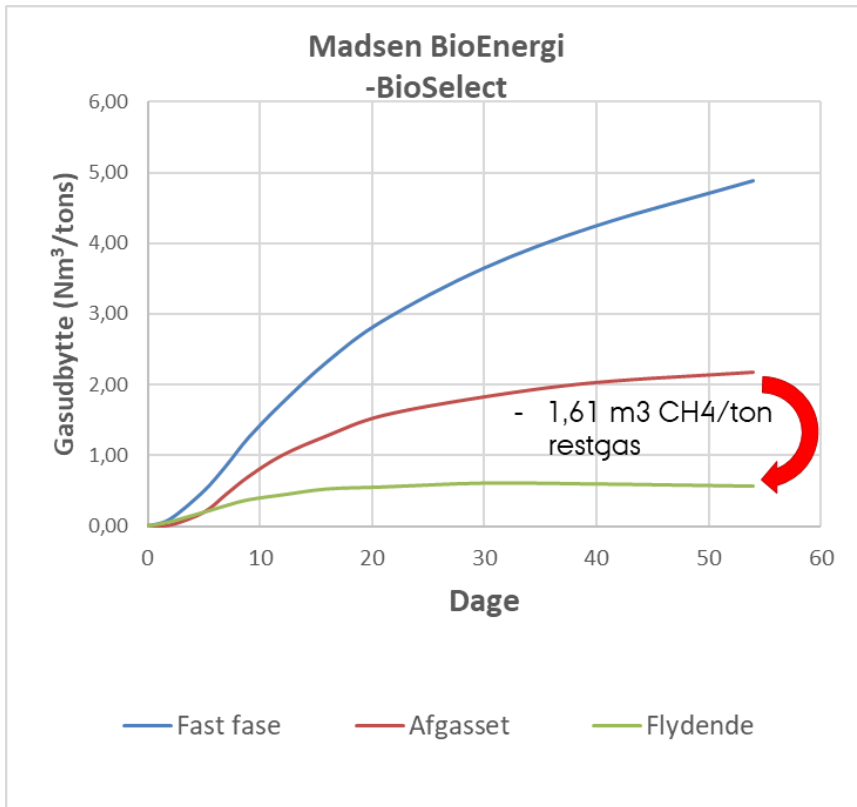
Tørstofindholdet i reaktorerne er ca. 9%, mens tørstofindholdet i efterlager er ca. 5,5%. Den afgassede biomasse fra lagertank "fortykket" i en Börger bioselect som er et lukket system. Den specielt designede og patenterede snegl som er udformet med hulrum i selve snegle- vindingerne, bevirker at fibrene fra gyllen klemmer sig fast i vindingerne og danner en blød og konstant udsiftende «fiberbørste» som renser det rustfrie spaltefilter, der omslutter sneglen. Tørstofindholdet i væskefraktionen der pumpes til slutlager er ca. 3,7% medens den tykke fraktion der genudrødnes har et tørstofindhold på ca. 7% TS.



Principskitse for genudrødning af fibre ved Madsen Bioenergi.

Gasudbytte i det afgassede før separation og hhv. den "fortykkede" og flydende fraktion efter separation fremgår af figur 18. Det fremgår at den faste fraktion har et gaspotentiale, der er væsentligt højere end i den flydende fraktion. Inden separationen har det afgassede materiale et

restgaspotentialer på ca. 2,2 m³ CH₄/ton medens den flydende fraktion har et restgaspotentialer på ca. 0,6 m³ CH₄/ton. Dette betyder at processen kan generere ca. 1,6 m³ CH₄/ton.



Figur 18 Gasudbytte i forskellige fraktioner før og efter separation på Madsen BioEnergi med Börger bioselect.

Økonomien ved genudrødning af fiber ved Madsen BioEnergi fremgår af tabel 9.

Tabel 9 Beregninger for effekt og omkostninger ved anvendelse af genudråkning ved forskellige forudsætninger for levetiden med udgangspunkt i Madsen BioEnergi. Forrentning er fastsat til 10%.

		Genudråkning fiber Madsen BioEnergi		
Biomasse	Type	Blandet	Blandet	
Levetid	år	5	10	
Gasudbytte	m ³ CH ₄ /ton	30	30	
El	kwh/ton	5	5	
Varme	kwh/ton	0	0	
Investering	Forbehandling	kr	900000	900000
Kapacitet	ton/år	120000	120000	
El	kr/ton	2	2	
Investering	Behandling	kr/ton	7,50	7,50
Investering	Infrastruktur	kr/ton/år	0	0
CAPEX	kr/år	237418	146471	
CAPEX	kr/ton	2,0	1,2	
OPEX	Sliddele	kr/ton	0,5	0,5
Samlede omkostninger	kr/ton	4,9	4,1	
Ekstra gasudbytte	Nm ³ CH ₄ /ton	1,6	1,6	
Værdi ekstra gas	kr/ton	9,6	9,6	
Samlet værdi gas	kr/ton	184,74	185,50	
Gevinst ved behandling	kr/ton	-4,74	-5,50	
Produktionspris ekstra metan	kr/m ³ CH ₄	3,036	2,562	

2.3 Biogrinder BHS

Biogrinderen er velegnet til de fleste faste biomasser og neddelingsgraden kan tilpasses de enkelte biomasser. For at opnå størst mulig fleksibilitet kan hamrene monteres i to niveauer. Biogrinderen leveres i to størrelser med hhv. 55 og 75 kW motorer for kapaciteter op til 12 t/h. Maskinen er opbygget med en kraftig hurtiggående rotor, hvorpå der er monteret op til 4 udskiftelige hamre. En stor specialhærdet topplade med på svejst hårdmetal sikrer at biomassen ledes ud til hamrene. Hamrene er designet således at der opnås optimal neddeling med mindst mulig effektforsøg.

En justerbar vibrationsensor sikrer at maskinen stoppes såfremt der kommer et fremmedlegeme. herved sikres det at eventuelle fremmedlegemer ikke ledes videre til efterfølgende pumper m.m.

Erfaringer fra Rybjerg biogas

Biogasanlægget er et gårdbiogasanlæg, der er bygget i 2016 i tilknytning til et ca. 20 år gammelt biogasanlæg. Det nye biogasanlæg er opbygget af to parallelle reaktorer på hver 3.000 m³ samt tre

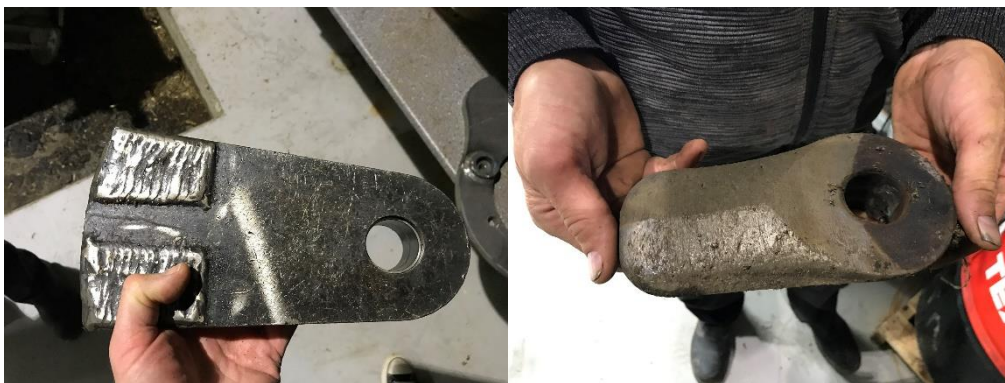
serieforbundne efterlagre på hhv. 6.000, 3.000 og 3.000 m³. Temperaturen er ca. 50°C i de to reaktorer og 42 og 38°C i hhv. efterlager 1 og 2. Efterlager 3 er uden opvarmning, og temperaturen vurderes at være ca. 35°C, afhængig af udetemperaturen. Den samlede opholdstid i reaktorer og efterlagre er ca. 48 dage.



Figur 19 Rybjerg Biogas med indfødningsanlæg til fast biomasse samt de to parallelforbundne reaktorer i baggrunden.

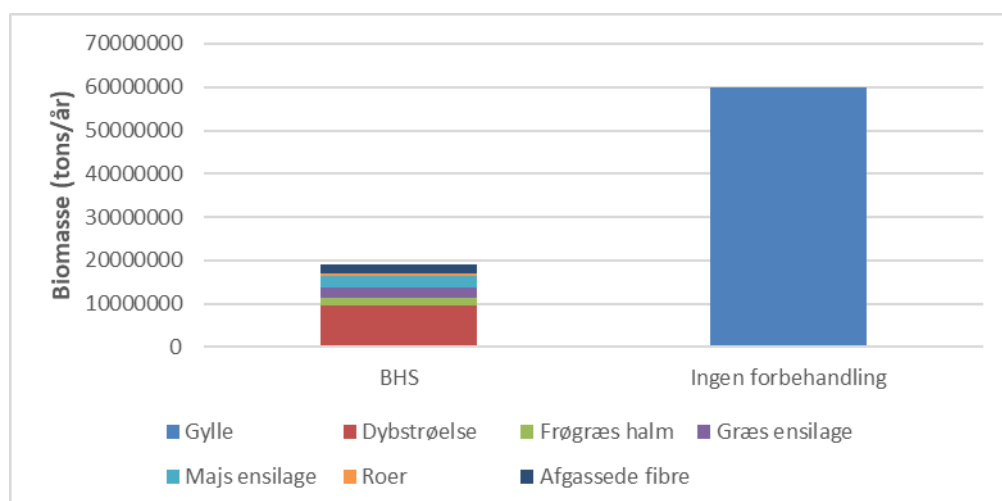
Rybjerg biogas anvender biogrinder til forbehandling af fast biomasse. Opstillingen af biogrinder på Rybjerg biogas er vist i nedenstående billede.





Figur 20 Biogrinder ved Rybjerg biogas. BHS-Sonthofen biogrinder/hammermølle samt slagler før og efter slitage.

Alle faste produkter der udgør ca. 25% af biomassen der anvendes på anlægget forbehandles i BHS biogrinder. Den anvendte biomasse sammensætning er illustreret i figur 21.



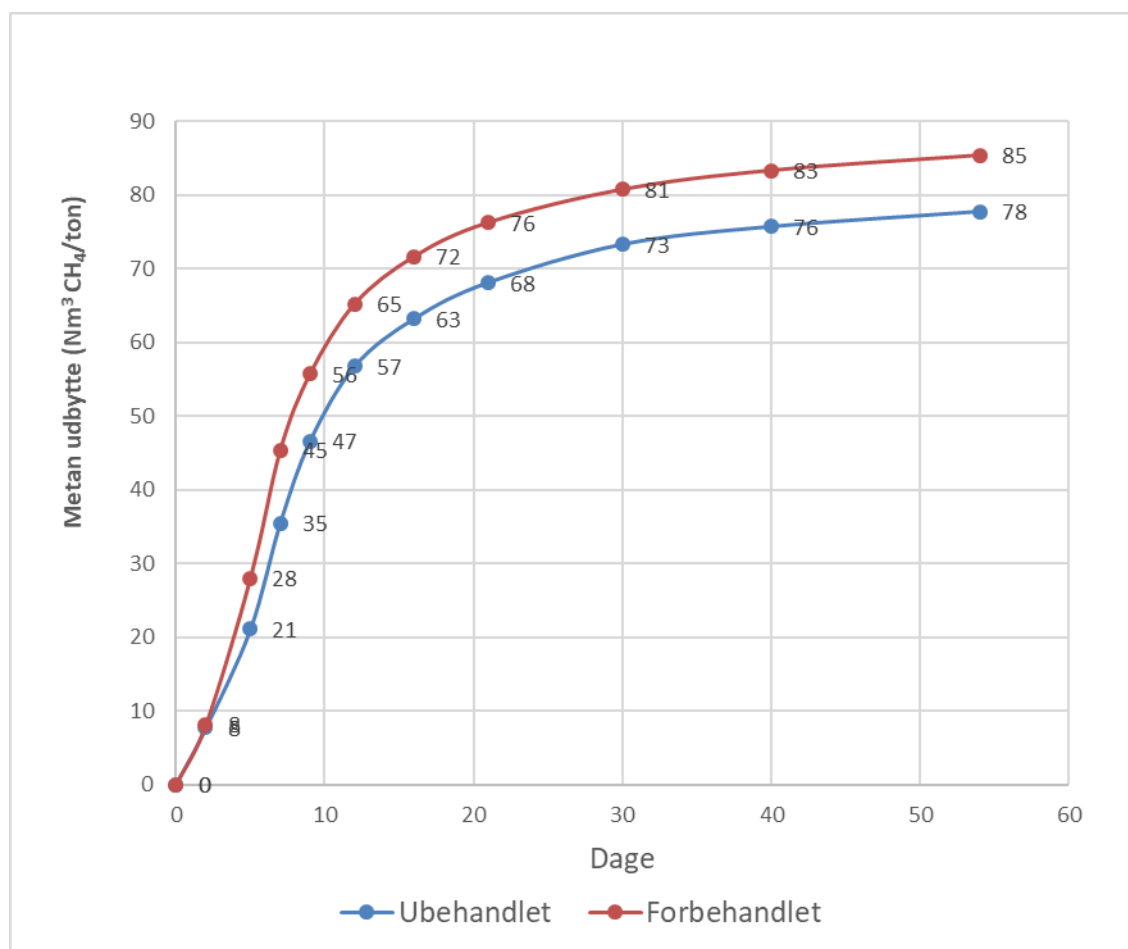
Figur 21 Tilførsel til biogas anlæg og BHS i 2019

Til vedligehold bliver der brugt 1558 kr. pr dag set som et gennem snit over to år. Omkostningen dækker vedligehold på Biogrinder, Sydex fødepumpe samt Børger pumpe som pumper blanding til reaktor. Der er målt elforbrug på biogrinder, infødningspumpe og Børger pumpe over en længere periode. Det samlede elforbrug er 70 kw og med en driftstid på 22,5 time pr døgn er det samlede elforbrug 1575 Kwh pr. døgn eller ca. 30 kwh/tons biomasse i test perioden fra 15/5 2019-26/7 2019. Investeringen i Biogrinder er ca 2,5 mil. kr for hele setup.

Effekt på gasudbytte

Der er målt gasudbytte på den faste biomasse før og efter Biogrinding på Rybjerg biogas. Det fremgår at der er en betydelig ekstra gevinst på gaspotentialet. På anlæg med mere en 60 dages opholdstid viser undersøgelsen at der kan opnås et merudbytte på ca. 7 m³ metan per ton. På Rybjerg biogas

anvendes der ca. 20.000 tons fast materiale per år og der kan således opnås et ekstra gasudbytte på ca. 140.000 m³ CH₄/år.



Figur 22 Gasudbytter ved anvendelse af biogrinder.

I tabel 10 er økonomien ved anvendelse af biogrinder på den faste biomasse beregnet med udgangspunkt i anlægget i Rybjerg. Der forventes en forholdsvis kort levetid på forbehandlingsudstyr og der er som udgangspunkt regnet med 5 år men der er regnet følsomhed på en levetid på 10 år. En del af investeringen vedrører udstyr der sikrer en dosering af halmrig biomasse og denne del er ikke inkluderet i investeringen.

Den økonomiske gevinst ved anvendelse af biogrinderen er hhv. 13,5 og 16,4 kr/ton ved hhv. 5 og 10 års afskrivningsperiode.

Det vurderes at teknologien kan bidrage positivt til den samlede økonomi ved at muliggør større dosering af fast materiale og i form af øget gasproduktion. Samtidigt sikres at faste biomasse der har en lav indkøbspris kan tilføres i store mængder hvilket formodes ikke at være muligt i samme grad uden forbehandlingen. Endvidere forventes det at viskositeten sænkes i reaktoren hvorved en større mængde fast materiale vil kunne behandles.

Tabel 10 Beregninger for effekt og omkostninger ved anvendelse af BHS-Sonthofen biogrinder/hammermølle ved forskellige forudsætninger for levetiden med udgangspunkt i Rybjerg biogas. Forrentning er fastsat til 10%.

		Biogrinder Rybjerg		
Biomasse	Type	Blandet fast	Blandet fast	
Levetid	år	5	10	
Gasudbytte	m ³ CH ₄ /ton	85	85	
El	kwh/ton	23	23	
Varme	kwh/ton	0	0	
Investering	Forbehandling	kr	1200000	1200000
Kapacitet	ton/år	43200	43200	
El	kr/ton	11	11	
Investering		kr/ton	27,78	27,78
Investering	Infrastruktur	kr/ton/år	0	0
CAPEX		kr/år	316557	195294
CAPEX		kr/ton	7,3	4,5
OPEX	Sliddele	kr/ton	10,0	10,0
Samlede omkostninger		kr/ton	28,5	25,7
Ekstra gasudbytte	Nm ³ CH ₄ /ton	7	7	
Værdi ekstra gas	kr/ton	42	42	
Samlet værdi gas	kr/ton	523,54	526,35	
Gevinst ved forbehandling	kr/ton	-13,54	-16,35	
Gevinst ved forbehandling	kr/m ³ CH ₄	4,066	3,665	

2.4 Disruptor

Fomålet med en Disruptor teknologien er at sænke viskositet og øge overfladearealet ved en kraftig mekanisk behandling der ”grinder” og neddelere fibre. DisRuptor teknologien er udviklet og markedsføres af firmaet Vogelsang.

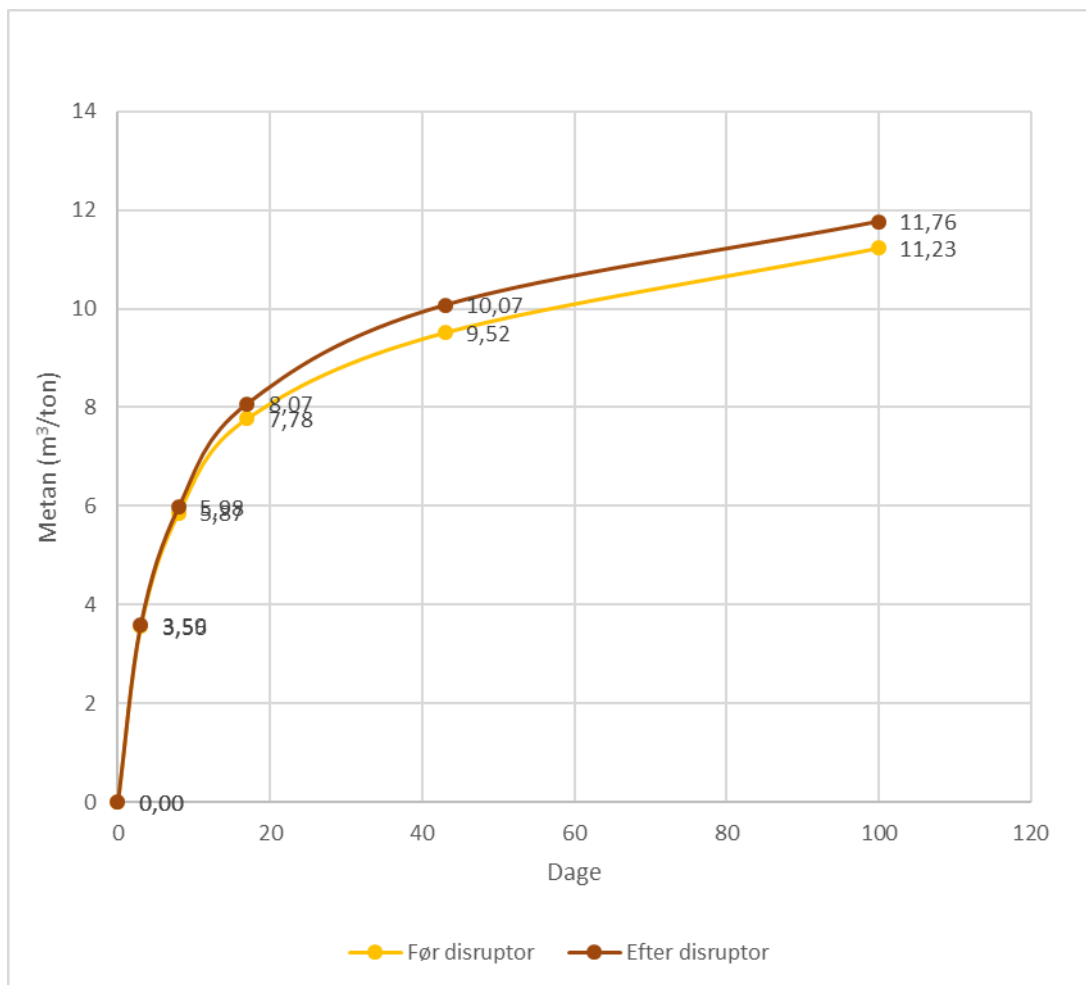
Der er kørt forsøg med disruptor i perioden 15/11 2019 til 1/5-2020. Disruptoren er monteret på et recirkulerings loop på reaktoren (billede x). Disruptoren har kørt med ca. 4 m³/time svarende til ca. 96 m³/døgn. Med en daglig tilførsel til anlægget på ca. 90 m³/time betyder dette at al biomasse i gennemsnit bliver behandlet mere end 1 gang. Anlægget har fungeret stabilt uden væsentlige drifts problemer men med enkelte stop pga. fremmedlegemer. I en periode blev det forsøgt at by passe ekstruder således at disruptor fungerede som eneste forbehandling. Dette gav nogle udfordringer med fremmedlegemer og der

blev efterfølgende monteret en Rotacut foran Disruptor, hvilket sikrede at der ikke blev tilført større fremmedlegemer.



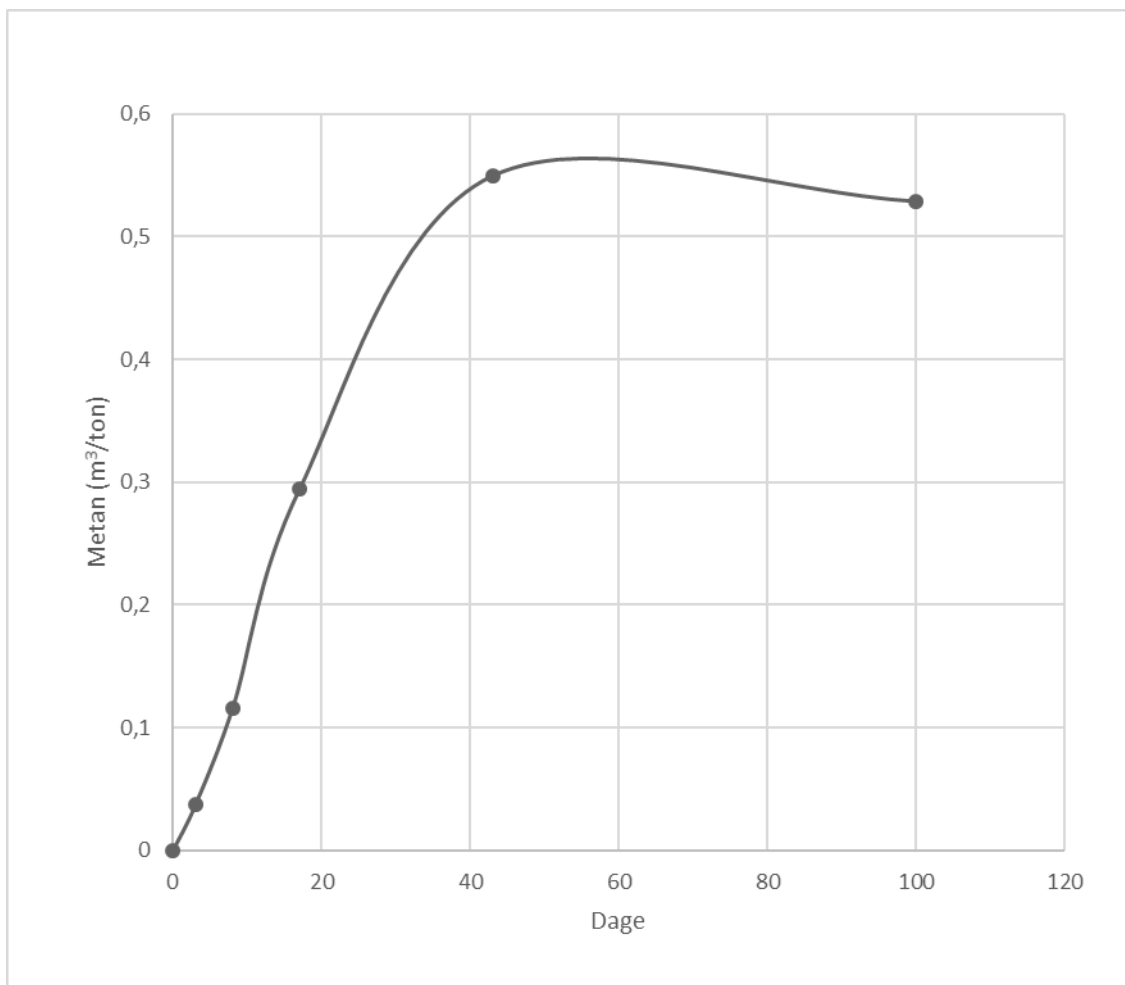
Figur 23 Disruptor fra Vogelsang (venstre) og skæreenhed (højre).

I forbindelse med driften blev gasudbytter registreret og der blev taget prøver ud før og efter behandlingen. Materiale der er behandlet med disruptor er sammenlignet med ubehandlet materiale i en BMP test over 100 dage. Resultaterne er vist i figur 24.



Figur 24 Metanudbytte før og efter behandling med Disruptor.

Testene er udført på det materiale der allerede er afgasset med en opholdstid på 13,5 dage i reaktoren i Foulum. Det fremgår, at der ikke er et øget gasudbytte de første 10 dage men herefter er der et ekstra gasudbytte på ca. $0,55 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4/\text{ton}$. Materialet der behandles i disruptoren er allerede behandlet i en ekstruder og på anlæg hvor der ikke er en kraftig forbehandling må effekten af disruptoren forventes at være større. Endvidere har materialet før disruptoren allerede være delvist behandlet med disruptor, da det kører som er recirkuleringsloop. De $0,55 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4/\text{ton}$ der er målt må således formodes at være mindre end den reelle effekt og for anlæg uden forbehandling forventes effekten at være større.



Figur 25 Forøget gasudbytte ved behandling af biomasse med Disruptor

Økonomi

Elforbruget i disruptoren er ca. 8,5 kwh med en dosering på ca. 4 m³/h. Kapaciteten er imidlertid langt større og der vil kunne behandles ca. 30 m³/h uden at elforbruget i disruptoren forventes af stige væsentligt. Energiforbruget ved et flow på 4 m³/h svarer til ca. 3,5 kwh/ton og ved en kapacitet på 30 m³/h vurderes at være ca. 4 kwh/ton. Investeringen i disruptoren er 175.000 kr hvortil kommer installationer, ventiler mm. og det skønnes at den samlede investering er ca. 300.000 kr.

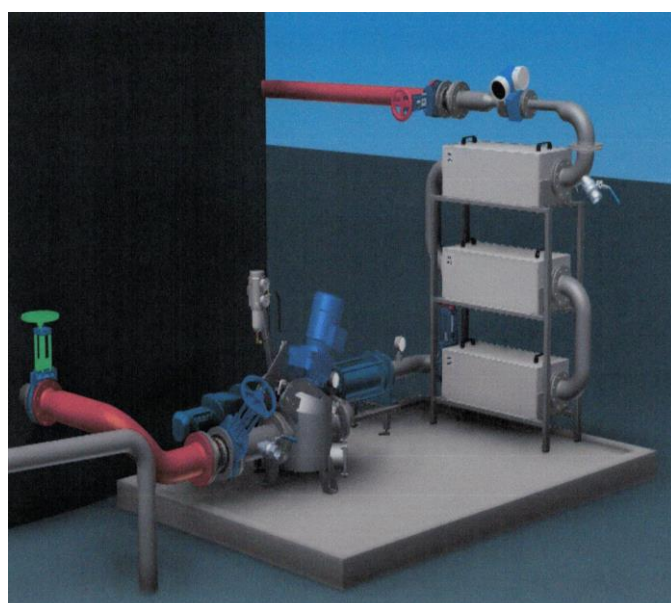
Tabel 11 Beregninger for effekt og omkostninger ved anvendelse af Disruptor og en kapacitet på 10 m³/time ved forskellige forudsætninger for levetiden med udgangspunkt. Forrentning er fastsat til 10%.

		Disruptor Foulum		
Biomasse	Type	Afgasset	Afgasset	
Levetid	år	5	10	
Gasudbytte	m ³ CH ₄ /ton	11,2	11,2	
EI	kwh/ton	3	3	
Varme	kwh/ton	0	0	
Investering	Forbehandling	kr	175000	175000
Kapacitet		ton/år	87600	87600
EI		kr/ton	1,5	1,5
Investering	Forbehandling	kr/ton	2,00	2,00
Investering	Infrastruktur on biogas	kr/ton/år	125000	125000
CAPEX		kr/år	79139	48824
CAPEX		kr/ton	0,9	0,6
OPEX	Sliddele	kr/ton	0,3	0,3
Samlede omkostninger		kr/ton	2,7	2,3
Ekstra gasudbytte		Nm ³ CH ₄ /ton	0,55	0,55
Værdi ekstra gas		kr/ton	3,3	3,3
Samlet værdi gas		kr/ton	67,84	68,19
Gevinst ved behandling		kr/ton	-0,64	-0,99
Produktionspris ekstra metan		kr/m ³ CH ₄	4,828	4,199

2.5 Ultralyd

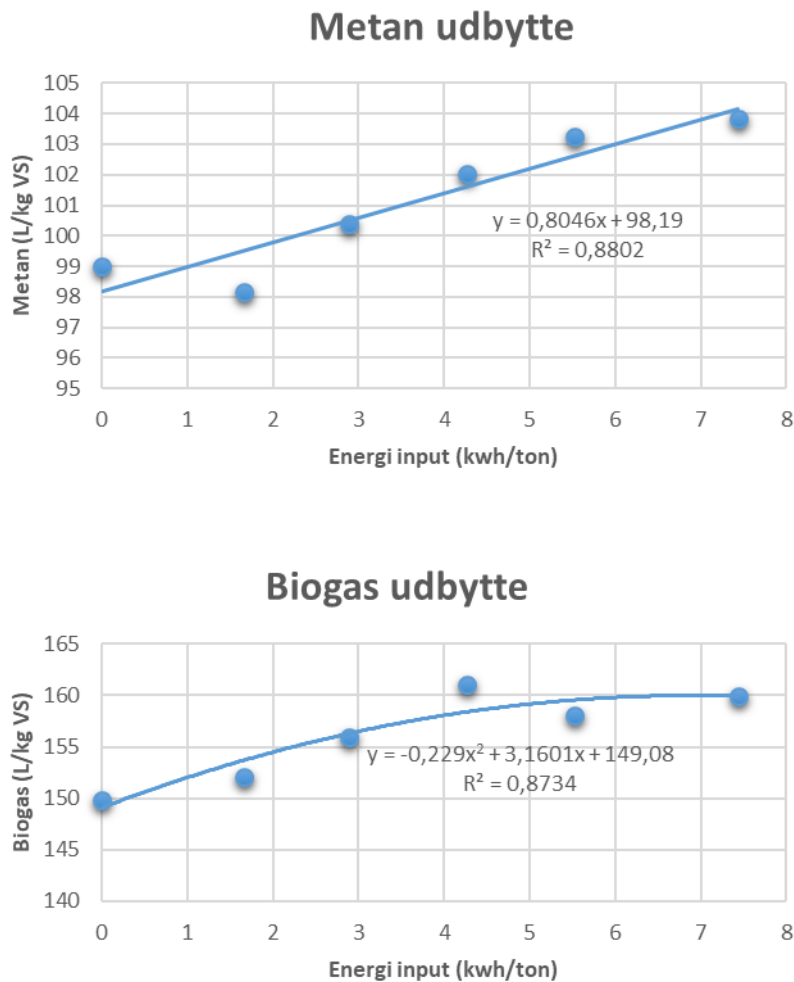
Ved ultralyds teknologien sker der en disintegration af organisk materiale ved omdannelse af elektriske svingninger til mekaniske vibrationer. Disse vibrationer overføres til det omgivende medium ved hjælp af en sonotrode. Ultralydsfrekvensen forårsager høje positive og negative trykfaser. Denne proces kaldes kavitation og processen får de omkringliggende mikroorganismer og fibre til at disintegrere. Den afprøvede teknologi er udviklet af det Tyske firma Weber Entech.

Der er kørt forsøg med ultralyd i perioden 15/6 2020 til 1/11-2020 på biogasanlægget i Foulum. Ultralyds systemet er monteret på et recirkulerings loop på reaktoren (figur 24). Ultralydssystemet har kørt med ca. 1,5 m³/time svarende til ca. 36 m³/døgn. Med en daglig tilførsel til anlægget på ca. 90 m³/døgn betyder dette at al biomasse i gennemsnit bliver behandlet mindre end 1 gang. Anlægget har fungeret stabilt uden væsentlige drifts problemer. I en periode blev det udført forsøg med regulering af flowet og dermed energiinputtet. Endvidere er effekten på viskositet undersøgt.



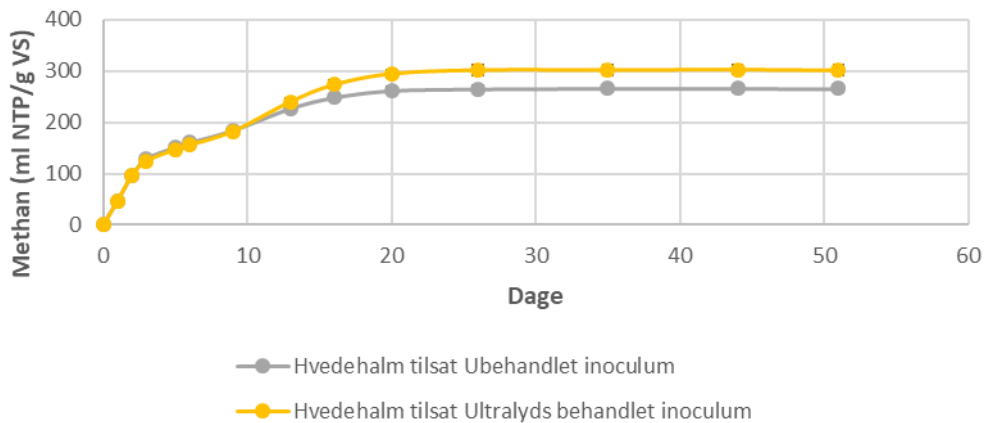
Figur 26 Ultralydsinstallation på Forskningscenter Foulum.

Der er i forsøg målt et ekstra gasudbytte ved forskellige energiinput og resultaterne fremgår af figur 25. Ved 30 dages opholdstid opnås et ekstra gasudbytte på ca. 2-6% afhængig af energiinputtet. Ved et VS indhold i reaktoren på 8% svarer det til ca. 1 Nm³/tons materiale der går igennem ultralydsbehandlingen. I det gennemførte forsøg var biomassen på forhånd blevet udsat for en kraftig forbehandling (ekstrudering) og for anlæg hvor materialet på forhånd ikke er forbehandlet forventes en højere effekt af ultralyd.



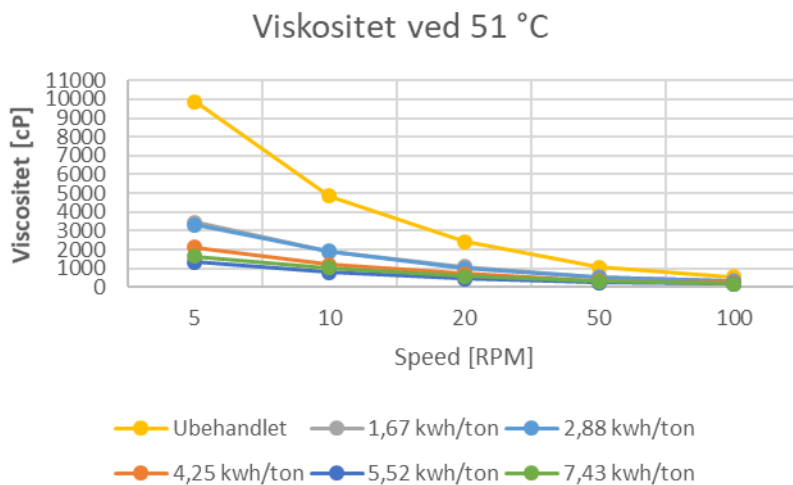
Figur 27 Ekstra gasudbytte ved behandling med ultralyd ved 30 dages biogasomsætning.

For at undersøge effekten af bakteriers aktivitet efter ultralydsbehandling blev der gennemført et forsøg hvor hvedehalm blev tilsat hhv. ubehandlet inoculum og ultralydsbehandlet inoculum. Resultaterne fremgår af figur 28. Der blev fundet et 13% højere metan udbytte fra hvedehalm (302 mod 267 ml/ g VS) ved anvendelse af inoculum der er ultralydsbehandlet. Mulige årsager til dette inkluderer en forbedret masseoverførsel på grund af den reducerede viskositet forårsaget af behandlingen og frigivelsen af hydrolytiske enzymer på grund af cellyse. Uafhængigt af årsagen er dette et interessant resultat med potentiale til at forbedre fordøjelighed af halm og det vil indebære at metan udbyttet af halm kan øges ved at ultralydsbehandle biomassen i reaktoren hvortil halmen tilføres.



Figur 28 Ekstra gasudbytte ved behandling med ultralyd ved 30 dages biogasomsætning.

Viskositeten ved ultralydsbehandling ved forskellige intensiteter fremgår af figur 29. Viskositeten reduceres betydeligt ved alle hastigheder og det fremgår at ved at øge intensiteten af ultralydsbehandlingen reduceres viskositeten.



Figur 29 Viskositet ved forskellige energiinput som funktion af hastighed på spindel.

Det har ikke været muligt at gennemregne økonomien i ultralydsbehandlingen med de forsøgsdata der er opnået da det anlægget er et forsøgsanlæg og det har kun været muligt at gennemføre forsøg med biomasse som på forhånd har gennemgået en kraftig forbehandling. Der er imidlertid forhold, der kan gøre at ultralydsbehandling kan blive en interessant teknologi til forbedring af økonomien både som følge af det forøgede gasudbytte og den reducerede viskositet. Effekten på viskositeten betyder at der forventes at kunne anvende en højere andel tungt omsættelig biomasse ligesom tørstofindholdet i reaktoren forventes at kunne øges.

Litteratur

Møller HB, Nielsen KJ, 2016. Biogas Taskforce – udvikling og effektivisering af biogasproduktionen i Danmark. Aarhus Universitet, DCA rapport Nr. 077.

S. Pérez-Elvira, M. Fdz-Polanco, F. I. Plaza, G. Garralón, F. Fdz-Polanco. 2009. Ultrasound pre-treatment for anaerobic digestion improvement. Water Science and Technology. Volume 60. Issue 6. Pp. 1525-1532.

<https://doi.org/10.2166/wst.2009.484>