Optimal forbehandling af halm og andre tungt omsættelige biomasser til biogasproduktion

Henrik Bjarne Møller, Århus Universitet

Kurt Hjort-Gregersen, Teknologisk Institut - AgroTech

Marts 2021

TEKNOLOGISK INSTITUT

AARHUS UNIVERSITET

Indhold:

1. **Baggrund**

2. **Formål**

3. **Indledning**

4. **Beskrivelse af de 4 undersøgte teknologier**

5. **Testresultater (effekt på gasproduktion, energiforbrug, viskositet, etc.)**

   5.1 Disruptor
   5.2 Ultralyd
   5.3 Biocrack II
   5.4 AST Grinder

6. **Økonomisk perspektivering**

7. **Diskussion og Konklusion**

1. Baggrund

Den danske biogasbranche har gennem det seneste årti undergået meget betydelige forandringer. Åbningen for salg og distribution af opgraderet biogas via naturgasnettet uden snærende krav om hvile i sig selv principper, har fået en række nye investorer på banen. Det har resulteret i etableringen af et betydeligt antal nye biogasanlæg, såvel meget store anlæg, som mindre anlæg med måske 2 -3 landbrug tilknyttet. I samme periode er der også kommet en rækkenye typer biomasser på banen til biogasproduktion. De vigtigste nye typer biomasser er organisk affald fra servicesektoren, men ikke mindst halmrig dybstrøelse, og i mindre udstrækning halm, som ellers er en betydelig ressource. Men halm som råvare giver også en række udfordringer. Der er et højt gas potentiale i halm, men halm og dybstrøelse er vanskelig at håndtere med traditionelle metoder med tilsætning i fortanken, hvor det giver udfordringer med omrøring. Desuden indeholder halmen tungt nedbrydeligt organisk materiale, som kræver en lang opholdstid og/eller en forbehandling. En række anlæg blev derfor etableret med neddelingsudstyr som kædeknusere eller forskellige typer af hammermøller. Disse udstyrstyper klarer opgaven udmærket, men er også forbundet med højt energiforbrug og relativt høje vedligeholdsomkostninger samt tidsforbrug ved skift af reservedele. Det vil under normale omstændigheder være nødvendigt med en eller anden form for forbehandling for at få halmen ind i biogasanlægget. AST Grinderen kan være et udmærket bud på dette. I de seneste år er der imidlertid set en udvikling i retning af at klare den første del af neddelingen med den såkaldte Premix fra det tyske firma Vogelsang, hvor halm og dybstrøelse snegles ind i maskinen, hvor der samtidig tilsættes en pumpestrøm af gylle, hvorefter blandingen passerer gennem en roterende kniv og en matrice (rotacut), hvorefter blandingen pumpes ind i anlægget. Til trods for forbehandling kræver halm som råvare stadig en relativt lang opholdstid som imidlertid vil kunne reduceres ved yderligere neddeling, enten forud for indfødningen i anlægget eller undervejs i processen.

2. Formål

Det er formålet med projektet at teste og demonstrere effekten af 4 relativt nye teknologier til neddeling eller disintegration af halm og andre tungt nedbrydelige biomasser.

3. Indledning

Begrebet forbehandling af halm og dybstrøelse skal i denne sammenhæng opfattes noget bredere, nemlig som neddeling eller disintegration af halm og dybstrøelse. I nærværende rapport medtages kun resultater for én traditionel forbehandlingsteknologi, nemlig AST Grinderen, medens de øvrige tre teknologier alle er udstyrstyper, der fungerer ved at de behandler biomassen i et recirkuleringsloop fra og til reaktoren. Så selvom alle teknologierne faktisk neddeler biomassen, er der denne principielle forskel, der gør, at der kan være forskel på hvordan halm eller dybstrøelse håndteres under indfødning i anlægget, og dermed omkostningerne hertil.

4. Beskrivelse af de 4 undersøgte teknologier

I projektet er der undersøgt en række forbehandlingsteknologier, herunder Disruptor, ultralyd, BioCrack II og grinding (AST). Disruptor teknologien er udviklet og markedsføres af Vogelsang. Disruptoren sikrer en kraftig mekanisk neddeling og monteres på et recirkuleringsloop 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 neddeler og føres via fødekasse til grinderen. I grinderen 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 forbehandlet biomasse til forskellige biogasanlæg.

Ved ultralydsteknologien 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 og markedsføres af C-Biotech i Danmark.

Biocrack-modulet består af elektro-kinetisk disintegration. Biomassen strømmer gennem et behandlingskammer, hvor der genereres et højspændingsfelt med titusinder af volt mellem den interne elektrode og den eksterne elektrode i rustfrit stål. Når mediet strømmer gennem højspændingsfeltet, nedbryder de elektriske kræfter, der anvendes, flokkulerende strukturer og klumper, såsom aggregater og kolloider, der består af dødt organisk materiale og bakterier. Det øger ligeledes enzymaktiviteten. Dette sikrer, at det organiske stof er langt mere tilgængeligt for de anaerobe bakterier og det organiske indhold kan transformeres og nedbrydes bedre. Det sikrer et højere gasudbytte og reduceret viskositet af biomassen.

5. Testresultater (effekt på gasproduktion, energiforbrug, viskositet, etc.)

5.1 Disruptor

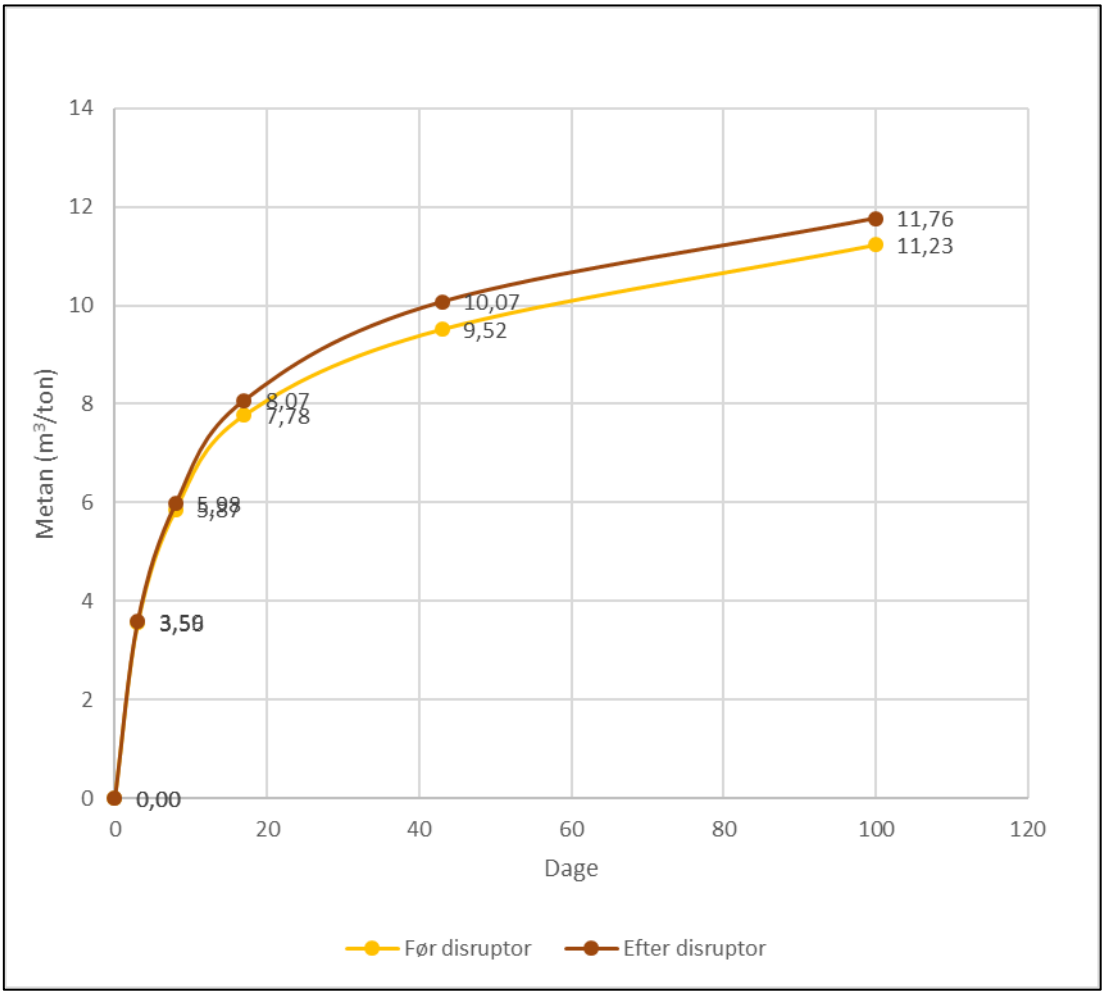
Formålet med en Disruptor teknologien er at sænke viskositet og øge overfladearealet ved en kraftig mekanisk behandling der ”grinder” og neddeler fibre. Disruptor teknologien er udviklet og markedsføres af firmaet Vogelsang.

Der er kørt forsøg med Disruptor i perioden 15/11 2019 til 1/5-2020. Disruptoren var monteret på et recirkuleringsloop på reaktoren (figur 1). Disruptoren har kørt med ca. 4 m^3/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.

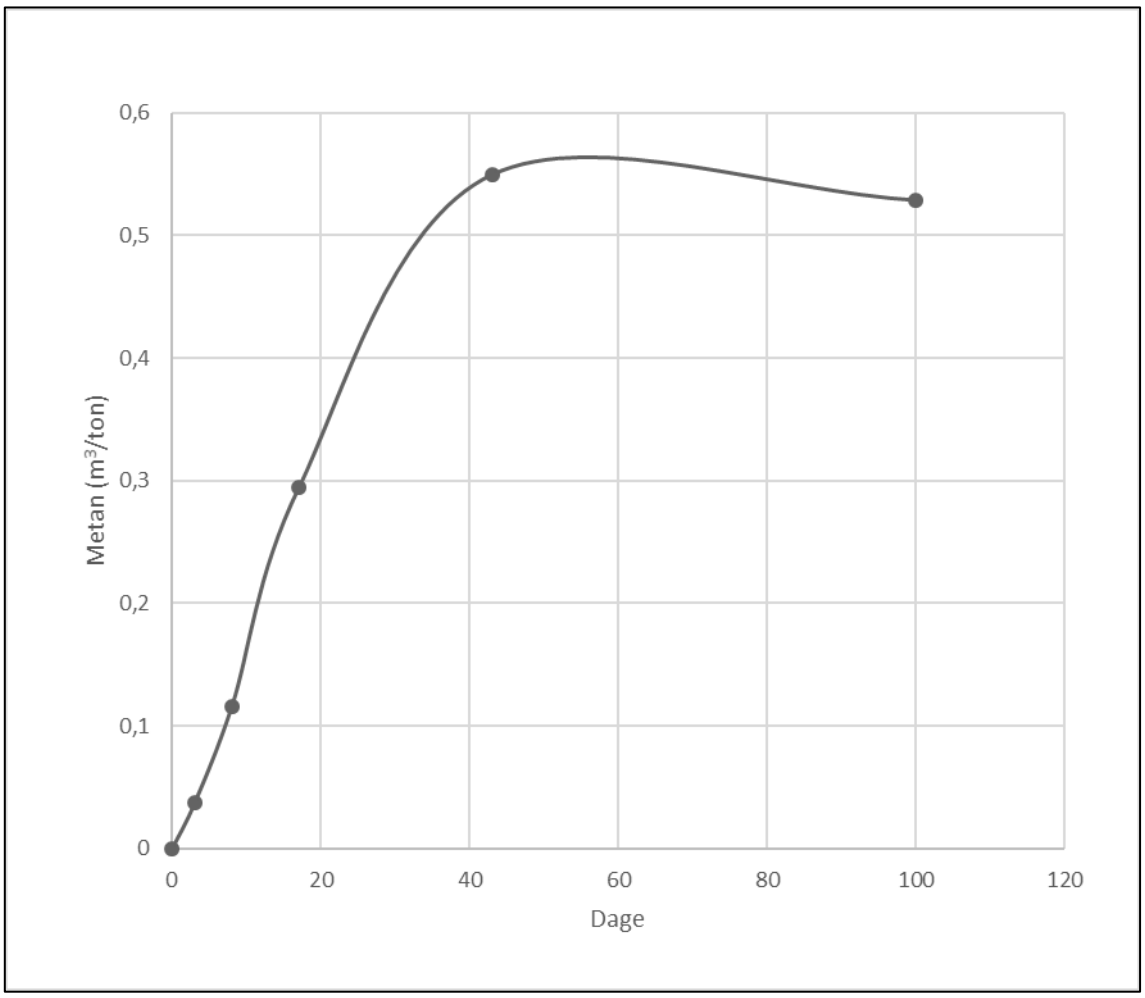
Figur 1. Disruptor fra Vogelsang (venstre) og skæreenhed (højre).

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 2.



Figur 2. 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 Nm^3 CH_4/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, da det kører som er recirkuleringsloop. De 0,55 Nm^3 CH_4/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 3. Forøget gasudbytte ved behandling af biomasse med Disruptor

Forud for testen i Foulum blev Disruptoren afprøvet hos Ribe Biogas. Her var der problemer med at der blev presset gylle ind i motorhuset, formentlig fordi trykket var for højt i det setup den var installeret i. Selve effekten af behandlingen var man dog tilfreds med. Hos Vestjysk Biogas har man i et år gjort gode erfaringer med Disruptoren. Anlægget tilføres dagligt 300 ton biomasse, hvoraf ca. 100 tons er faste biomasser og 65 tons er dybstrøelse. Anlægget kører seriedrift med 60 dages opholdstid og ca. 9,5 % TS i den primære reaktor. Disruptoren er monteret i et loop fra primærreaktoren og den behandlede biomasse føres til en PreMix, hvor den blandes med indkommende fast biomasse, som efterfølgende pumpes ind i reaktoren. Man har ikke specifikt mål for effekt på gasudbyttet, hvilket er svært at vurdere i et fuldskalaanlæg, men har klare indikationer på at biomassen er lettere at håndtere i pumpesystemet. Der er en del slid på knivene, især spidserne, men man skifter nu 3 af 6 knive for hver 3 uger med godt resultat. Alt i alt er man her godt tilfreds med Disruptoren.

Økonomi

Elforbruget i Disruptoren er ca. 8,5 kwh med en dosering på ca. 4 m^3/h. Kapaciteten er imidlertid langt større og der vil kunne behandles ca. 30 m^3/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.

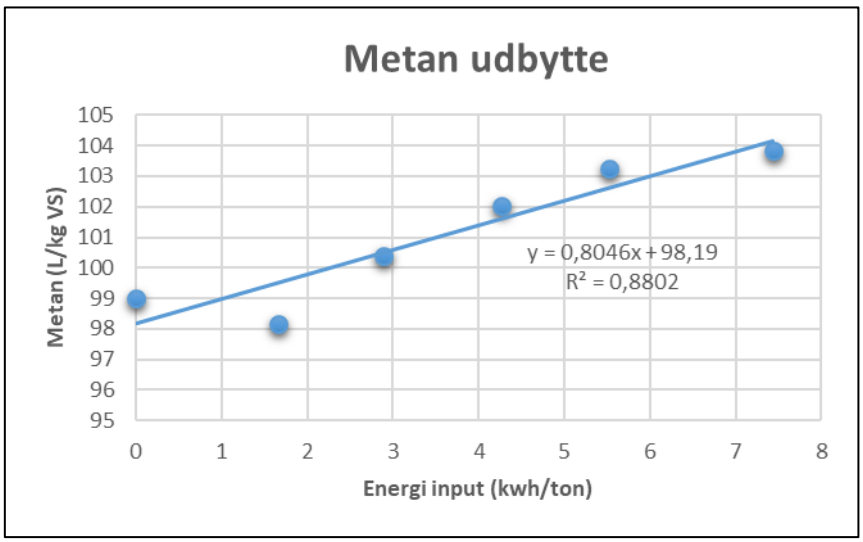
5.2 Ultralyd

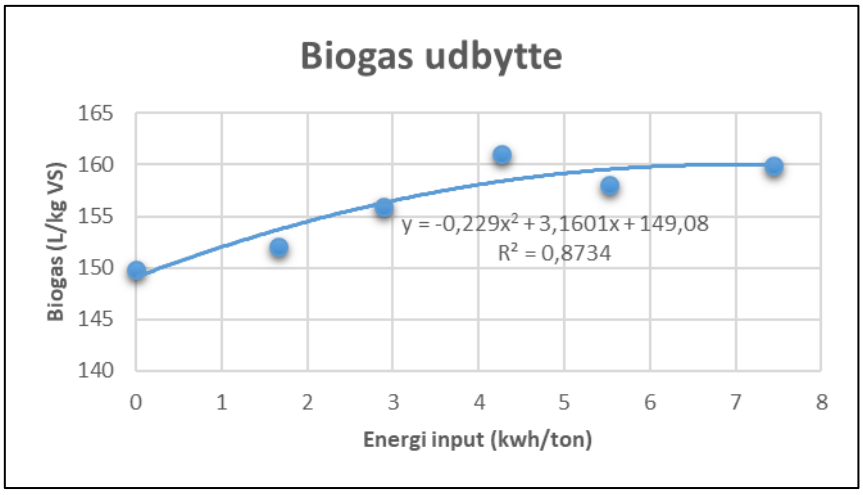
Ved ultralydsteknologien sker der en disintegration af organisk materiale ved omdannelse af elektriske svingninger til mekaniske vibrationer. Disse vibrationer overføres til det omgivende medium ved hjælp af en sonotrode. Ultralydsfrekvensen forårsager høje positive og negative trykfaser. Denne proces 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 1/12-2020 på biogasanlægget i Foulum. Ultralydssystemet er monteret på et recirkuleringsloop på reaktoren (figur 4). Ultralydssystemet har kørt med ca. 1,5 m^3/time svarende til ca. 36 m^3/døgn. Med en daglig tilførsel til anlægget på ca. 90 m^3/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 4. Ultralydsinstallation på Forskningscenter Foulum.

Der er i forsøg målt et ekstra gasudbytte ved forskellige energiinput og resultaterne fremgår af figur 5. 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 Nm^3/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.



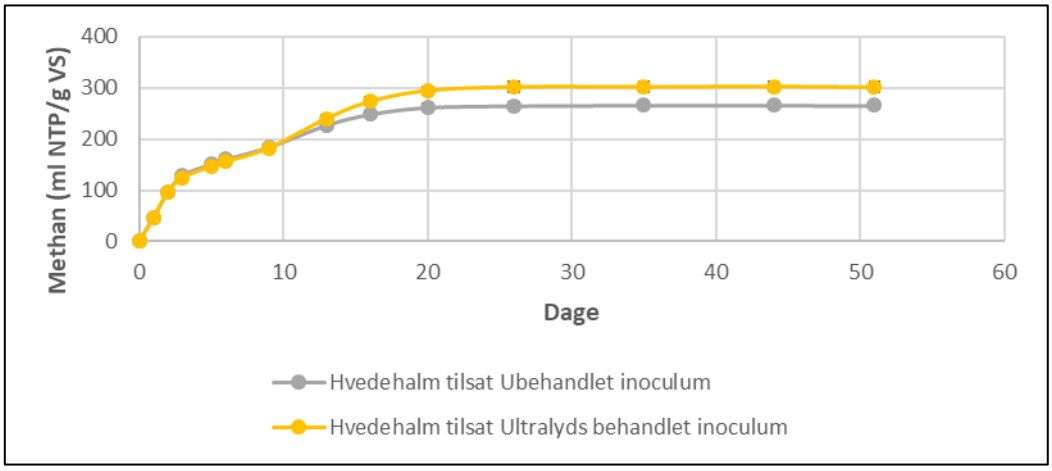


Figur 5. Ekstra gasudbytte ved behandling med ultralyd ved 30 dages biogasomsætning.

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 6. 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 cellelyse. Uafhængigt af årsagen er dette et interessant resultat med potentiale til at forbedre gasudbyttet af halm og det vil indebære at metan udbyttet af halm kan øges ved at ultralydsbehandle biomassen i reaktoren hvortil halmen tilføres.

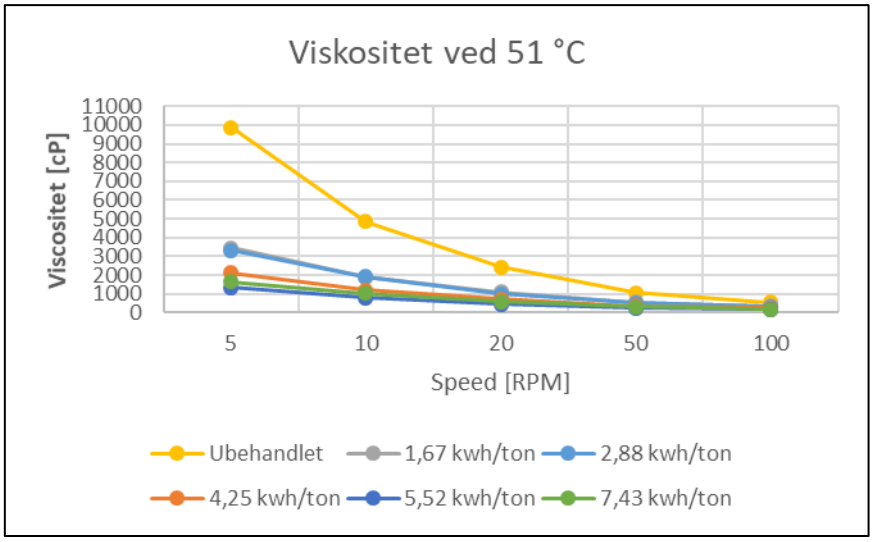
Den tyske producent af ultralydsudstyret har solgt mere end 100 anlæg rundt om i verden.

Et anlæg nær den danske grænse, Großenwiehe GmbH & CO, som fødes med 100% faste substrater og ingen gylle. Her har man kørt med ultralydsbehandling i 2 år med mærkbar effekt på sænkning af viskositeten, ligesom man også mener at kunne se en positiv effekt på gasproduktionen.



Figur 6. Ekstra gasudbytte ved behandling med ultralyd ved 30 dages biogasomsætning.

Viskositeten ved ultralydsbehandling ved forskellige intensiteter fremgår af figur 7. Viskositeten reduceres betydeligt ved alle hastigheder og det fremgår at ved at øge intensiteten af ultralydsbehandlingen reduceres viskositeten.



Figur 7. 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 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.

I slutningen af forsøgsperioden blev der udført et parallelt forsøg med ultralydsbehandling af biomasse fra 4 anlæg. De testede anlæg var Månsson, Ausumgaard, Videbæk og Foulum. Data fra de 4 anlæg fremgår af nedenstående tabel.

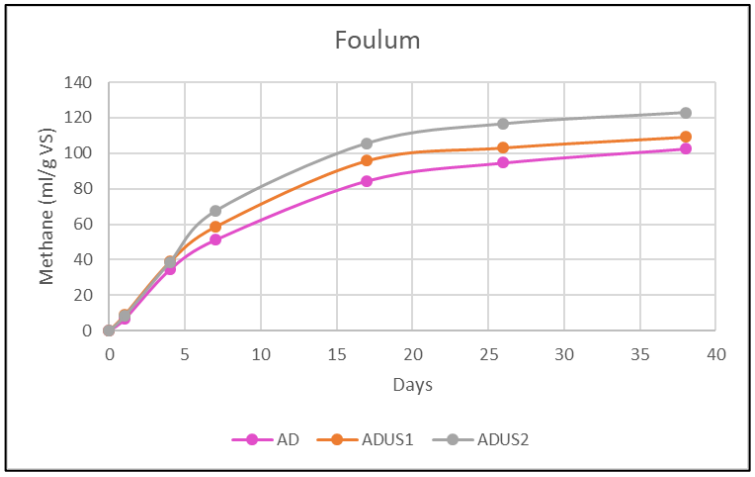
Tabe 1: Nøgletal for anlæggene der deltog i test.

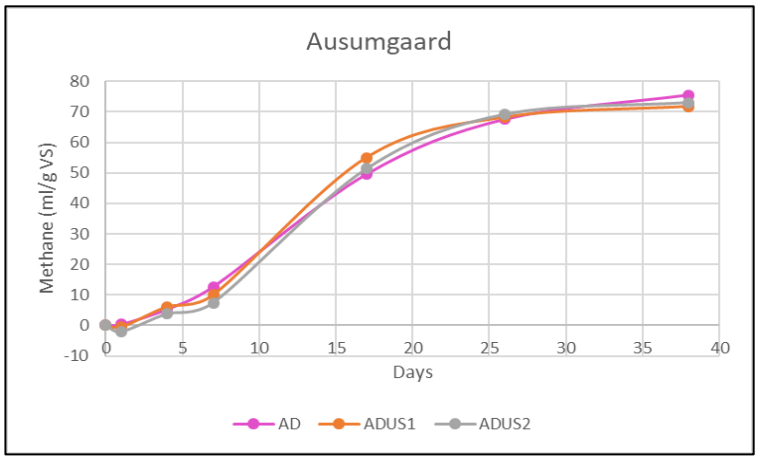
	1. Videbæk	2. Månsson	3. Foulum	4. Ausumgaard Biogas
Reaktor konfiguration	Serie	Serie	Enkelt (i 2021 serie)	Serie
Samlet opholdstid	28 dage	53 dage	Ca. 14 (i 2021 udvidet til 45)	70-80 dage i alt.
Opholdstid af gylle der behandles med Ultralyd/elektrokinetisk disintegration	23 dage	38 dage	14 dage	35 dage
Udtagning af prøver til test	Bund	Bund	Top	Bund
Temperatur i reaktor	51°C /51°C	51/51°C	Ca. 52°C	51,6-51,7°C i de tre hovedreaktorer og ca. 46-47°C i de to slavetanke.
Tørstofindhold i reaktor (%)	7,34	8,06	7,26	9,30
VS indhold i reaktor (%)	5,24	5,50	5,74	6,96
Gylletype og gylleandel (% friskvægt af samlet råvaremængde)	Kvæggylle og svinegylle.	Kvæggylle og svinegylle.	Kvæggylle 75%.	Gylle, vaskevand, vand fra ensilagepladser. I alt ca. 55%.
Typer af fast biomasse inkl. halm (% friskvægt af samlet råvaremængde)	Ca. 25 % Dybstrøelse Græs Majs	Ca. 35 % Dybstrøelse Græs, majs Hønsemøg	Dybstrøelse ca. 8%. Tungtomsætteligt græs og halm ca. 16%	I alt ca. 45%. Dybstrøelse fra kvæg (ca. 10%), ensileret frøgræshalm og slætgræs (ca. 20% i alt), halmpiller (ca. 3%), havreskalmel (ca. 5,5%), hønsemøg (ca. 3%) mv.

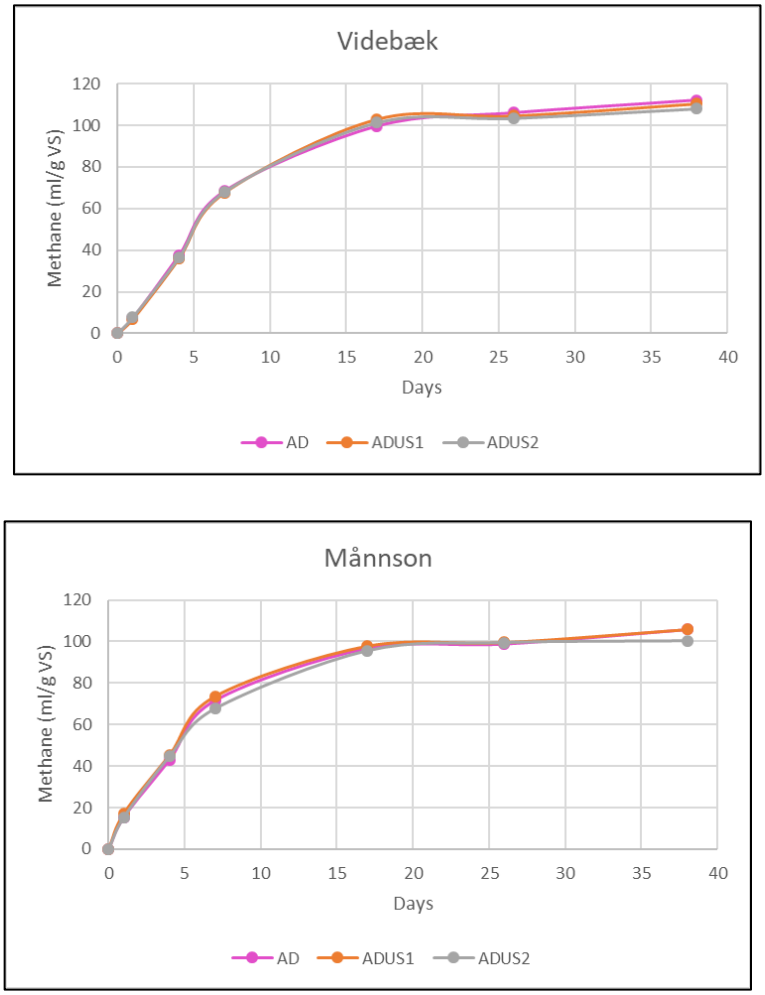
Der blev anvendt 2 intensiteter af behandlingen på hhv. 2,88 og 4,25 kwh/ton. Resultaterne af forsøget fremgår af figur 8.
Det fremgår at det kun er anlægget på Foulum der har en positiv effekt ved ultralydsbehandling i det gennemførte forsøg og at det ikke har været muligt at påvise en positiv effekt på de øvrige anlæg. Der kan imidlertid ligge noget i det forhold, at Foulumanlægget anvender 1-trins udrådning med kort opholdstid, hvorimod de øvrige anlæg anvender serieudrådning med længere opholdstid, hvorved biomassen alt andet lige er bedre udrådnet, da der i forsøgende blev anvendt afgasset biomasse fra disse anlæg, men reaktorindhold fra Foulumanlægget.

Biomassen fra Månsson, Ausumgaard, Videbæk blev transporteret til Foulum i tankbiler der medbragte ca. 36 m^3. Ved ankomst til Foulum blev biomassen pumpet i en buffertank på ca. 10 m3 hvorefter det blev tilført ultralyd enheden. I forbindelse med transport og behandling i ultralyd enhed af afgasset gylle der er pumpet fra eksterne biogasanlæg, er der sket et vist temperaturfald på 2-4°C. I forbindelse med testen af afgasset gylle blev gyllen pumpet direkte fra reaktoren og igennem ultralyd enheden.

Det er uklart hvorfor der er opnået en ekstra effekt for anlægget i Foulum men ikke for de øvrige anlæg. Det kan ikke udelukkes at der er sket en vis ændring som følge af beluftning ved pumpning som transport ligesom temperaturfaldet kan have haft indflydelse på dette. Substrat sammensætning kan ligeledes være en del af forklaringen hvor anlægget i Foulum behandler en del græs og halmrige biomasser men Ausumgaard ligger generelt højere end Foulum i andelen af fast biomasse. En faktor der er meget forskellig på anlægget i Foulum i forhold til de øvrige anlæg, er viskositeten, der er omkring en faktor 10 højere end for de andre anlæg. Der er således noget der tyder på at effekten af ultralyd vil være højere desto højere viskositet, der er i biomassen men det uklart hvad der gør at viskositeten er langt højere i Foulum i forhold til de øvrige anlæg.

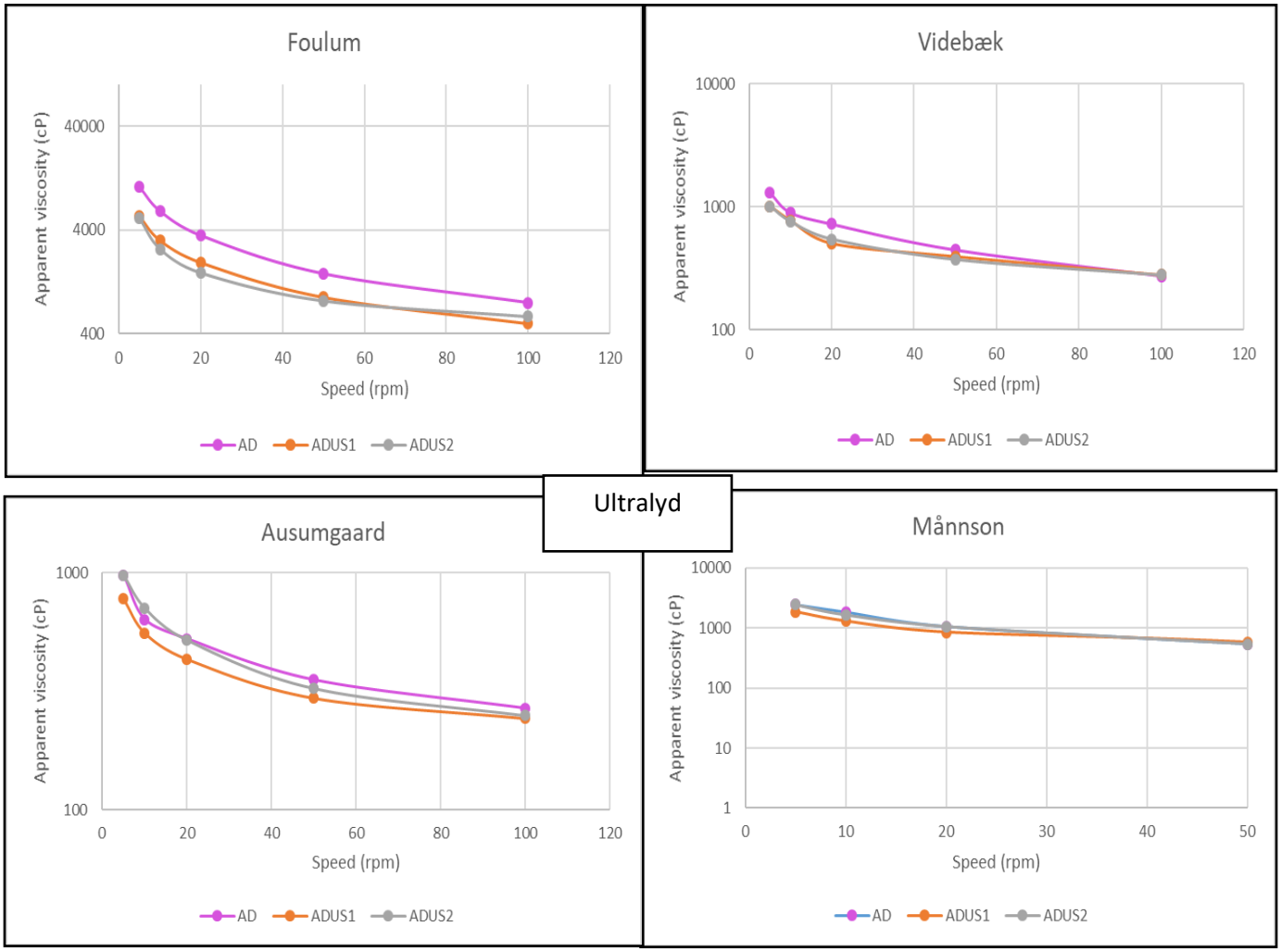






Figur 8. Metan udbytte i ubehandlet afgasset biomasse (AD) og ultralydsbehandlet afgasset biomasse ved hhv. 2,88 og 4,25 kwh/ton (ADUS1 og ADUS2).

Viskositeten fra de 4 anlæg før og efter ultralydsbehandling fremgår af figur 9.



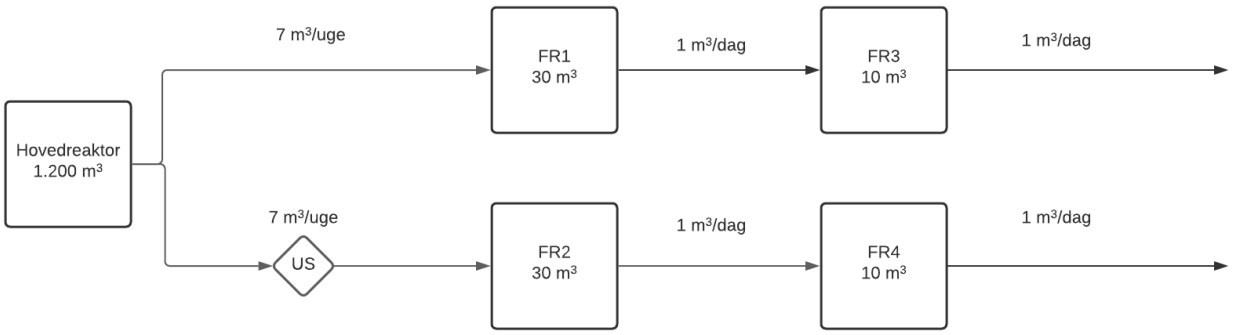
Figur 9. Viskositet i ubehandlet afgasset biomasse (AD) og ultralydsbehandlet afgasset biomasse ved hhv. 2,88 og 4,25 kwh/ton (ADUS1 og ADUS2)

På anlægget i Foulum er der påvist et ekstra gasudbytte på hhv. 6,6 og 19,9% ved et energiinput på hhv. 2,88 og 4,88 kwh/ton biomasse i forhold til ubehandlet. Dette svarer til at der kan opnås et ekstra gasudbytte på 1,4 m3 CH4/ton med et energiinput på 4,25 kwh/ton. Hvis Foulum anlægget anvendte ultralyd vil det betyde et ekstra gasudbytte på 30.000 m3 CH4/år svarende til en ekstra indtægt på 160.000 kr/år. Elforbruget ville være ca. 80.000 kwh/år svarende til en udgift på ca. 50.000 kr/år.

Udover det ekstra gasudbytte opnås der en meget stor sænkning af viskositeten, der kan have en række positive gevinster på driften i form af mindsket behov for omrøring, lettere pumpning mm. Endvidere vil en lavere viskositet betyde at der kan anvendes større mængde tungt nedbrydelig biomasse.

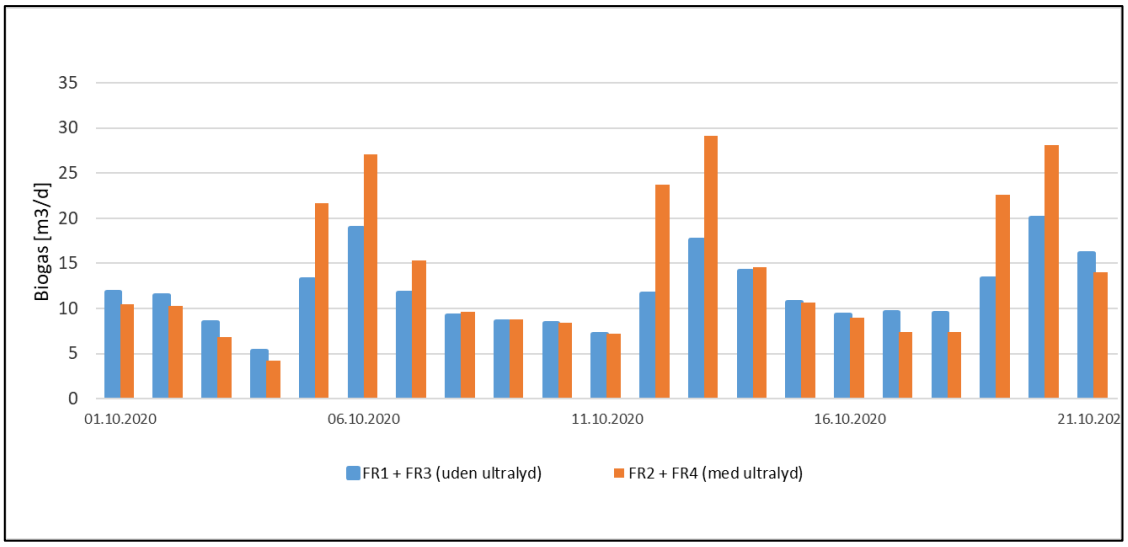
Forsøgene med test i batch er suppleret med kontinuerte forsøg i pilot skala på anlægget i Foulum. Pilotforsøget blev udført i fire CSTR, hvor forsøgsreaktor 1 (FR1) og 2 (FR2) blev født med 7 m^3 substrat fra hovedreaktoren en gang om ugen. Forsøgsreaktor 3 (FR3) og 4 (FR4) er mindre reaktorer og blev født med 1 m^3 om dagen fra henholdsvis FR1 og FR2. Inden start af eksperimentet blev FR1 og FR2 fyldt op med 30

m^3 ubehandlet og ultralyds behandlet substrat fra hovedreaktoren. Fra 28/9 startede eksperimentet, hvor FR2 blev fyldt med 7 m3 behandlet substrat med et US energi-input på 2,9 kWh/t fra hovedreaktoren. FR2 og FR4 indeholdt således US-behandlet substrat, og det gjorde FR1 og FR3 ikke. Udrådningen foregik termofilt ved en temperatur på 51 °C i 6 uger**.** Den gennemsnitlige opholdstid for FR1 og FR2 var 30 dage, og for FR3 og FR4 var HRT 10 dage. En oversigt over forsøgsopstillingen kan ses i figur 10.



Figur10: Oversigt over opstillingen af pilotforsøget med tilhørende fødestrømme.

For pilotforsøget er der aflæst 3 ugers biogasproduktion fra 1.-21. oktober fra de 4 forsøgsreaktorer. Der har kun været to gasmålere til rådighed, og derved er gasmålingerne for reaktorerne koblet i serie. FR2 + FR4 er koblet sammen og FR1 + FR3 er koblet sammen, så der fås et akkumuleret biogasudbytte fra de to reaktorer med US-behandling og de to reaktorer uden US-behandling. Resultaterne er præsenteret i nedenstående figur 11.



Figur11: Biogasudbytte pr. døgn for forsøgsreaktorerne koblet i serie fra 1/10-21/10. FR1 + FR3 er koblet sammen, og FR2 + FR4 er koblet sammen. Det akkumulerede biogasudbytte fra disse er angivet i y-aksen.

Grafen i figur 11 viser, at der generelt produceres højere mængde biogas fra substraterne i FR2 + FR4. Der er gennemsnitligt produceret 9,6% mere biogas over hele perioden for FR2 + FR4 sammenlignet med FR1 + FR3. En t-test viser signifikant forskel mellem substraternes biogasproduktion ($p = 1{,}29 \cdot 10^{-13}$). Det observeres ud fra grafen, at der produceres høje mængder biogas ved punkterne 5/10, 12/10 og 19/10 og 1-2 dage frem ved de respektive datoer. Dette skyldes, at der ved disse datoer tilføres 7 m^3 substrat fra hovedreaktoren til forsøgsreaktorerne, og dermed er gasdannelsesraten højere de pågældende dage. Fra den 16/10 og frem observeres en stigende tendens for biogasudbyttet fra FR1 + FR3.

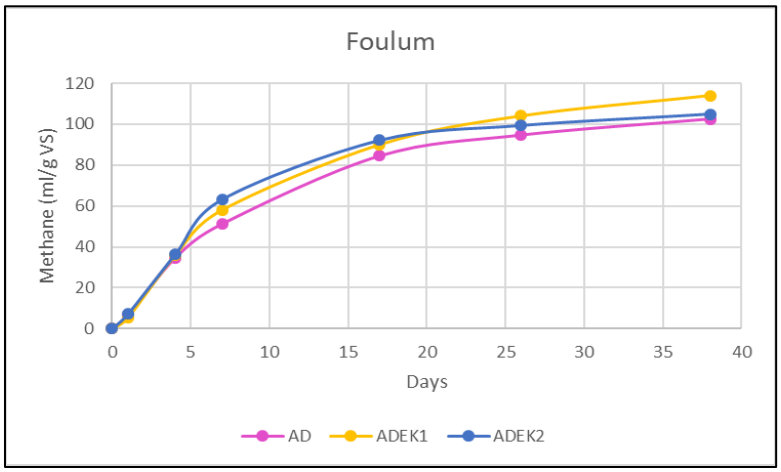
4.3 Biocrack II

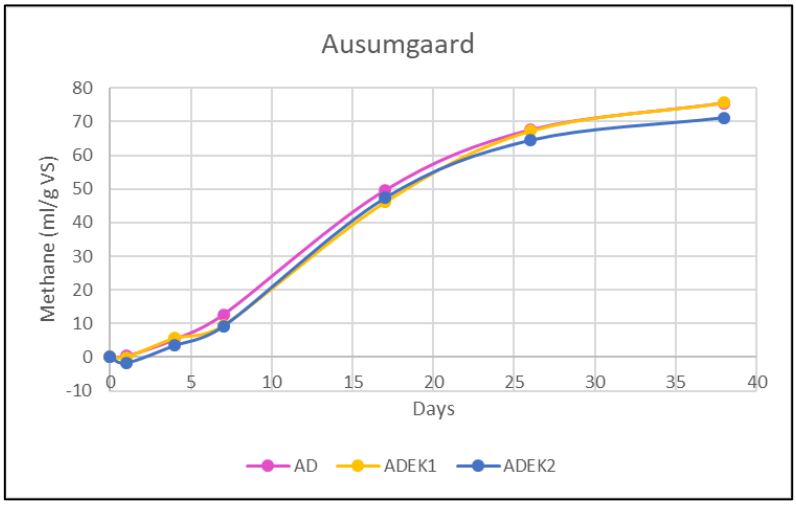
Ved Biocrack teknologien sker der en elektrokinetisk disintegration af organisk materiale i et meget kraftigt spændingsfelt. Den afprøvede teknologi er udviklet af det Tyske firma Vogelsang.

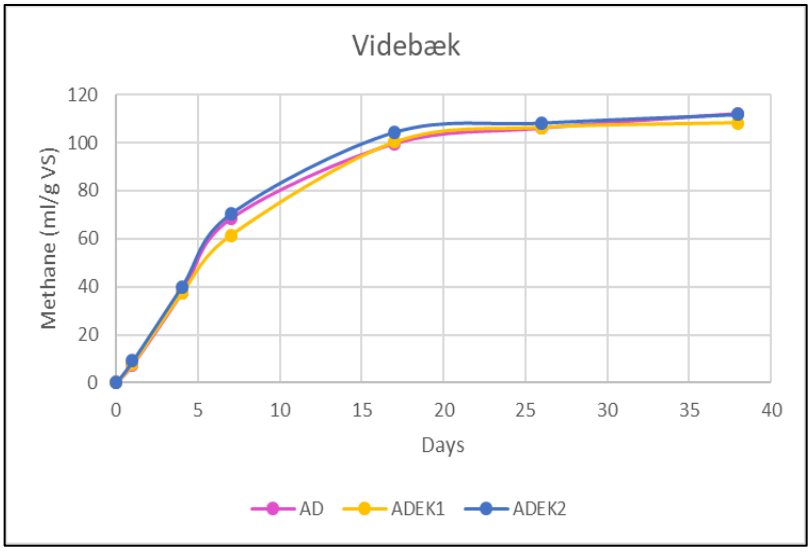
Der er kørt forsøg med ultralyd i perioden 1/12 2020 til 1/2-2021 på biogasanlægget i Foulum. BioCrack systemet er monteret på et recirkuleringsloop på reaktoren. Anlægget har fungeret stabilt uden væsentlige drifts problemer.

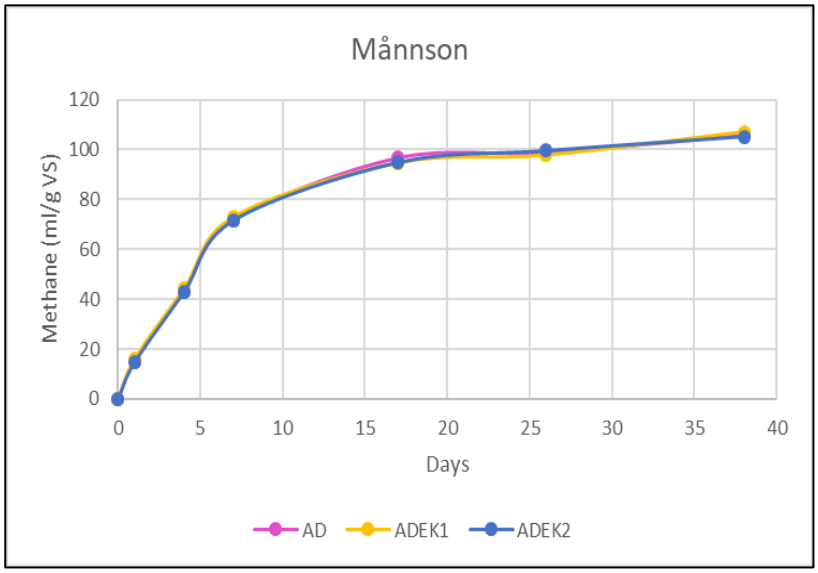
Figur 12. Elektrokinetisk disintegration på Forskningscenter Foulum.

Der er udført forsøg med Biocrack på afgasset biomasse fra Foulum, Videbæk, Ausumgaard og Månsson. Der blev anvendt 2 intensiteter af behandlingen på hhv. 4,37 og 6,06 kwh/tons der dækker energiforbruget til elektrokinetik, pumpe og Rotacut. Selve den elektrokinetiske integration bruger kun ca. 0,3 kwh/ton. Resultaterne af forsøget fremgår af figur 13.
Det fremgår at det kun er anlægget på Foulum der har en positiv effekt ved elektrokinetisk disintegration og at det ikke har været muligt at påvise en positiv effekt på de øvrige anlæg.


Foulum
Methane (ml/g VS)
120
100
80
60
40
20
0
0
5
10
15
20
25
30
35
40
Days
AD
ADEK1
ADEK2

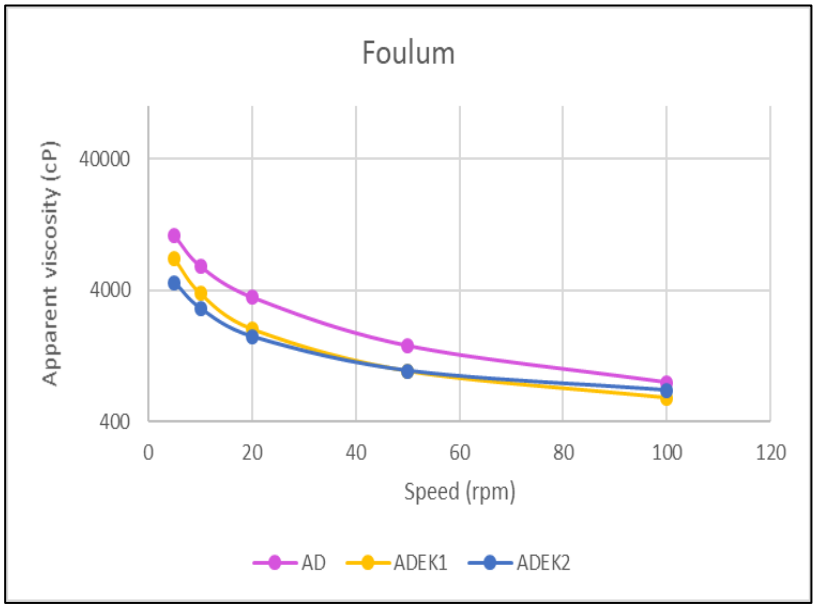

Ausumgaard
Methane (ml/g VS)
80
70
60
50
40
30
20
10
0
-10
0
5
10
15
20
25
30
35
40
Days
AD
ADEK1
ADEK2

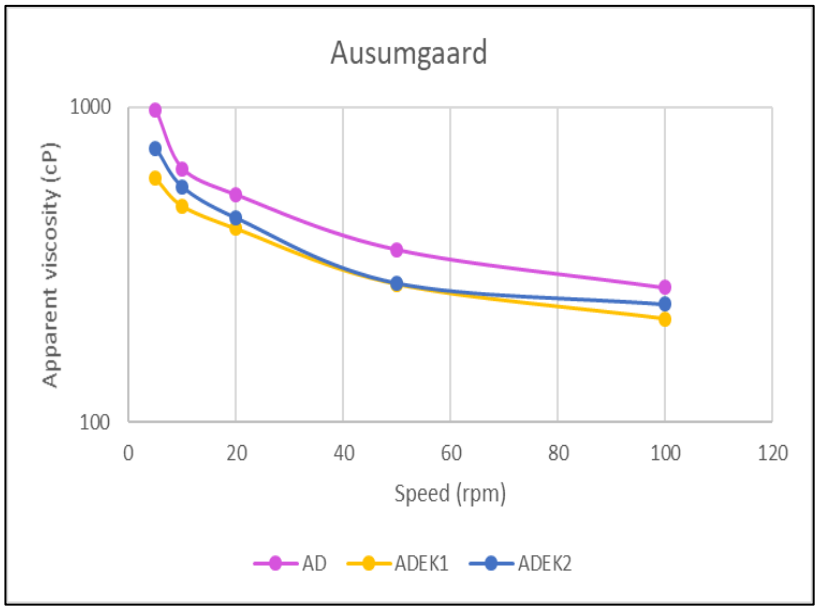

Videbæk
Methane (ml/g VS)
120
100
80
60
40
20
0
0
5
10
15
20
25
30
35
40
Days
AD
ADEK1
ADEK2

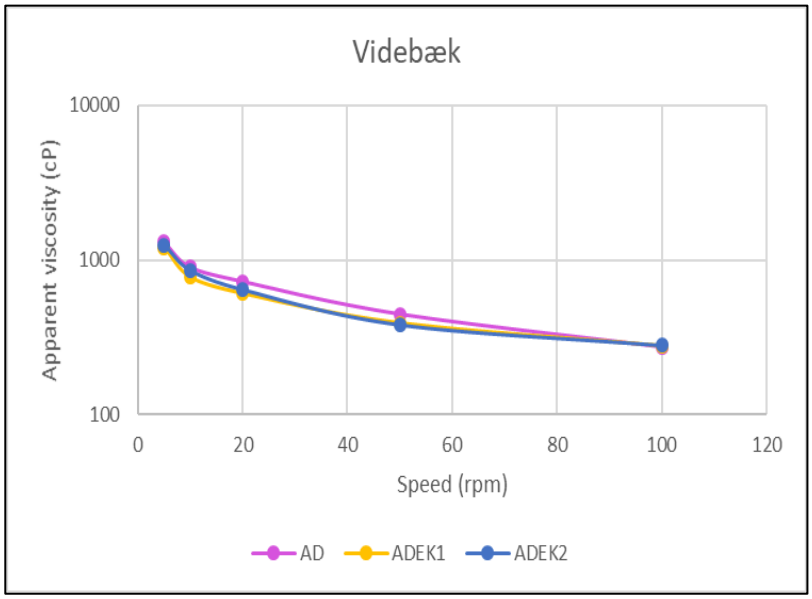


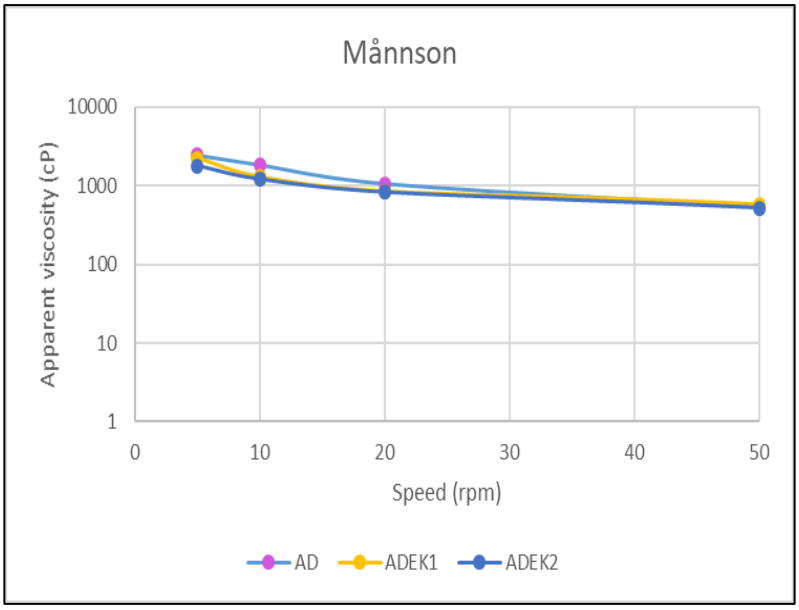
Figur13. Metan udbytte i ubehandlet afgasset biomasse (AD) og afgasset biomasse behandlet med Biocrack ved hhv. 2,88 og 4,25 kwh/ton (ADEK1 og ADEK2).

Viskositeten fra de 4 anlæg før og efter elektrokinetisk disintegration fremgår af figur 14. Foulum anlægget har som udgangspunkt en langt højere viskositet end de øvrige anlæg og at der er en stor effekt af behandlingen.




Ausumgaard
Apparent viscosity (cP)
1000
100
0
20
40
60
80
100
120
Speed (rpm)
AD
ADEK1
ADEK2


Videbæk
Apparent viscosity (cP)
10000
1000
100
0
20
40
60
80
100
120
Speed (rpm)
AD
ADEK1
ADEK2



Figur14. Viskositet i ubehandlet afgasset biomasse (AD) og afgasset biomasse behandlet med Biocrack ved hhv. 2,88 og 4,25 kwh/ton (ADEK1 og ADEK2).

På anlægget i Foulum er der påvist et ekstra gasudbytte på 4,1 og 16,1% i forhold til ubehandlet. Dette svarer til at der kan opnås et ekstra gasudbytte på 0,94 m3 CH4/ton med et energiinput på 4,37 kwh/ton.

Hvis Foulum anlægget anvendte elektrokinetisk integration vil det betyde et ekstra gasudbytte på 18.800 m^3 CH_4/år svarende til en ekstra indtægt på 112.800 kr/år. Elforbruget ville være ca. 87.400 kwh/år svarende til en udgift på ca. 52.000 kr/år.

Udover det ekstra gasudbytte opnås der en sænkning af viskositeten der kan have en række positive effekter i form af mindsket behov for omrøring, lettere pumpning mm.

4.4 AST

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 driftsperiode 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. Tidligere udførte undersøgelser har vist større effekt på hvedehalm og frøgræshalm på op til 30% over 60 dages biogas proces ligesom hastigheden for omsætningen har været langt hurtigere. I frøgræshalm er der således opnået det samme udbytte ved 17

dage for det grindede som ellers ville tage 30 dage. Kombinationen af grinding og ammoniak behandling har ligeledes vist en meget positiv effekt på svinegylle opblandet i savsmuld på ca. 40%.

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 15), hvor sten, metal og lignende sorteres fra. Endelig går biomassen via fødekasse til grinderen (figur 16) hvor biomassen under tryk macereres, neddeles og åbnes for sluttelig med transportbånd at blive læsset direkte uden yderligere håndtering i walking floor containere - klar til levering og direkte indfødning i biogasanlæg.

Figur 15. Neddeling og tilførsel af biomasse

Figur 16. 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 Samensilering. Alle biomasser blev neddelt 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 17. 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.

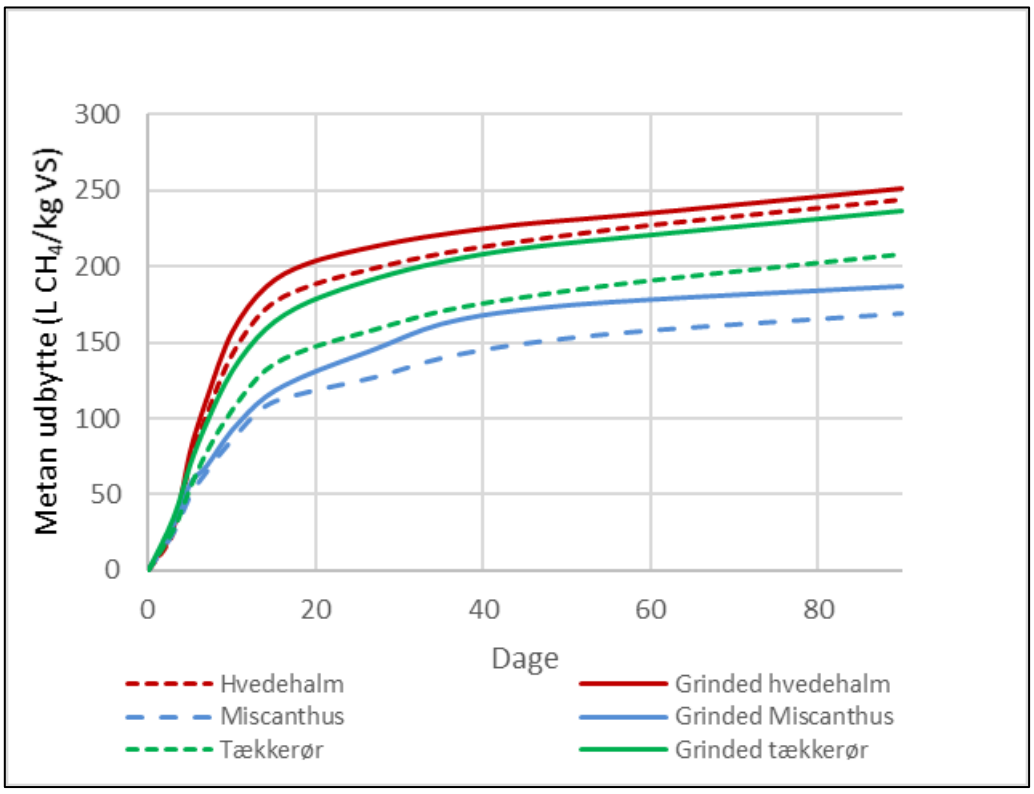
Tabel 2. Karakteristika for substrater i forsøget i Skanderborg

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

* Anvendt som substrat til samensilering

Metan udbytter

Der er udført biogas batch-test ved termofil temperatur (51 ° C) i 90 dage. Det akkumulerede metan udbyttet fra neddelt og grindet biomasse er illustreret i figur 19.



Figur 18. CH_4 udbytte af neddelt og grindet 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 registeret:

- 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 19. Biomasse før (venstre) og efter grinding (højre)

Indholdet af tørstof og organisk tørstof før og efter grinding er vist i tabel 3.

Tabel 3. TS og VS I hestegødning, halm og blanding af hestegødning og halm

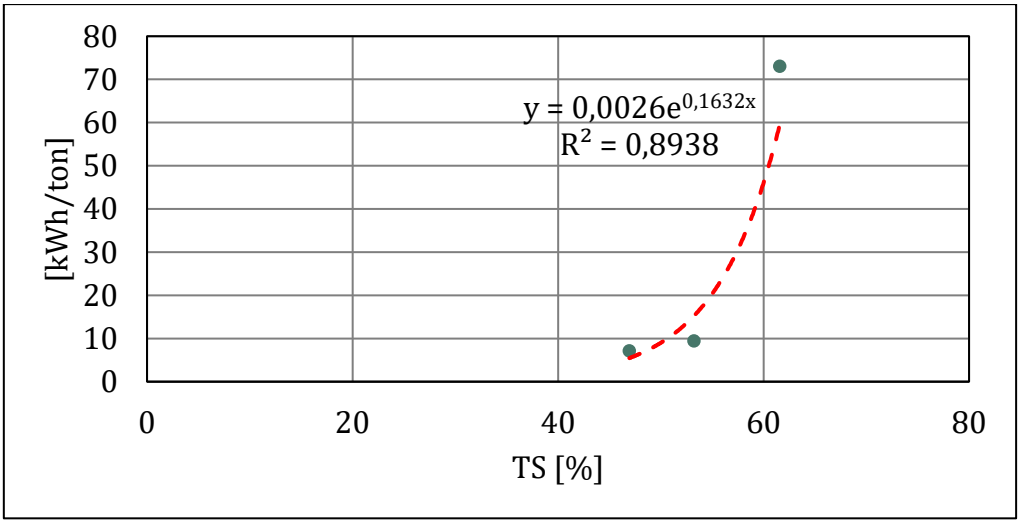
Biomasse	Mængde [ton]	Neddelt		Grinded	
		TS [%]	VS [%]	TS [%]	VS [%]
Hestegødning	6	44.39	38.49	46.94	36.77
Hestegødning + halm	13	49.6	43.3	53.22	45.97
Halm	1.15	73.86	68.36	61.58	54.87

Energiforbruget til behandling af hver type biomasse er vist i tabel 4. Energiforbruget til behandling af halm var 5 gange større end det, der kræves til hestegødning.

Tabel 4. Energiforbrug

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

I figur 20 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 20. Energi forbrug som funktion af tørstofindhold [%].

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

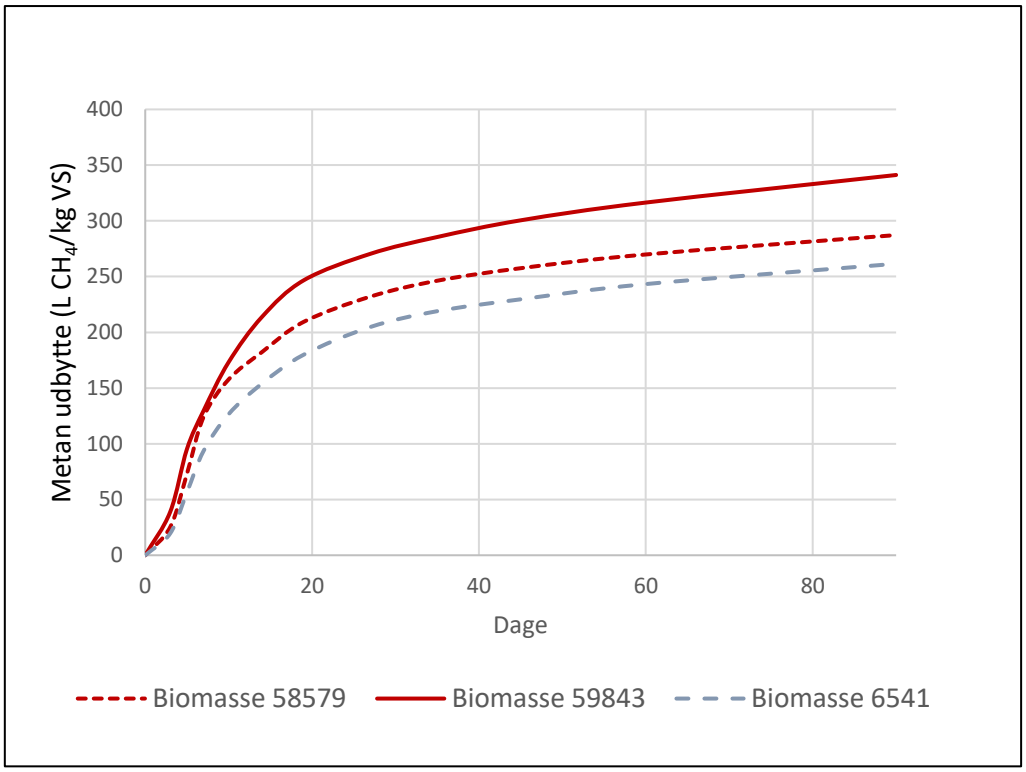
De anvendte biomasser var komprimeret (vådt) halm i bigballer, wrap baller, hestemøg, havreskalmel, gulerodshalm og græs. Den relativ store variation i VS af TS – 72,4% i juli 2019 og 92,0% i september 2018 –

skyldes miks af biomasser og andel af biomasser, der har ligget på "lager" og "tabt" en del af det let omsættelige tørstof.

Der blev gennemført udrådningsforsøg løbende af Bevtoft Biogas med anvendelse af inoculum 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 udrådningsforsøg på AU-Foulum med inoculum fra deres anlæg og med grindet biomasse svarende til 50% på tørstofbasis.

Resultaterne af testene (GVS-40) varierede meget (242 til 282 for AU-Foulum og 284 til 323 for Bevtoft Biogas). Gennemsnittet for testene gav 288 m^3 metan pr ton VS (40 dage)

Til anskueliggørelse af gasudviklingen over tid er resultaterne fra test på AU-Foulum vist i figur 21.



Figur 21. CH_4 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 m^3 metan pr ton VS svarende til en samlet gasproduktion på 1,8 – 1,9 mio. m^3 metan eller 130 – 140 m^3 metan pr ton leveret.

Hos Lynggaard Biogas ved Præstø kører nu to systemer til neddeling af halm. Den ene linje er med en hammermølle til tør halm, og den anden linje med en neddeler af AST typen, der anvendes til neddeling af våd halm. Her er erfaringen den, at systemet fungerer godt når vandindholdet er 30% eller derover.

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 m^3 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 m^3 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.

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
El-forbrug pr ton +/-10 Kwh

6. Økonomisk perspektivering

Projektet har understreget hvor omfattende og krævende det er at teste nye teknologier i fuld skala. Planen var at teste hver type udstyr i en periode på forsøgsanlægget i Foulum. For de forskellige typer udstyr blev der udført forsøg hvor reaktoren blev kørt uden behandling efterfulgt af en periode med de forskellige typer udstyr. Dette blev gennemført under de tidsmæssige rammer, der var til rådighed, men selvom det var muligt at ændre på fx elforbruget undervejs, var der ikke tid til at prøve udstyrets grænser ved eksempelvis at ændre tørstofindholdet i den behandlede gylle. Derfor viser resultaterne en form for øjebliksbillede, for den specifikke biomasse, der blev behandlet på det givne tidspunkt, med det givne tørstofindhold. Derfor var det også godt, at der mod slutningen af projektet viste sig muligt at gennemføre parallelle forsøg med ultralydsbehandlingen og elektrokinetisk disintegration på afgasset gylle fra biogasanlæggene på Ausumgård, Månsson og Nature Energy Videbæk, hvilket har bidraget væsentligt til læringen fra projektet. Anlægget i Foulum kører med en relativt høj andel af halm og en ret kort opholdstid som kan have være medvirkende til at der blev fundet de største effekter af behandlingen på dette anlæg, både mht. øget gasudbytte og sænkning af viskositeten. Det er imidlertid lidt ærgerligt for vurderingen af resultaterne, at den halm der tilsættes anlægget er forbehandlet i en ekstruder, hvorved effekten af de andre behandlingsteknologier med stor sandsynlighed er undervurderet i projektet. Tidligere forsøg har vist at ekstrudering af halm kan øge gasudbyttet med ca. 20 %. Når halmen således er forudgående ekstruderet, er der så at sige mindre for de tre "in-line" teknologier at gøre godt med. Havde halmen ikke været ekstruderet ville det øgede gasudbytte givetvis være højere, dog kan man nok ikke lægge forskellen oveni 1:1. De tre nævnte anlæg, hvorfra reaktorgylle blev testet på med ultralyd og elektrokinetisk disintegration anvendes imidlertid ikke ekstrudering eller anden hårdhændet forbehandling. Ikke desto mindre viste resultaterne meget begrænset effekt på gasudbyttet, hvilket må siges at være en overraskelse. Forklaringerne herpå skal formentlig findes i forskelle i biomassesammensætningen, og det at de pågældende anlæg har en betydeligt længere opholdstid end Foulumanlægget, hvorfor biomassen sandsynligvis er bedre udrådnet før den forlader reaktorsystemet ligesom den er udrådnet ved seriedrift.

Tabel 5. Fundne merudbytter

Behandlingsteknologi	Foulum %	Afgasset gylle fra Ausumgård, Månsson, Videbæk %
Disruptor	4,9	Ej testet
Ultralyd	6-19,9	Ingen effekt påvist
BioCrack II	4,1-16,1	Ingen effekt påvist
AST Grinder	3-13	Ej testet

For de to teknologier der blev testet både på afgasset biomasse fra Foulum og fra de tre andre anlæg er effekten på gasudbyttet klart størst for Foulum, hvilket kan tilskrives den høje halmandel og den korte opholdstid men andre forhold som hvor i reaktoren biomassen er udtaget kan også spille en rolle. Variationen i resultaterne skyldes at de er fundet ved forskellige behandlingsintensiteter, altså ved forskellige energiinput. Resultaterne skal ligeledes vurderes med det i mente, at halmdelen i Foulum allerede har været gennem en ekstruder. Det er naturligvis vanskeligt at vurdere, hvor meget højere effekten af behandlingerne ville have været uden den forudgående ekstrudering af halmen. Men alt andet lige vil den givetvis være højere. Omvendt ville Foulumanlægget næppe kunne håndtere den høje halmdel

uden ekstruderen, og hvis halmdelen var lavere, ville effekten af behandlingsteknologierne med stor sandsynlighed også være lavere

De testede maskiner blev ikke forudgående designet og optimeret i forhold til den kapacitet de skulle testes ved. Det er en af grundene til at der ikke meningsfyldt kan udføres en sammenlignelig rentabilitetsanalyse for de fire testede teknologier. Det bedste råd må derfor være at tage udgangspunkt i et konkret tilbud fra leverandøren af den teknologi man er interesseret i, og som er tilpasset den konkrete behandlingskapacitet udstyret skal dimensioneres til. Anskaffelsespriser for de testede maskiner er anført i nedenstående tabel 6.

Tabel 6. Investeringer

Behandlingsteknologi	Anskaffelsespris, ca. kr.
Disruptor	300.000
Ultralyd	1.000.000
BioCrack II	600.000 - 700.000
AST Grinder	7.200.000

Anskaffelsespriserne er vist for maskinerne som de forefandtes, og kan af flere grunde ikke sammenlignes direkte da de ikke er tilpasset kapaciteten og i øvrigt udfylder forskellige funktioner på anlægget. De tre in-line teknologier forudsætter udstyr, der håndterer biomasserne, så de kan komme ind i anlægget, som nævnt er Vogelsangs PreMix et udbredt koncept til dette. AST grinderen er en alternativ teknologi til dette, som neddeler den faste biomasse, hvorefter den nemmere kan røres op og pumpes ind i biogasanlægget.

Tabel 7. Energiforbrug ved de anvendte teknologier. [1]Eksklusiv pumpe og rotacut.

Behandlingsteknologi	Energiforbrug
Disruptor	3,5 kwh/ton biomasse
Ultralyd[1]	2,9-4,3 kwh/ton biomasse
BioCrack II	4,4-6,1 kwh/ton biomasse
AST Grinder	+/- 10 kwh/ton afhængigt af tørstofindhold

Energiforbruget er opgjort for de testede maskiner. Men for at få det fulde billede skal man også se på forbruget før og under indpumpningen i anlægget, fx Premix eller andet, der er en forudsætning for at in-line teknologierne kan fungere.

For gylle behandlet med ultralyd og BioCrack II blev der målt på ændringer af viskositeten, dvs. hvor tykt eller tyndtflydende den behandlede gylle efterfølgende er. Disse målinger blev gennemført på Foulumgylle og afgasset gylle fra de tre nævnte anlæg.

Tabel 8. Effekt på viskositet

Behandlingsteknologi	Effekt på viskositet
Disruptor	Ej testet
Ultralyd	Stor
BioCrack II	Stor
AST Grinder	Ej testet

Som det er tilfældet med gasudbytterne, er den fundne behandlingseffekt på viskositeten langt den største på Foulum med den relativt høje halmandel. For gylle fra de tre andre anlæg var der også en effekt, blot betydeligt mindre. Som tidligere nævnt vil en lavere viskositet medføre lavere energiforbrug ved pumpning og omrøring, ligesom det sandsynligvis medfører lavere omkostninger til reparation og vedligeholdelse af pumper og omrørere. Der blev ikke målt på effekten på viskositet i biomasse behandlet med Disruptor og AST grinder. Det vurderes imidlertid sandsynligt, at disse behandlinger også har en effekt på viskositeten. Dette understøttes af udsagn fra Vestjysk Biogas, hvor erfaringen er at pumpningen, foregår mærkbart lettere når Disruptoren er i drift.
Der hvor den største økonomiske effekt af behandlingen kan opnås vil være i det omfang at den lavere viskositet muliggør håndtering af lidt større mængde tørstof i reaktorerne. I dag anvender mange anlæg i større omfang dybstrøelse, frøgræshalm og halm i forhold til tidligere. Et regneeksempel kan illustrere dette:

Et stort biogasanlæg, med en behandlingskapacitet på 1000 ton pr. dag behandler 950 ton gylle og 50 ton halm. I denne situation kan tørstofindholdet i den biomasse der tilføres reaktorerne være på ca. 10 %. Hvis dette anlæg, som følge af enten mekanisk behandling eller kavitation, og dermed sænket viskositet, kan tilføre blot 1 % mere tørstof svarende til ca. 10 ton halm/dag, kan følgende beregning foretages.

Tabel 9. Eksempel på potentiel gevinst ved effekt på lavere viskositet.

	Halmmængde	Gennemsnitligt methanudbytte	Merudbytte pr. dag	Merudbytte pr. år	Merværdi pr. år v. 6 kr/Nm3
10 % tørstof	50 tons	19,9 Nm3 CH4/ton			
11 % tørstof	60 tons	21,3 Nm3 CH4/ton	1500 Nm3 CH4	0,5 mio. Nm3 CH4	3 mio. kr

Den beregnede merværdi skal ses i forhold til hvad det koster at modtage den ekstra biomasse. Hvis det er dybstrøelse, der modtages gratis, skal der ikke fratrækkes noget, men hvis der er tale om indkøbt halm af prima kvalitet til 500 kr/ton skal der i princippet fratrækkes 1,8 mio. kr. i den beregnede merværdi.

7. Diskussion og konklusion

Det har været vanskeligt indenfor rammerne af projektet at gennemføre en fyldestgørende test af de valgte teknologier, der samtidig ydede dem fuld retfærdighed. Men sådan er det med fuldskalaafprøvning der er meget tidskrævende, og hver gang man ønsker at ændre en parameter kræves en længere forsøgsperiode. Samtidig er de testede teknologier ikke projekteret specifikt til Foulumanlægget, og dermed den testsituation de skulle fungere i. Derfor blev det i projektgruppen vurderet, at der ikke meningsfuldt kunne gennemføres sammenlignelige rentabilitetsanalyser, der ville yde de enkelte teknologier retfærdighed. Det blev derfor besluttet i stedet at perspektivere det økonomiske potentiale mere generelt med udgangspunkt i de fundne resultater.
Ikke desto mindre er testene forløbet ganske tilfredsstillende, og vigtig læring kan under alle omstændigheder uddrages af resultaterne.
Har man et biogasanlæg med en meget høj halmandel eventuelt kombineret med en relativt kort opholdstid vil alle de fire testede teknologier, med stor sandsynlighed kunne tjene sig hjem over en ret kort

årrække. Har man en lang opholdstid vil gevinsten være mindre udtalt, hvilket resultaterne fra testene på afgasset gylle fra Ausumgård, Videbæk og Månsson viser.
En ting er gevinsten på det gennemsnitlige gasudbytte, som kan være interessant i sig selv, noget andet er den sænkning af viskositeten som behandling med ultralyd og BioCrack II har vist sig at medføre. Muligheden for måling af effekt på viskositeten kom først på banen i den sidste del af testperioden, og derfor blev gylle behandlet med Disruptor og halm behandlet med en AST Grinder desværre ikke testet for denne effekt. Men det betyder ikke nødvendigvis at der ikke er en effekt.
En væsentlig sænkning af viskositeten kan sandsynligvis muliggøre håndtering af et højere tørstofindhold i reaktorsystemet end ellers. Og heri ligger et kolossalt økonomisk potentiale. En begrænset øgning af tørstofindholdet med 1 % i det indpumpede materiale kan således give 3 mio. kr. årligt på bundlinjen for et stort anlæg. Dog skal der i den forbindelse tages højde for omkostninger til evt. indkøb af den ekstra biomasse.

Danske forhandlere af det testede udstyr:

Disruptor og BioCrack II

Vogelsang-AS
Industriparken 2
6880 Tarm
Denmark
Email: nan@vogelsang-as.dk
Telefon 97 37 27 77
Mobil 29 68 55 86

Att: Niels Agergaard Nielsen

Ultralyd

C-biotech IVS
Fruebjergvej 3,
2100 København Ø

Email: info@c-biotech.com
Mobil 28 82 99 53

Att: Olav Csiky

AST

Advanced Substrate Technologies
Virkevangen 13
Assentoft
8960 Randers SØ

Email: hof@astech.dk
Mobil 40 28 71 55

Att: Svend Hof