

Slutrapport

Demonstration af teknologier til forbehandling af halm og fjernelse af sand

Rapporteringsperiode:

1.07.2018 til 31.05.2020



Udarbejdet juni 2020 af:

Henrik B. Møller, Eva Balaguer Moya og Lu Feng
Institut for ingeniør videnskab, Aarhus Universitet

Peter Damgård Nielsen og Svend Hoff
Advanced Substrate Technologies A/S



Indholdsfortegnelse

Forord.....	3
Sammendrag og konklusioner.....	3
1. Forbehandling og indfødning af halm	5
1.1 Neddeling og grinding.....	6
1.1.1 Forsøg i Skanderborg	6
1.1.2 Forsøg i Gram.....	8
1.1.3 Grindet biomasse til Bevtoft Biogas fra Gram.....	9
1.1.4 Økonomi ved grinding	11
1.2 N-steaming	13
1.2.1 Fuld skal test med 2 forskellige opholdstider på hhv. 0,5 og 1 time.....	13
1.2.2 Lab test på AU-Foulum.....	16
1.2.3. Konklusion - ammoniak forbehandling.....	16
2 Ensilering.....	16
3. Fjernelse af sand	20
Litteratur	23
Bilag 1: Resultater af forbehandling med ammoniak - lab test AU-Foulum	
Bilag 2: Rapport vedr fjernelse af sand	

Forord

Denne rapport er udarbejdet i projektet ” Demonstration af teknologier til forbehandling af halm og fjernelse af sand”. Projektet er finansieret af Region Midtjyllands Udviklingsprogram for Bioøkonomi”

Projektet er gennemført i et samarbejde mellem:

- Assentoft Silo
- Advanced Substrate Technologies (AST)
- Aarhus Universitet - Institut for Ingeniørvidenskab,
- Rybjerg biogas

Projektets formål har været at demonstrere forbehandling og indfødning af tungtomsættelig biomasse i biogasanlægget samt undersøge mulighederne for at fjerne sand fra en biogas reaktor under drift.

Sammendrag og konklusioner

Projektet har demonstreret en række lovende teknologier til at optimere og forbedre økonomien for biogasanlæg. Der er gennemført en række undersøgelser af forbehandling af halm og andre tungt omsættelige biomasser. Forbehandlingen er foretaget ved mekanisk neddeling med ”grinder” og ammoniak forbehandling i N-steamer. Endvidere er der udført forsøg med fjernelse af bundfald og sand fra en reaktor i drift og fra kvæggylle hvor der er brugt sand i sengebåsene.

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.

Det er forsøgt yderligere at øge gasudbyttet i grindet materiale ved at behandle med ammoniak. Forsøgene er udført såvel i laboratoriet som i kommerciel skala. I laboratorie forsøgene er der anvendt en koncentreret ammoniak opløsning medens der i det kommercielle anlæg (N-steamer) er anvendt ammoniak beriget damp der er produceret ved at strippe ammoniak af afgasset reject fra skruepresse. Forsøgene med anvendelse af ammoniak beriget

damp gav en betydelig effekt på gasudbyttet og efter udrådningstid på 90 dage var der en positiv effekt på ca. 10%. Det vurderes at denne effekt kan øges yderligere hvis ammoniak indholdet i dampen kan øges.

Der er udført en række forsøg med ensilering og sam-ensilering af halm og græs. Der er opnået positive effekter ved kombinationen af grinding og ensilering af tækkerør, Miscanthus og halm. Sam-ensilering af halm med græs har ikke vist en positiv effekt og de bedste resultater er opnået med grinded halm og vand i forholdet 2:1.

På Rybjerg biogas er der blevet udført forsøg med sandfjernelse. Det har ikke været muligt at demonstrere fjernelse af sand og grus fra reaktoren i drift, da der har vist sig stort set ikke at være sand i den biomasse der behandles på Rybjerg biogas. Fokus i projektet har derfor været fjernelse af sand fra kvæggylle, hvor der anvendes sand i sengebåse. Sedimentationen af kvæggylle har fungeret og der er produceret en sandfraktion med meget lavt indhold af organisk materiale. Det ”rensede” kvæggylle har imidlertid stadig indeholdt en betydelig mængde sand, der vurderes at være for højt til at kunne anvendes i biogasanlæg. Der er således behov for at systemet forbedres. En anden mulighed kunne være at bruge større sandkorn i sengebåse, hvilket vil kunne sikre en langt bedre fjernelse af sand. For biogasanlæg, der behandler biomasse der indeholder større sandkorn og grus partikler vurderes systemet at kunne anvendes. En analyse af bundfald fra Foulum biogasanlæg viser at bundfald indeholder en stor andel partikler over 1 mm og her vurderes systemet at kunne anvendes.

1. Forbehandling og indfødnings af halm

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 1), hvor sten, metal og lignende sorteres fra. Endelig går biomassen via fødekasse til grinderen (figur 2) hvor biomassen under tryk maseres, 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 1.- Neddeling og tilførsel af biomass



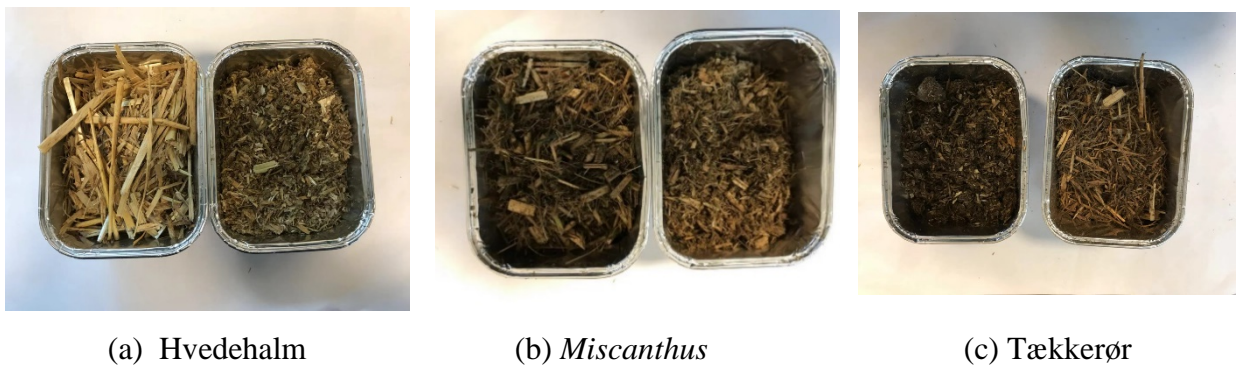
Figur 2. Grinder

1.1 Neddeling og grinding

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

1.1.1 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.



Figur 3. 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.

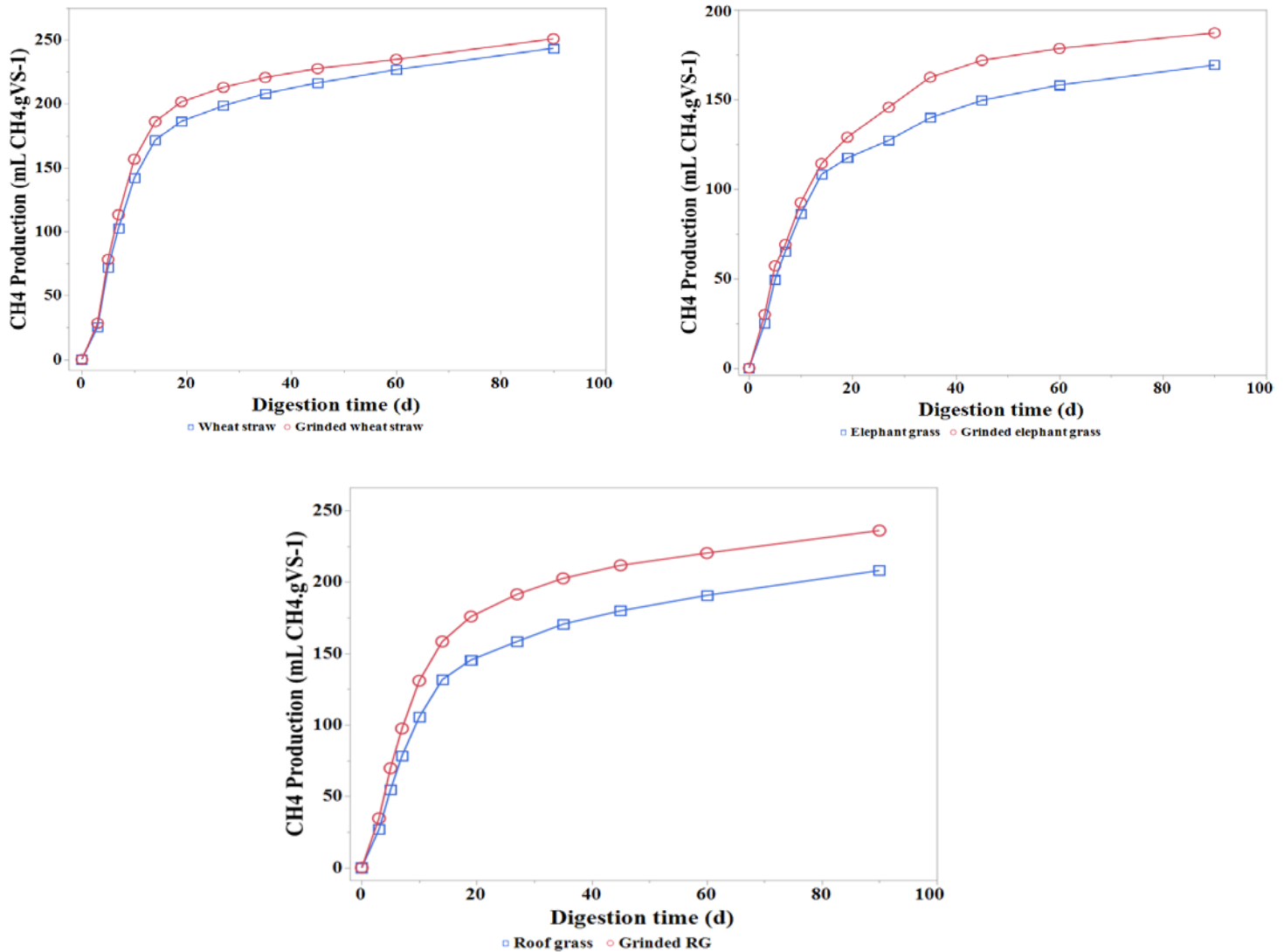
Tabel 1. Karakteristika for substrater i forsøget i Skanderborg.

Substrat	TS	VS	Fiber sammensætning		
			Cellulose (%)	Hemicellulose (%)	Lignin (%)
Hvede halm	69.05	65.04	44.16	29.99	5.41
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 co-ensilering

1.1.2 Skanderborg substrater – metan udbytter

Der er udført biogas batch-test ved termofil temperatur (51 °C) i 90 dage. Termofilt inokulum fra AU Foulum's biogasanlæg. Det akkumulerede metan udbyttet fra neddelte og grindet biomasse er illustreret i figur 4.



Figur 4. CH₄ udbytte af neddelte og grindede 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 neddelte. 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.

1.1.2 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 5. 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.

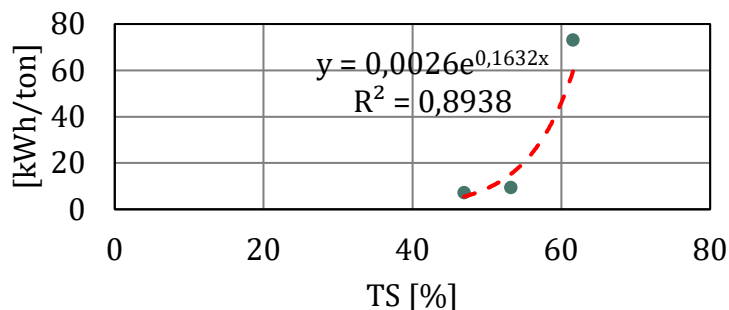
Biomasse	Mængde [ton]	Neddelt		Grinded	
		TS [%]	VS [%]	TS [%]	VS [%]
Heste gødning	6	44.39	38.49	46.94	36.77
Hestegødning + halm	13	49.6	43.3	53.22	45.97
Halm	1.15	73.86	68.36	61.58	54.87

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. Energi forbrug

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 6 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 6. Energi forbrug vs tørstof [%].

1.1.3 Grindet biomasse til Bevtoft Biogas fra Gram

AST har leveret neddelte og grindet biomasse til Bevtoft Biogas over en 13 måneders periode (august 2018 - august 2019). Oversigt over leverancer er vist i tabel 4.

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			

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.

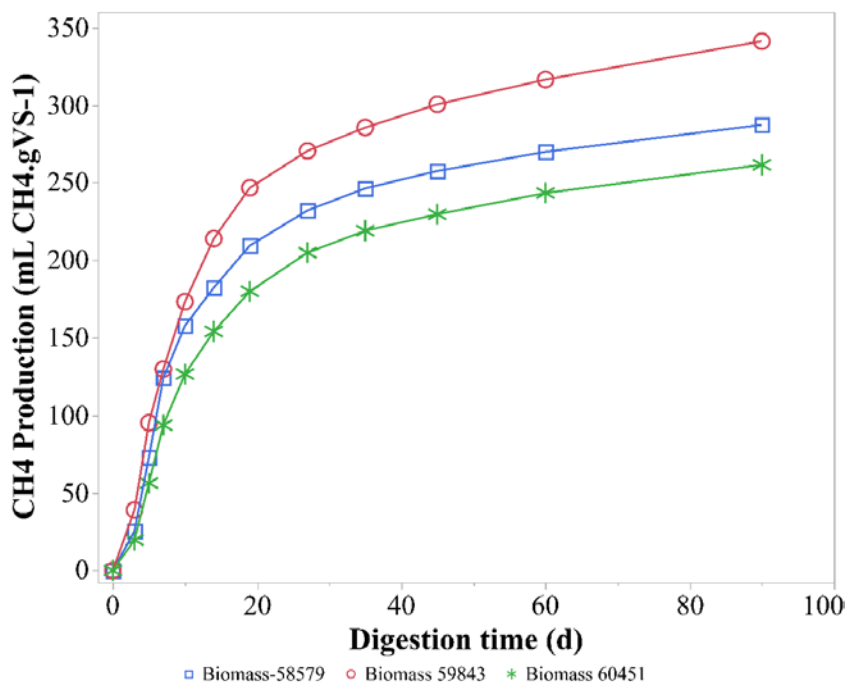
Der blev gennemført udrådningforsøg løbende af Bevtøft Biogas med anvendelse af inokulum fra deres anlæg og med en andel på tørstof basis, der svarer til den andel som det grindede biomasse udgjorde af den samlede mængde tilført biomasse. Parallelt er der udført udrådningforsøg på AU-Foulum med inokulum fra deres anlæg og med grinded biomasse svarende til 50% på tørstofbasis.

Der blev anvendt de samme prøver af grindede biomasser udtaget løbende af Bevtøft Biogas.

Det var aftalt at anvende gasproduktionsværdier ved 40 dages termofil udrådning (GVS-40) som sluttal og med angivelse af GVS-7, GVS-15 og GVS-30, sådan at udvikling over tid også blev registreret.

Resultaterne af testene (GVS-40) varierede meget (242 til 282 for AU-Foulum og 284 til 323 for Bevtøft Biogas) dels på grund af forskelle i inokulum og metoder, men nok også på grund af metanbakteriernes tilpasning til ændret biomasse over tid. Gennemsnittet for testene giver en GVS - 40 værdi på 288 m³ metan pr ton VS.

Til anskueliggørelse af gasudviklingen over tid er resultaterne fra test på AU-Foulum vist i figur 7.



Figur 7. 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 grindet biomasse som på 40-50 dage på ubehandlet biomasse (se figur 4). Det åbner op for en øget biogasproduktion på mere end 50% på eksisterende anlæg uden behov for udvidelse af reaktorvolumen hvis alle biomasser forbehandles.

Tillægges hertil drift med øget TS i den tilførte biomasse og anvendelse af afgasset fiber til produktion af nye produkter med added value (AST konceptet) så kan der skabes en interessant cirkulær bio-økonomikæde.

1.1.4 Økonomi ved grinding

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. Bemanning 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.

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

Tabel 5. Registreret energiforbrug – el og diesel

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. For neddeleren er det som forventet hvorimod forbruget til grinderen er ca 35% lavere end forventet.

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.

1.2 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 biogaspotentialer 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%

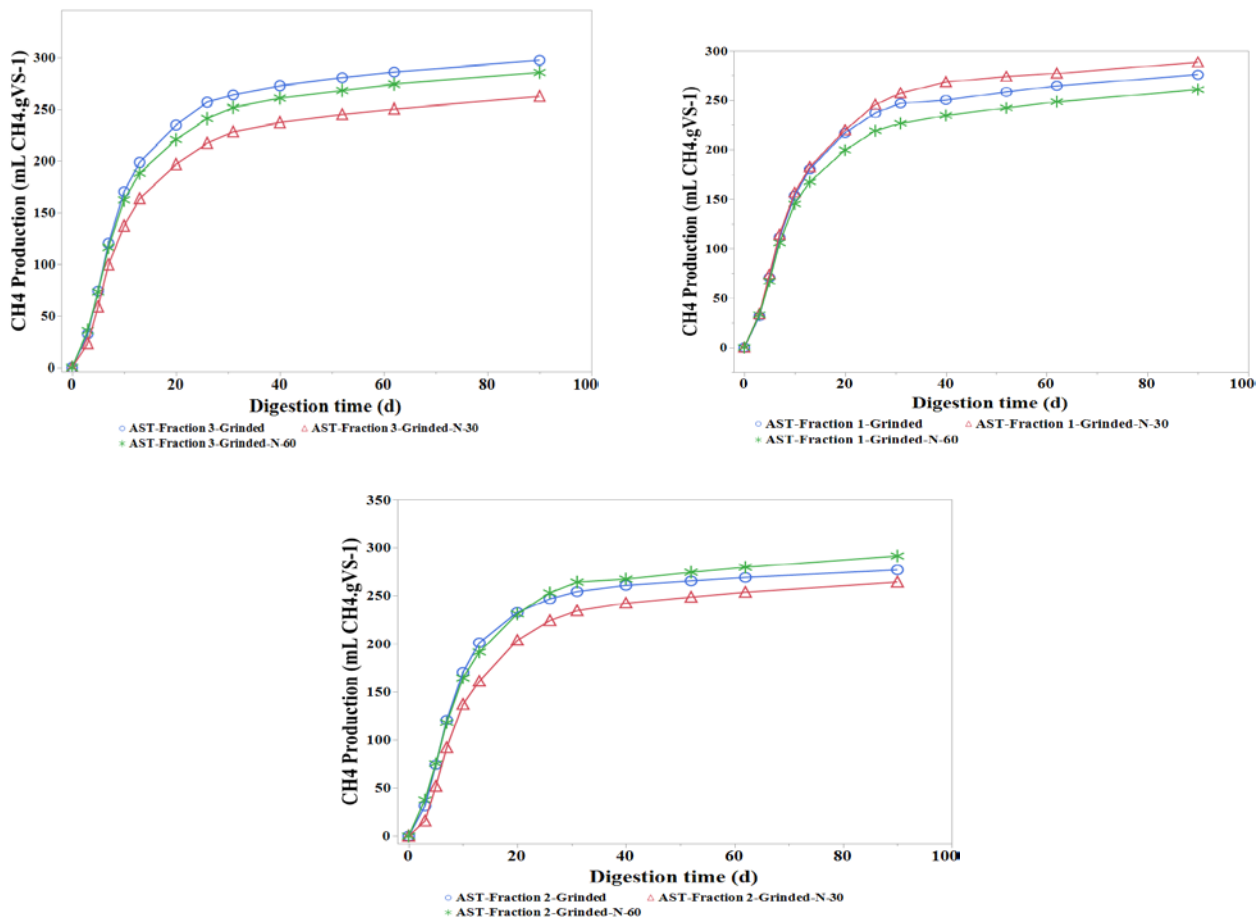
1.2.1 Fuld skal test med 2 forskellige opholdstider på hhv. 0,5 og 1 time.

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 grindede materiale blev efterfølgende anvendt til forsøg med N-steaming.



Figur 8. CH₄ udbytte fra en blanding af fast gødning, græs og halm før og efter N-steaming.

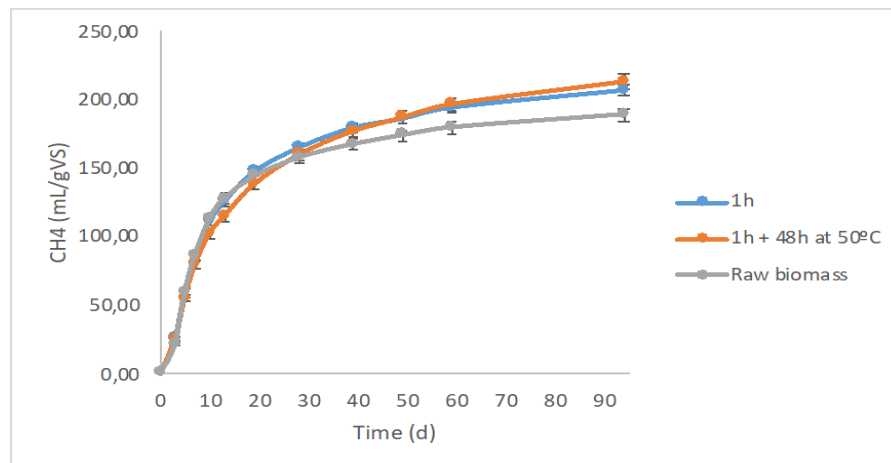
N-steaming ændrede ikke CH₄ udbyttet signifikant og der blev målt negativ effekt i flere tilfælde. Det tyder på at udtagning af repræsentative prøver har været vanskeligt og en vigtig årsag til, at det ikke har været muligt at drage klare konklusioner. Dette betød at det blev besluttet at udføre en række 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-steamed 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 9. Akkumuleret metan udbytte fra grinded biomasse blanding af halm, græs og dybstrøelse med og uden N-steaming.

Figur 9 viser det kumulative CH₄-udbytte opnået fra grinded og N-steamed biomasse blanding. Den N-streamede 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 methanudbytte 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. Der blev udført en række laboratorie test til at belyse dette.

1.2.2 Lab test på AU-Foulum

Resultater fra lab testene gengives i separat rapport fra AU-Foulum som vist i bilag 1.

1.2.3. Konklusion - ammoniak forbehandling

Efter at have udført en række forsøg med forskellige forbehandlingskoncentrationer af vandig ammoniak ved 55°C og 24 timers retentionstid kan det konkluderes, at:

- Brug af lave vandige ammoniakkoncentrationer syntes ikke at have nogen effekt. Længere tid til forbehandling, eller anvendelse af en højere ammoniakkoncentration kan øge effektiviteten af forbehandlingen.
- Brug af høje vandige ammoniakkoncentrationer hæmmer processen ved test under termofile forhold, og det er derfor nødvendigt med et vasketrin når tingene testes i laboratorie skala. I fuldskala hvor materialet tilføres en reaktor hvor ammoniak er under det hæmmende niveau vil dette ikke være nødvendigt.
- Behandling i fuldskala med AST-anlæg giver en effekt på 13% ved lang opholdstid og fuldskalaforsøg hvor der anvendes ammoniak beriget damp giver således en større effekt end behandling med ammoniak opløsninger i laboratoriet.

Ifølge litteraturen har brug af ammoniak damp en mere ensartet adgang til strukturen af biomasse og kræver meget kortere forbehandlingstider. Således har metoden potentialet til at være en billig og effektiv forbehandlingsproces. I fremtiden vil virkningerne af forbehandling af biomasse under anvendelse af højere koncentrationer af ammoniak i dampen skulle vurderes. Til dette bør en højere nyttiggørelse af ammoniak fra det afgassede biomasse finde sted ved at øge temperaturen og pH.

2 Ensilering

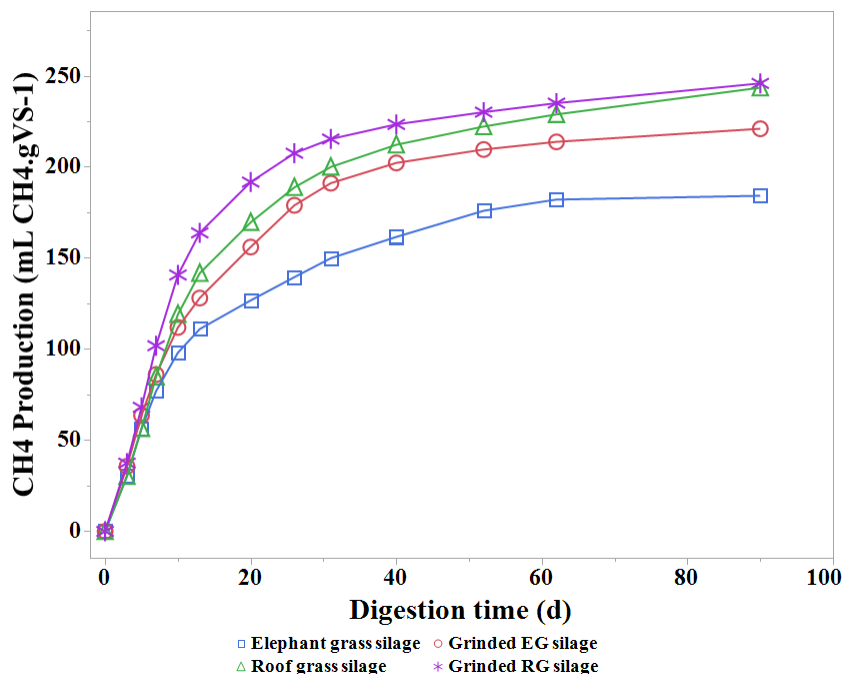
Ensilering og sam-ensilering er udført i laboratorie test og opbevaret i 3 måneder fra 25. oktober 2018 til 24. januar 2019 ved udetemperatur. Enggræs med relativt lavt tørstofindhold blev brugt som co-substrat for at balancere tørstofindholdet på 25-35% og gøre blandingen mere velegnet til langtidsopbevaring (Franco et al., 2018). Derudover vil ensileringsprocessen fremstille en stor mængde mælkesyre fra græs, som kan fungere som forbehandling til at bryde lignin bindinger i hvedehalm. Efter langtidsopbevaring vil det forventes at dette virker som forbehandling og forbedrer nedbrydeligheden af hvedehalm. Til sammenligning blev der tilsat vand til halmen for at reducere tørstofindholdet til samme niveau. Efter afslutningen af ensileringsforsøget blev den ensilerede biomasse opbevaret ved -18 °C før biogas-test.

Table 8. Blending ratios in ensiling and co-ensiling trials

Prøve	Substrat	Blandingsforhold (vægt basis)	Tørstofindhold (%)		VS indhold (%)
Ensilerings- tid (måneder)	0	0	0	3	3
1	Græs	--	20	19.91	15.78
2	Hvedehalm og græs	1:1	43	41.24	36.88
3		1:3	36	36.18	32.19
4		1:5	29	29.23	25.37
5	Hvedehalm og vand	2:1	47.5	47.74	44.32
6		1:1	36	36.12	33.73
7	Mischanthus	--	50.3	50.46	47.78
8	Grinded Mischanthus	--	50.8	50.85	47.85
9	Tækkerør	--	60.7	60.76	54.22
10	Grinded tækkerør	--	62.5	64.28	56.81

Gas production: Ensiled and co-ensiled substrates

Figure 10 shows CH₄ yield from ensiled Miscanthus and tækkerør (both whole and ground). There was a significant increase in CH₄ yield when the ground material was ensiled compared to the whole material after 3 months of ensiling. Table 10 shows CH₄ yield of Miscanthus and tækkerør (both with and without ensiling). Generally, there was a positive effect of grinding of both Miscanthus and tækkerør (10-14%) and the combination with subsequent ensiling gave an additional yield especially for Miscanthus where CH₄ yield increased by more than 30% compared to untreated.

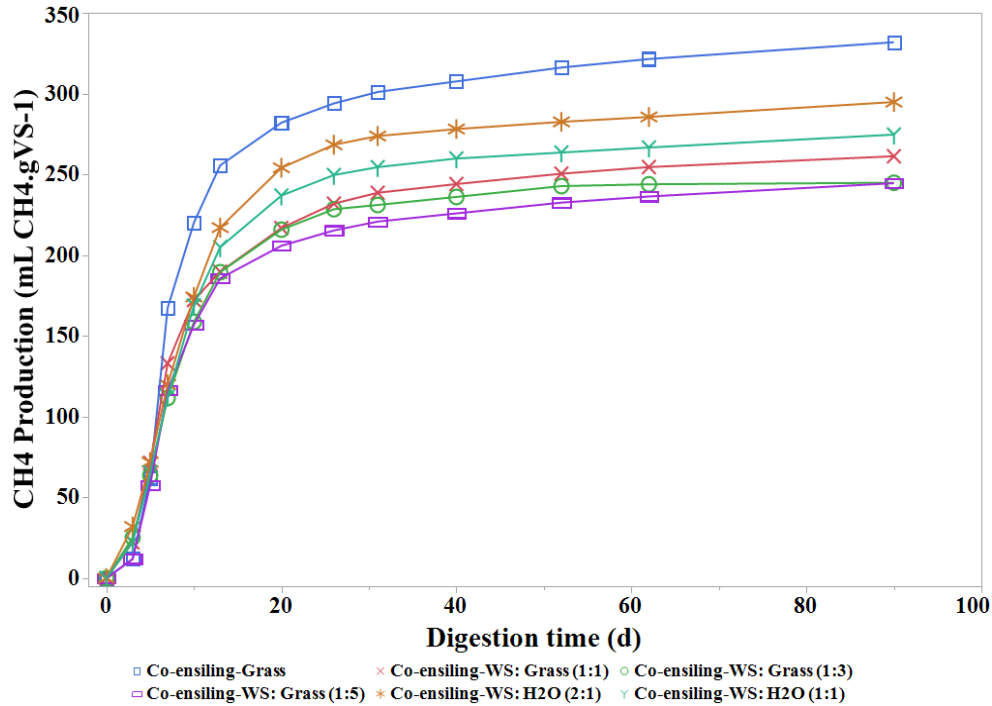


Figur 10. Metanudbytte fra ensilerede substrater hhv. med og uden indledende grinding. Miscanthus (EG) og tækkerør (RG).

Tabel 9. Metan udbytte af ubehandlet og ensileret biomasse.

Substrat	Miscanthus			Tækkerør		
	CH ₄ udbytte (ml.gVS ⁻¹)	Stigning (%)	Hydrolyse konstant (k)(d ⁻¹)	CH ₄ udbytte (ml.gVS ⁻¹)	Stigning (%)	Hydrolyse konstant (k) ^a (d ⁻¹)
Neddelt	169.2	--	0.0712	208.1	--	0.0702
Grinded	187.2	10.64	0.0671	236.1	13.5	0.0794
Neddelt+ Ensileret	184.2	8.86	0.0697	243.5	17.0	0.0637
Grinded+ Ensileret	220.9	30.5	0.0679	245.8	18.1	0.0803

Figur 11 viser metan udbyttet ved sam-ensilering af halm og græs samt ensilering af halm med vandtilsætning. Der er ingen signifikant forskel mellem de forskellige blandingsforhold af halm og der er ikke observeret nogen positiv effekt ved sam-ensilering med græs som forventet. Ensilering af grinded hvedehalm tilsat vand har således givet højere udbytter end sam-ensilering med græs og den bedste effekt blev opnået ved blanding af halm og vand i forholdet 2:1.



Figur 11. Metanudbytte fra sam-ensilerede substrater

Det skal bemærkes, at ensileringsprocessen vil føre til et massetab på mellem 3-5% under mælkesyrefermentering (Feng et al., 2018). En 1. ordens kinetik model blev anvendt til at modellere processen og fastsætte hydrolyse konstanten (ligning 1).

$$B = B_0(1 - \exp^{-kt}) \quad (1)$$

hvor B repræsenterer det kumulative metan potentiale (ml CH₄ g VS⁻¹) på tidspunktet (t) i dage. B₀ angiver det ultimative metan potentiale ved 90 dage (ml CH₄ g VS⁻¹) og k er nedbrydnings konstanten (d⁻¹). k betragtes også som hydrolysehastigheden, da værdien giver information om den krævede tid til at opnå en vis andel af CH₄-udbyttet (Moset et al., 2015).

2. Fjernelse af sand

I projektet er demonstration af fjernelse af sand fra en reaktor under drift blevet foretaget på Rybjerg Biogasanlæg. Udstyret der er anvendt til sandfjernelse er vist i figur 12.



Figur 12. Fjernelse af sand på Rybjerg biogas

Ambitionen med projektet har været at demonstrere:

1. at sandvaskeren kan modtage sand og grus holdig biomasse fra bunden af de to 2800 m³ biogastanke med et tørstof på > 11%. Rybjerg Biogas kører med et meget højt tørstof i biogasreaktorerne.
2. at sandvaskeren kan modtage sandholdigt kvæggylle fra kvægbestæninger der ligger på sengebåse med sand.

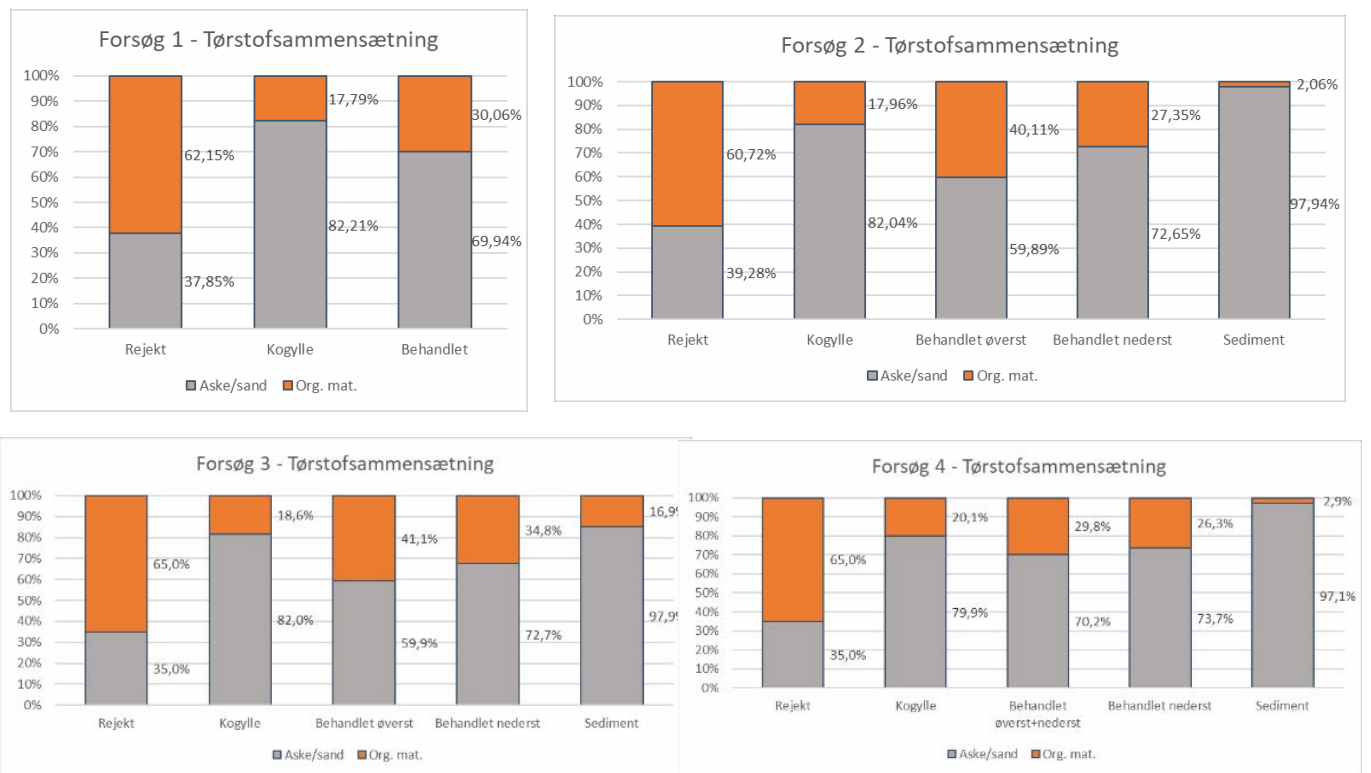
Det har ikke været muligt at demonstrere fjernelse af sand og grus fra reaktoren i drift, da der har vist sig stort set ikke at være sand til stede i den biomasse der behandles på Rybjerg

biogas. Fokus i projektet har derfor været at fjernelse af sand fra kvæggylle hvor der anvendes sand i sengebåsene. Den sandholdige gylle er tilført bundfældningstanke med forbindelse til reaktoren og den flydende fraktion efter afgang og afvanding i Börger skruepresse er anvendt til at fortynde og spule kvæggyllen for at forbedre bundfældningen.

Der blev udført følgende 4 forsøg med sedimentation af kvæggylle.

1. Kvæggylle med sand fra båse blandes med rejektivæske 10m³/10m³
2. Kvæggylle med sand fra båse blandes med rejektivæske 10m³/10m³
3. Kvæggylle med sand fra båse blandes med rejektivæske 10m³/10m³ og der spules yderligere med rejektivæske så slutblandingen bliver 10m³/15m³
4. Kvæggylle med sand fra båse blandes med rejektivæske 10m³/10m³ og der spules yderligere med luft for at se effekten af dette

Målet med sandvaskeren har været at fjerne så stor en mængde sand som muligt fra kvæggylle hvor der er brugt sand i sengebåsene. Effektiviteten kan bl.a. bestemmes ved at se på askeindholdet i det ”rensede gylle”.



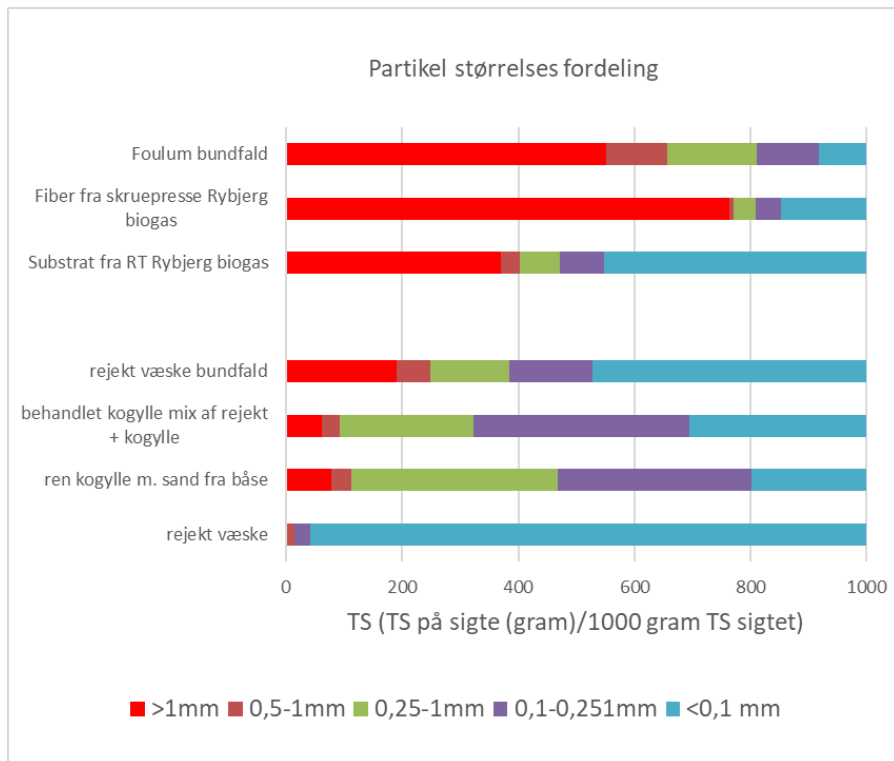
Figur 13. Resultater af aske og organisk stof i kvæggylle og biomasse efter sandfjernelse.

I figur 13 er fordelingen af aske og organisk stof i de forskellige fraktioner opgjort. I kvæggylle hvor der har været anvendt sand er der et meget højt indhold af aske på ca. 80% medens separeret rejejt har ca. 63% aske. I det behandlede kvæggylle stiger indholdet af

organisk stof fra ca. 19% til ca. 41% ved udtagning ved øverste udtag. Der fjernes således en del uomsætteligt stof til sedimentet men kvaliteten af det behandlede kvæggylle er i de udførte forsøg ikke tilstrækkelig god til at metoden kan gøre det attraktivt for biogasanlæg at modtage kvæggylle med sand.

Sedimentet har et meget højt askeindhold på ca. 97% og viser, at der er muligt at fraskille en fraktion der stort set udelukkende består af aske og der tabes således ikke noget organisk stof med denne fraktion.

Der er udført en række analyser af størrelses fordelingen af tørstoffet i en række fraktioner ved at sige igennem 4 sigter på hhv. 0.1, 0.25, 0.5 og 1 mm. Resultaterne fremgår af figur 14. Det fremgår, at der sker en opkoncentrering af partikler over 1 mm i bundfaldet. Der sker ligeledes en stigning i de helt små partikler, men dette skyldes primært at reject væsken der bruges til at fortynde kvæggyllen med indeholder en stor mængde små partikler. Det kan konkluderes, at det som forventet er de store partikler, der bedst fjernes, men da kvæggyllen indeholder mindre end 8% partikler over 1 mm er det vanskeligt at have en høj effektivitet på sand med en lille kornstørrelse. Hvis sandpartiklerne, der anvendes i sengebåsene var større vurderes det at bundfældningen vil kunne være væsentligt mere effektiv. Det fremgår endvidere at reaktor indholdet i Rybjerg (RT) har et højt indhold af partikler over 1 mm (>35%) og dette indhold stiger yderligere i fiberen der produceres ved separation. Det er således vigtigt at det er reject væske fra separation der anvendes til fortynding ved sandfjernelse. Til sammenligning er der udtaget bundfald fra Foulum biogas hvor over 50% af tørstoffet er partikler over 1 mm og det må forventes at denne type bundfald vil kunne fjernes i sandrenseren.



Figur 14. Sigtefraktioner af fraktioner fra bundfældnings forsøg, substrat fra Rybjerg, fiber fra Rybjerg og bundfald fra Foulum

Litteratur

Franco, R.T., Bayard, R., Buffière, P. 2018. Mathematical modelling of the ensiling process before biogas production: strengthening the links between biomass storage and anaerobic digestion. Chemical Engineering Journal.

Franco, R.T., Buffiere, P., Bayard, R. 2016. Ensiling for biogas production: Critical parameters. A review. Biomass & Bioenergy, 94, 94-104.