



TEKNOLOGISK
INSTITUT

Rapporten er udarbejdet for INBIOM – innovationsnetværket for bioressourcer

Halm til biogas

Erfaringer og klima-aspekter



Titel:

HALM TIL BIOGAS – Erfaringer og klimaaspekter

Udarbejdet for:

INBIOM – Innovationsnetværket for Bioressourcer

Udarbejdet af:

Teknologisk Institut
Agro Food Park 15, Skejby
8200 Aarhus N
Bioressourcer og Bioraffinering
www.teknologisk.dk

December 2020

Forfattere:

Henrik Bjarne Møller, Aarhus Universitet – Institut for Ingeniørvidenskab
Cristiane Romio, Aarhus Universitet – Institut for Ingeniørvidenskab
Morten Dam Rasmussen, Aarhus Universitet – Institut for Ingeniørvidenskab
Lars Stoumann Jensen, Københavns Universitet, Institut for Plante- og Miljøvidenskab
Magdalena Schwartzkopff, Københavns Universitet, Institut for Plante- og Miljøvidenskab
Jens Bo Holm-Nielsen, Aalborg Universitet, Institut for Energiteknik
Emil Brohus Lassen Agdal, Aalborg Universitet, Institut for Energiteknik
Søren Ugilt Larsen, Teknologisk Institut
Jørgen Hinge, Teknologisk Institut



AALBORG UNIVERSITET



AARHUS UNIVERSITET



DANISH
TECHNOLOGICAL
INSTITUTE



KØBENHAVNS
UNIVERSITET

INBIOM

INNOVATIONSNETVÆRKET FOR BIORESSOURCER



Indholdsfortegnelse

Forord	4
1. Sammenfatning	5
2. Summary in English	5
3. Indledning/Baggrund	10
4. Erfaringer med anvendelse af halm i biogasanlæg	12
4.1. Oversigt over besøgte biogasanlæg	12
4.2. Konklusioner vedr. praktiske erfaringer fra anlægsbesøgene	15
5. Karakterisering af afgasset biomasse fra anlæg, hvor der er tilført halm	15
5.1. Analyse af prøver fra biogasanlæg	16
5.2. Vurdering af gødningsværdi af afgasset gylle	23
5.3. Konklusioner vedr. analyser af afgasset biomasse	25
6. Analyse af scenarier for anvendelse af halm i biogasproduktionen	15
6.1. Beregninger og forudsætninger	26
6.2. Scenarie 1: Ensilering af halm i stakke	31
6.3. Scenarie 2: Mekanisk og kemisk forbehandling og lang opholdstid i reaktor	34
6.4. Scenarie 3: Pyrolyse af frasepareret tørstof fra afgasset gylle og brug af biochar på mark	38
6.5. Konklusioner vedr. scenarieberegninger	41
7. Pelleteret halm som strøelse i leverandørstalde og derefter til biogas	43
7.1. Konklusioner vedr. pelleteret halm som strøelse i leverandørstalde og derefter til biogas	48
8. Referencer	49

Forord

Denne rapport indeholder resultaterne fra et samarbejdsprojekt under Innovationsnetværket for Bioressourcer (INBIOM), som er støttet af Uddannelses- og Forskningsministeriet. Det overordnede formål med innovationsnetværket er at samle videninstitutioner, private virksomheder og offentlige myndigheder om at skabe innovation og vækst indenfor bæredygtig produktion og anvendelse af bioressourcer.

Samarbejdsprojektet er gennemført i perioden fra februar til december 2020 og rapporten er udarbejdet af Aalborg Universitet, Aarhus Universitet, Københavns Universitet og Teknologisk Institut.

December 2020

Thorkild Qvist Frandsen

Netværksleder, INBIOM

1. Sammenfatning

INBIOM har iværksat denne undersøgelse af erfaringer med anvendelse af halm i biogasanlæg samt scenarieberegninger af klimaeffekter ved øget anvendelse af halm i biogasanlæg.

Erfaringer fra 6 biogasanlæg, der anvender betydelige mængder halm

Ud fra besøgene på de 6 biogasanlæg, der på forskellig vis og i forskelligt omfang anvender halm, kan følgende konkluderes:

- Alle de besøgte anlæg er forskellige og drives forskelligt, ligesom der kan være forskellige tilgange og holdninger til, hvordan produktionen kan og bør være.
- Anlæggene er udviklet/udbygget over tid, og der er ofte afprøvet forskellige teknologier til håndtering af fast biomasse inkl. halm.
- Anlæggene har forskellige situationer mht. biomassegrundlag på egen bedrift og i oplandet. Biomassegrundlaget har betydning for, hvilke faste biomasser der især bruges, herunder hvilke halmtyper der anvendes (kornhalm, frøgræshalm, dybstrøelse mv.).
- Der er generelt tilfredshed med at bruge halm i biogasproduktionen. Det kan dog være svært at vurdere effekten af halm, når der bruges en række af biomasser.
- Der opleves ingen væsentlige problemer med flydelag, og generelt forebygges flydelag med mere omrøring.
- Der er generelt mere slid på forskellige anlægsdele ved brug af fast biomasse såsom halm.
- Biogasanlæggene kan også gøre brug af en samarbejdsmodel med gylleleverandørerne, der kan tage halmpiller i brug som strøelsesmiddel i staldsystemerne. Halmpiller som strøelse giver sundhedsfordele i staldene og større gasudbytte af gyllen og halmen.

Biogasanlæggene udgør således eksempler på anlæg, der med succes anvender ganske betydelige mængder halm. Der er dog tale om landbrugsbaserede anlæg med generelt lange opholdstider. Det kan ikke ud fra dette projekt klart konkluderes, hvilke faktorer der er afgørende for, at anvendelsen af halm fungerer uden flydelag. Der er ikke foretaget målinger af energiforbruget ved øget brug af halm i biogasanlæggene.

Analyser af næringsstofindhold og rest-biogaspotentiale i afgasset gylle fra biogasanlæg, hvor der anvendes betydelige mængder halm

Resultaterne fra forsøg til bestemmelse af rest-gaspotentialet viser, at der i gennemsnit er et uudnyttet gas potentiale i den afgassede biomasse på ca. 4,8 Nm³ CH₄/ton med en betydelig variation mellem anlæggene. Rest-gaspotentialet varierer således mellem 2,2-6,6 Nm³ CH₄/ton og 61-103 l CH₄/kg VS. I sammenligning med tidligere undersøgelser tilhører 3 af anlæggene den kategori, der vil have en økonomisk gevinst ved forlænget opholdstid, medens de øvrige vil have begrænset økonomisk

værdi af det. De anlæg der vil have størst værdi af forlænget opholdstid er samtidigt de anlæg der har det største tørstofindhold. Ved separation reduceres rest-gaspotentialiet i væskefraktionen til i gennemsnit $2,9 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4/\text{ton}$, og en simpel separation er således en effektiv metode til at reducere rest-gaspotentialiet og dermed potentialet for metan emission fra væskedelen, hvis den faste fraktion kan håndteres på en måde, så tab undgås. Sammenfattende omkring den afgassede biomasse kan det konkluderes af lignocellulose udgør 31-49% af tørstoffet. Lignin, cellulose og hemicellulose udgør i gennemsnit hhv. 14,2%, 16,8%, 11,6% af tørstoffet.

Med hensyn til gødningsværdi af afgasset gylle og halm kan det konkluderes, at der er et fornuftigt indhold af de vigtige makronæringsstoffer N, P og K, men at forholdet mellem dem ikke matcher typiske afgrøders N:P:K behov – der er ofte for lidt tilgængeligt N ift. P og K. Dette skyldes bl.a, at ammonium-andelen er for lav ift. den forventede øgede andel efter bioforgasning, og der kan endvidere være risiko for både fordampning og immobilisering af ellers tilgængeligt ammonium-N. Det skyldes sandsynligvis, at der i biogasreaktoren bindes en del af ammonium-N på organisk form under omsætningen af halmen (der indeholder meget lidt N, dvs. har et højt C/N forhold), og at en lidt for stor andel af halmen endnu er uomsat pga. af for kort opholdstid eller utilstrækkelig omsætning.

Scenarieberegninger for klimaeffekter ved anvendelse af halm i biogasanlæg

Kvantificering af biogasproduktionens klimaeffekter ved anvendelse af halm udgør et vigtigt grundlag for at kunne designe forskellige udviklingsveje. Der er udvalgt tre scenarier for anvendelse af halm til biogas:

1. Ensilering af halm i stakke
2. Mekanisk og kemisk forbehandling og lang opholdstid i reaktor
3. Pyrolyse af frasepareret tørstof fra afgasset gylle og brug af biochar på mark

Det fremgår af tabel 6.8, at der er en samlet positiv klimaeffekt ved biogas på 12,2-76,9 kg CO₂-eq pr. ton biomasse (gylle og halm) i de 3 scenarier. Anvendelsen af halm i scenarierne uden biogas spiller en afgørende rolle for resultatet. Scenarie 2 og 3 har en væsentligt mindre effekt end scenarie 1, hvilket primært skyldes, at der produceres mere energi i scenariet uden biogas som følge af anvendelse af halm til forbrænding og produktion af el og fjernvarme ift. nedmulding af halm på mark. Dog er der i denne beregning ikke taget hensyn til, at energikvaliteten i fjernvarme er langt dårligere end opgraderet gas til naturgasnettet. Samtidigt er der en positiv effekt af kulstoflagringen til jord ved biogas i scenarie 2 og 3, der gør at biogas stadig falder positivt ud. Særligt når der anvendes separation af digestatet og pyrolyse af den faste fraktion (scenarie 3), er der en særdeles positiv effekt af kulstoflagring. Ligeledes medfører separation og pyrolyse, at tabet af metan ved lagring reduceres til et minimum, og dette bidrager til en positiv effekt.

Tabel 6.8. Oversigt over netto-klimaeffekt og de enkelte parametres/processers bidrag til årlig effekt, opgjort i CO₂-ækvivalenter pr. ton friskvægt biomasse, for forskellen mellem uden- og med-biogas scenariet for alle tre scenarier. Positive værdier indikerer, at anvendelsen af halm til biogas har en gavnlig effekt og dermed reducerer klimabelastning, mens negative værdier øger dette.

	Scenarie 1	Scenarie 2	Scenarie 3
	(kg CO ₂ -eq /ton bio- masse)	(kg CO ₂ -eq /ton bio- masse)	(kg CO ₂ -eq /ton bio- masse)
Gas til nettet/halm varme	77.9	-5.1	-5.1
Energi fra pyrolyse	0.0	0.0	16.2
Proces energi	-1.0	-1.0	-1.0
Varme	-3.1	-3.1	-3.1
Forbehandling/Ensilering	-3.4	-1.3	-1.3
Transport	-1.2	-0.4	-0.4
Lager	17.3	21.0	28.7
Lækage	-6.9	-7.5	-7.5
Kulstoflagring	-2.9	9.5	19.3
Netto	76.9	12.2	45.9

Perspektiver ved anvendelse af halmpiller som strøelse i kvægstalde

Halmpiller er en interessant måde, hvorpå mere forbehandlet halm kan finde vej til biogasanlæggene. Denne forbehandling kan medføre en værdiskabelse hos både landbruget og hos biogasanlæggene, idet der findes positive effekter ved anvendelse i staldene. Desuden viser forsøg i laboratorier med bestemmelse af biogaspotentialet i halmpiller, et højere gasudbytte inden for opholdstiden af det gennemsnitlige biogasanlæg.

I denne forundersøgelse af halmpiller i dette scenarie er der ikke blevet kigget ind i kvantitative datagrundlag så som sygdomsdata på besætninger, arbejdsmiljødata eller lignende. Men et nyt interessant strøelsesmedie i forhold til sand, savsmuld og snittet halm er fundet og dokumenteret meget anvendeligt. Det må konkluderes, at det vil være oplagt at undersøge sammenhængene nærmere mellem strøelsesmedie, staldmiljø, arbejdsmiljø, økonomi, biogasudbytter og samfundsøkonomi.

Det må bemærkes, at samarbejdsmodellen beskrevet i dette kapitel, og som eksisterer i praksis, er et godt eksempel på den nære relation, der eksisterer imellem

landbruget og biogassektoren. Den synergi, der kan skabes ved sektorernes indbyrdes samarbejde, der i sidste ende skaber værdi hos begge parter, bør undersøges nærmere og bruges som inspirationskilde for sektoren generelt.

2. Summary in English

INBIOM has initiated this survey of the Danish experiences with use of straw in biogas plants as well as scenario analyses of climate effects from increased use of straw in biogas production.

Experiences from six biogas plants using significant quantities of straw

The following can be concluded from visits on six Danish biogas plants that use straw in various ways and quantities:

- All six biogas plants are different and are being managed differently. Also, there are different opinions approaches regarding how the biogas production can and should be run.
- The biogas plants have been improved and expanded over time, and a range of technologies for handling and pretreatment of straw and other solid biomasses have been tested.
- The potential biomass supply locally differs considerably between the biogas plants, and this affects which types of solid biomasses the biogas plants primarily use, including which type of straw they use (cereal straw, straw from grass seed production, deep litter etc.
- In general, the managers of the biogas plants are content with using straw in the biogas production. However, it is difficult to evaluate the effect of straw when it is used along with a number of other biomasses.
- No severe problems are experienced with floating layers in the biogas reactor when using straw. Floating layers are generally prevented by more frequent stirring.
- In general, there is more wear and tear on various parts of the biogas plant when using solid biomass such as straw.
- The biogas plants may cooperate with farmers delivering animal slurry to the biogas plants; if the farmers use straw pellets as bedding material in the stables, this may give benefits in terms of improved health in the stables as well as larger methane yield from the mix of slurry and straw pellets when used in the biogas production.

Hence, these biogas plants exemplify successful use of considerable quantities of straw in the production. However, the biogas plants only represent farm-based biogas plants with long retention times. From this project, it is not possible to conclude which specific factors are determinant for successful use of straw with floating layers etc.

Nutrient content and residual methane potential

Estimated residual methane yields show an average unused potential of 4,8 Nm³ CH₄/tonnes with a significant variation between different biogas plants. Hence the residual gas potential has an interval ranging from 2,2-6,6 Nm³ CH₄/ton and 61-103 l CH₄/kg VS. In comparison with former studies 3 biogas plants is in the category with an economic gain by prolonged retention time. The plants with the highest potential gain is the plants with the highest dry-matter content in the digestate. Separating the digestate in a solid and liquid is an efficient method to reduce the residual gas of the liquid fraction and thereby reducing the risk of methane emission during storage if the solid can be handled in a way so risk of methane emissions is limited.

The composition of the organic fraction has been analyzed showing that ligno-cellulose constitutes 31-49% of the drymatter. The content of lignin, cellulose og hemicellulose is respectively 14,2%, 16,8%, 11,6% of the drymatter.

Regarding the fertilizer value of digested manure and straw, it can be concluded that there is a reasonably high content of the important macronutrients N, P and K, but that the ratio between them does not match the N: P: K demand of typical crops - there is often too little available N in relation to P and K. This is partly due to the fact that the proportion of ammonium relative to total N is too low compared to the expected increased proportion after biogasification, and there may also be a risk of both volatilisation and immobilization of the available pool of ammonium-N. This is probably due to the fact that in the biogas reactor a part of ammonium-N is bound in organic form during the reaction of the straw (which contains very little N, i.e. it has a high C/N ratio), and that a slightly too large part of the straw is still undecomposed, due to too short a hydraulic retention time or insufficient breakdown during the biogasification.

Scenario analyses

The quantification of environmental impacts of incorporating straw into biogas production is an important consideration in order to develop sustainable biogas production systems. Three scenarios were selected to examine the use of straw in biogas production - each scenario consisted of a 'without biogas' sub-scenario and a 'with biogas' sub-scenario, which were compared to quantify the effect of using straw for biogas.

1. Ensiling of straw in stacks
2. Mechanical and chemical pre-treatment and long retention time
3. Separation and pyrolysis of the digestate and use of biochar in the field

As seen in table 6.8, there is a net positive environmental impact of using straw for biogas (when compared to 'without biogas' straw use) of 12,2-76,9 kg CO₂-eq pr. ton biomass (fresh weight straw and slurry before biogas) in the three scenarios. The fate of the straw in the 'without biogas' scenarios, however, plays an important role for the net result. In scenario 2 and 3, there is a considerably lower net effect

than in scenario 1, which is primarily due to a higher energy production when combusting straw for heat/electricity then when directly incorporating fresh straw in the field. This energy production decreases the variation between the without- and the with biogas scenarios. It should be noted that in this calculation however, we have not considered the quality of the energy produced, which is substantially lower for combusted straw than for natural gas production. At the same time there is a higher carbon sequestration in the soil in biogas scenarios 2 and 3, which increases the positive net effect of these scenarios. Particularly the separation of the fluid and solid anaerobic digestate and subsequent pyrolysis of the solid fraction for biochar production (biogas scenario 3), has a highly positive effect on carbon sequestration. Additionally, the separation and pyrolysis of the digestate reduces the methane loss from storage to a minimum, which further adds to the net positive effect.

Straw pellets

Straw pellets can be an interesting pass way of utilizing larger amounts of straw in biogas plants. It can create value adding for both the animal producers and the biogas plants. Healthier bedding environment and higher biogas yield by increasing dry matter content by adding straw pellets

Straw pellets have been found to be a new bedding material compared to bedding materials consisting of sand, sawdust or chopped straw. It needs further investigation of the positive effect of animal health, environmental effects working environment and economy.

The pelletized straw cooperation model described in this chapter gives a good background for the close cooperation there exists between the animal manure suppliers and the joint biogas plants. This synergy gives values to both the animal producers and the biogas plant

3. Indledning/Baggrund

Landbrugsbaserede biogasanlæg har et stort dokumenteret potentiale for at kunne bidrage med positive miljø- og klimamæssige effekter, især gennem:

- Produktion af biogas, der erstatter fossile brændsler
- Reduceret udslip af metan fra tanke til lagring af gylle
- Bedre fordeling af næringsstoffer, lokalt og regionalt
- Forbedret udnyttelse af næringsstoffer i den afgassede biomasse (i forhold til anvendelse af ubehandlet husdyrgødning), og dermed mindre tab til omgivelserne

I de seneste år har der været en stærkt stigende interesse for at øge anvendelsen af halm i biogasanlæggene. Det betragtes således som en væsentlig forudsætning for den fortsatte udbygning med landbrugsbaserede biogasanlæg, at halm kan indgå som supplement til husdyrgødningen.

Dansk landbrug genererer på årsbasis en stor ressource i form af halm af en høj kvalitet. Denne halm finder anvendelse i mange henseender både til energiformål, foder og som strøelse. Derudover findes der en stor mængde halm, der ligeledes bliver efterladt og muldet ned på markerne, og bidrager derved direkte til den langsigtede kulstofopbygning i jorden. Der er således et betydeligt potentiale for at imødekomme biogasanlæggenes ønske om øget halmtilførsel.

Der findes dog en række problematikker ved anvendelse af halm i danske biogasanlæg, der for det meste fungerer som termofile anlæg (50-55°C) med opholdstider fra 25-40 døgn. Halm karakteriseres som en svært omsættelig biomasse, der i sin rå form egner sig dårligt til anvendelse i de moderne danske biogasanlæg, da opholdstiden er for kort og designet ikke optimeret til halm. Derudover bidrager halmstråets struktur med yderligere en problematik, da halmstrået indeholder luft, der bevirker en naturlig opdrift. Derved risikerer man at forårsage opbygninger af massive flydelag, der hindrer tilstrækkelig omrøring og homogenisering af biomassen i reaktorerne samt generelt ringe betingelser for udrådning af halmen. I værste fald kan halmen opbygge flydelag, der tvinger anlægget til at stoppe driften og manuelt tømme tanken. Dette er dyrt både tidsmæssigt og økonomisk.

På overfladen af halmstrå findes der et naturligt vokslag, der beskytter planten mod angreb af rådsvampe og sikrer planten tid nok til at fuldende sin modning. Dette vokslag nedbrydes ganske langsom (smeltepunkt ca. 80° C) og bidrager til halmens hydrofobe egenskaber længe efter høst af halmen. De hydrofobe egenskaber bringer ligeledes problematikker med sig, idet man fra et biogasmæssigt synspunkt ønsker biomasse så godt opblandet i væskedelen i reaktorerne som muligt, da dette er grundlaget for mikroorganismernes kontaktflade og derved evne til at omsætte biomassen indført i reaktorerne.

I den nuværende biogassektor i Danmark, er det derfor nødvendigt med en forbedring af halm, hvis denne ressource skal anvendes i større skala i de danske anlæg. Gennem de senere år er der gjort en betydelig F&U indsats omkring forskellige forbehandlingsmetoder, og mange virksomheder bidrager med teknologiudvikling på området. Men endnu mangler en optimering af de enkle og robuste metoder, der på en økonomisk rentabel måde kan gøre halm rigtigt interessant for biogasanlæggene.

Udover de økonomiske problemstillinger kan øget anvendelse af halm i biogasanlæggene have en række positive og negative miljø- og klimamæssige effekter bl.a.:

- Brug af halm vil øge produktionen af biogas og forbedre kapacitetsudnyttelse
- Eventuel forbehandling af halmen vil kræve ressourcer i form af energiforbrug og eventuelle tilsætningsstoffer
- Et øget tørstofindhold i anlæggenes rådnetanke kan medføre et højere elforbrug til omrøring
- Et forøget indhold af organisk materiale i den afgassede biomasse, der efterfølgende udspreddes, vil ændre dynamikken i næringsstofomsætningen og -udnyttelsen

Mens det er relativt enkelt at forudsige gevinsten fra den ekstra metanproduktion, er andre effekter vanskeligere at beskrive og kvantificere. Formålet med dette projekt er derfor dels at indsamle og formidle erfaringer fra de anlæg, der allerede nu anvender betydelige mængder halm. Og dels at beskrive og vurdere de klima- og miljømæssige effekter af øget halmanvendelse.

For indsamling af erfaringer er der besøgt seks biogasanlæg; i forbindelse med besøgene er udtaget prøver af afgasset biomasse til analyse med henblik på at generere data til de efterfølgende beregninger.

I forsøget på at kvantificere de klima- og miljømæssige effekter og benchmark dem mod biogasanlæg, hvor der ikke tilføres betydelige mængder halm, opstilles en række scenarier. Herunder inddrages forskellige strategier for, hvordan halmen indgår på biogasanlæggene.

4. Erfaringer med anvendelse af halm i biogasanlæg

4.1. Oversigt over besøgte biogasanlæg

Der er i perioden maj-juli 2020 gennemført besøg på 6 danske biogasanlæg, der på forskellig vis anvender halm i biogasproduktionen, se tabel 4.1. Anlæggene er besøgt, og der er lavet interview med ejer/driftsleder om diverse forhold vedr. biogasanlæggets opbygning, anvendte biomassetyper og erfaringer med anvendelse af halm. Spørgsmålene, der er anvendt som udgangspunkt for interviews, findes i bilaget bagerst i rapporten, ligesom der i bilaget er en detaljeret beskrivelse i tekst og fotos fra hvert biogasanlæg. Desuden er der på anlæggene udtaget prøver af den afgassede biomasse til diverse analyser på Aarhus Universitet.

Tabel 4.1. Oversigt over besøgte biogasanlæg.

Biogasanlæg	Beliggenhed	Besøgsdato	Interviewet person	Interviewer
1. Brdr. Thorsen Biogas	Nimtofte	2/6 2020	Steffen Thorsen	TI og AU
2. Rybjerg Biogas	Roslev	9/6 2020	Jens Christensen	TI
3. Vrejlev Bioenergi	Vraa	15/6 2020	Henning Jensen	TI og AU
4. Ausumgaard Biogas	Hjerm	23/6 2020	Holger Thusholt Lauritsen	TI
5. Lynggård Biogas	Præstø	16/7 2020	Peder Andersen	TI og AU
6. Blåbjerg Biogas	Nørre Nebel	26/5 2020	Bent Jespersen og Natalia Andersen	AAU

I tabel 4.2 er de besøgte biogasanlæg stillet op til sammenligning af udvalgte karakteristika, med særlig fokus på deres brug af halm og anden fast biomasse. I et efterfølgende afsnit præsenteres resultater af analyserne af afgasset biomasse fra anlæggene.

Tabel 4.2. Udvalgte karakteristika for de besøgte biogasanlæg. Se tekst for nærmere detaljer.

	1. Brdr. Thor-sen Biogas	2. Rybjerg Biogas	3. Vrejlev Bioenergi	4. Ausumgaard Bio-gas	5. Lynggård Bio-gas	6. Blåbjerg Biogas
Byg-ningsår	2000/2005/2020	2016, i tilknytning til et ca. 20 år gammelt an-læg.	2016	2017	2002 samt senere udbygning	1996. Udvidelser i 2009, 2011 og 2014.
Energi-produk-tion	El+varme, to motorer på i alt 730 kW.	Hovedparten af gassen opgraderes til naturgas-nettet. Resten til el+varme.	Opgradering til natur-gasnettet.	Opgradering til natur-gasnettet.	El+varme, 900 kW motor.	45,5 GWH/år solgt til lokal kraftvarme. Opgradering og net-tilslutning ult. 2020.
Volumen af reak-tor og ef-terlager	5.500+5.000+5.000 m ³ Delvis seriefor-bundet.	2*3.000+6.000+3.000+3.000 m ³ De to reaktorer er paral-lelforbundet, de tre ef-terlagre er serieforbun-det.	4.900+4.900+6.000+3.000 m ³ Reaktoren og de tre efterlagre er seriefor-bundet.	5.200+5.200+5.800+2.800+2.800 m ³ Tre parallelforbundne reaktorer samt to 'slavetanke', der hver er knyttet til en reak-tor.	1.000+3.000+2.700 m ³ Tre serieforbundne reaktorer.	20.600m ³
Omrøring	7+5+5 omrø-rere, kører en-ten hele tiden, hver 3. time el-ler hver 8. time	Gasmixpumper i reaktorer og de to efterlagre, mekanisk omrøring i det 3. efterlager.	Omrørere i alle tanke. I reaktoren er der 6 omrørere à 15kW.	4+4+6+4+4 omrø-rere. Omrørerne i reaktorerne kører ca. 1/3 af tiden.	Omrørere i alle re-aktorer.	Omrørere i alle re-aktorer.
Samlet opholds-tid	50 eller 150 dage i alt.	Ca. 48 dage i alt. Desuden separation af ca. 75% af den afgassede gylle og gen-udråkning af fiberen.	Ca. 70 dage i alt.	70-80 dage i alt.	14/43/39 dage, i alt ca. 96 dage.	33 dage i reaktor, 2-3 dage i efterla-gertank med køling.
Tempe-ratur i reaktor og efter-lager	46/46/?°C	50/42/38/35°C	51/51/51/ca. 40-45°C	51,6-51,7°C i de tre hovedreaktorer og ca. 46-47°C i de to slave-tanke.	52,5/42/42°C, dog lavere temperatur på 36-38°C i reak-tor 2 og 3 om vinte-ren.	Termofil drift, 52°C.
Tørstof-indhold i reaktor	Ca. 8 %	Ca. 12% i reaktorerne, ca. 7% i sidste efterla-gre.	Ca. 9%	10,0-10,5%	Vurderes at være over 10% (men ak-tuel analyse viste 3,1%)	Tørstofindhold på 8% før halmpille-ordning. Godt 9% efter halmpiller er indført.

Indfø- dningssy- stem og mekanisk forbe- handling af halm og anden fast bio- masse	BvL premixer og Vogelsang Mi- xer. Våd se- kunda-halm snittes med Haybuster og ensileres (uden overdækning) som forbehand- ling.	BIG-Mix premixer-an- læg, BHS-Sonthofen bio- grinder/hammermølle, Lobe-mixerenhet samt Landia Gasmix-pumper med knive. Ensilering af frøgræshalm.	Terbrack påslag og Bomatech hammer- mølle før iblanding i mixertank. Desuden Bioflex feeder til ind- fødnings af finsnittet biomasse som majs. Ensilering af halm+roe.	Påslag med walking floor til fast bio- masse, Envitec dissol- verere til opblanding af fasbiomasse og gylle i recirkulat samt Börger-grindere på indpumpningsstren- gene. Dybstrøelse knuses i rodknuser. Ensilering af frøgræshalm.	Tør halmelinje: Hal- moprøver og ham- mermølle med 5 mm sold. Våd halm- linje: Foderblande- vogn, stensortering, Kahl-mølle/pille- presse (12 mm hul- ler). Iblanding af både tør og våd halm i afgasset gylle.	Ikke nogen specifik indfødningssteknologi til halm installeret.
Gylletype og gylle- andel (% friskvægt af samlet råvare- mængde)	70% kvæggylle + 30% svine- gylle. I alt udgør gylle ca. 80%.	Kvæggylle og svine- gylle. I alt ca. 64%.	Svinegylle. I alt ca. 70%.	Gylle, vaskevand, vand fra ensilage- pladser. I alt ca. 55%.	Tynd svinegylle. I alt ca. ca. 85%.	Tynd kvæggylle, 85- 90%. Tynd svine- gylle, 7-8%. Lidt hønsegødning, minkgylle, æbler og madaffald.
Typer af fast bio- masse inkl. halm (% friskvægt af samlet råvare- mængde)	I alt ca. 20%. Især billig/vær- diløs sekunda- halm fra halm- entreprenør- virksomheden (ca. 7½%) og dybstrøelse (ca. 4%).	I alt ca. 36%. Især dybstrøelse (21%) og ensileret frøgræshalm samt majs, græs fra enge mv.	I alt ca. 25%. Især dybstrøelse fra stutteri og lidt kvæg- dybstrøelse (8-9%) samt halm-roe-ensi- lage (8-9%). Desu- den majs, solsikkeaf- fald, DBG mv.	I alt ca. 45%. Dybstrøelse fra kvæg (ca. 10%), ensileret frøgræshalm og slæt- græs (ca. 20% i alt), halmpiller (ca. 3%), havreskalmel (ca. 5,5%), hønsemøg (ca. 3%) mv.	I alt op til ca. 15%. Især halm (pt. ca. 9% med 50-60% vand) samt majs, mask, dybstrøelse, div. affald.	Ingen dybstrøelse da man er betænke- lig over for flyde- lagsdannelse. Effek- tiv og bevist forbe- handling mangler. Halmpiller benyttes som strøelse af godt 1/3 af leverandø- rerne.
Erfarin- ger med halm	Fungerer godt med ensileret 'sekunda-halm'. Flydelag undgås ved omrøring.	Gode erfaringer med frøgræshalm og dybstrøelse. Ingen fly- delag. Noget vedlige- hold.	Gode erfaringer med halm-roe-ensilage. Problemer med flyde- lag er løst med flere omrørere. Men meget logistik ved ensilerin- gen.	Meget få problemer med flydelag – løses med øget omrøring (hellere for meget end for lidt). Fast bio- masse giver mere slid.	Gode erfaringer, ca. 220 m³ metan pr. ton VS. Tyk konsistens men ingen flydelag.	Super erfaring med halmpiller som strø- else. Ingen flydelag eller problemer med omrøring. Blivende ordning med halm- piller, se kapitel 7.

4.2. Konklusioner vedr. praktiske erfaringer fra anlægsbesøgene

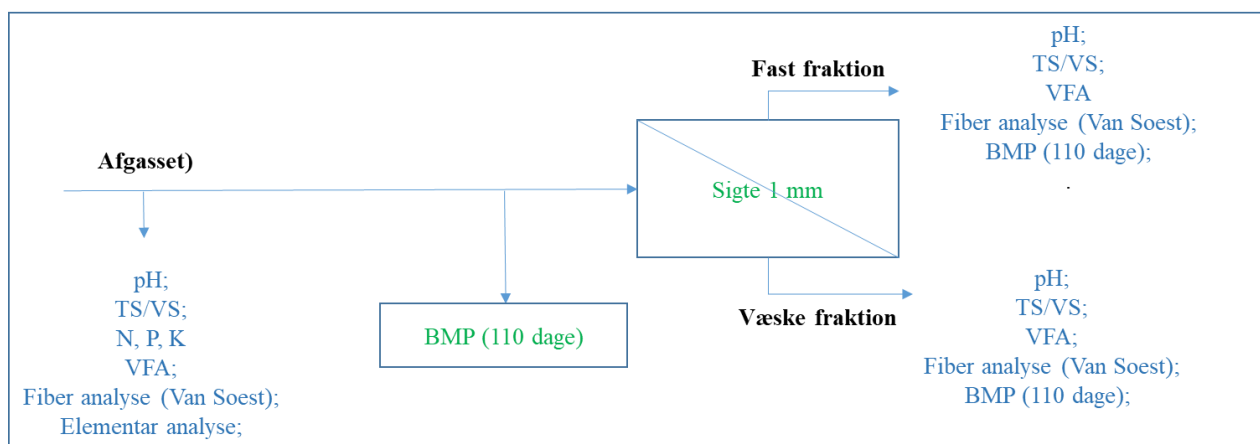
Ud fra besøgene på de 6 biogasanlæg, der på forskellig vis og i forskelligt omfang anvender halm, kan følgende konkluderes:

- Alle de besøgte anlæg er forskellige og drives forskelligt, ligesom der kan være forskellige tilgange og holdninger til, hvordan produktionen kan og bør være.
- Anlæggene er udviklet/udbygget over tid, og der er ofte afprøvet forskellige teknologier til håndtering af fast biomasse inkl. halm.
- Anlæggene har forskellige situationer mht. biomassegrundlag på egen bedrift og i oplandet. Biomassegrundlaget har betydning for, hvilke faste biomasser der især bruges, herunder hvilke halmtyper der anvendes (kornhalm, frøgræshalm, dybstrøelse mv.).
- Der er generelt tilfredshed med at bruge halm i biogasproduktionen. Det kan dog være svært at vurdere effekten af halm, når der bruges en række biomasser.
- Der opleves ingen væsentlige problemer med flydelag, og generelt forebygges flydelag med mere omrøring.
- Der er generelt mere slid på forskellige anlægsdele ved brug af fast biomasse såsom halm.
- Biogasanlæggene kan også gøre brug af en samarbejdsmodel med gylleleverandørerne, der kan tage halmpiller i brug som strøelsesmiddel i staldsystemerne. Halmpiller som strøelse giver sundhedsfordele i staldene og større gasudbytte af gyllen og halmen.

Biogasanlæggene udgør således eksempler på anlæg, der med succes anvender ganske betydelige mængder halm. Der er dog tale om landbrugsbaserede anlæg med generelt lange opholdstider. Det kan ikke ud fra dette projekt klart konkluderes, hvilke faktorer der er afgørende for, at anvendelsen af halm fungerer uden flydelag osv.

5. Karakterisering af afgasset biomasse fra anlæg, hvor der er tilført halm

I forbindelse med besøgsrunden på anlæggene er der udtaget prøver af afgasset gylle. Prøverne er blevet analyseret og anvendt til at bestemme rest-gaspotentialet. I figur 5.1 fremgår de forsøg og analyser, der er gennemført.



Figur 5.1. Oversigt over analyser foretaget på en *prøve" af det afgassede biomasser fra de besøgte anlæg.

5.1. Analyse af prøver fra biogasanlæg

Den afgassede biomasse blev separeret i en fast og en flydende fraktion. Separationen blev udført med en 1 mm sigte, med påvirkning af en vægt på ca. 500 kg/m² over 5 minutter. Vægtfordelingen af de faste og flydende fraktioner blev registreret og fremgår af tabel 5.1

Tabel 5.1. Fordeling af fast og flydende fraktion efter separation på 1 mm sigte.

		1. Brdr. Thorsen Biogas	2. Rybjerg Biogas	3. Vrej- lev Bio- energi	4. Au- sumgaard Biogas	5. Lyng- gård Bio- gas	Gennemsnit
Fast fraktion	(%)	32,77	41,32	30,53	54,60	10,80	34,00
Væskefraktion	(%)	67,23	58,68	69,47	45,40	89,20	66,00

Som man kan se, resulterer separation af den afgassede biomasse i en ca 2:1 fordeling mellem væske og fast fraktion for tre af biogasanlæggene; Ausumgaard skiller sig ud med et mere ligeligt ca. 1:1 forhold, mens Lynggård har meget høj andel væskefraktion med et forhold på 9:1.

Analysedata for den afgassede biomasse uden separation fremgår af tabel 5.2.

Tabel 5.2. Analyser af sammensætning af den afgassede biomasse fra de 5 anlæg.

Analyse	Enhed	1. Brdr. Thorsen Biogas	2. Rybjerg Biogas	3. Vrejlev Bioenergi	4. Ausumgaard Bio-gas	5. Lynggård Bio-gas	Gennemsnit
pH		7,98	8,00	8,03	8,05	7,86	7,98
TS	%	8,0	9,0	9,1	10,2	3,1	7,88
VS	%	5,9	6,5	6,8	7,9	2,1	5,84
VS/TS	%	73,8	72,4	74,9	77,4	67,5	73,20
C	% af VS	50,5	49,4	49,4	54,0	54,1	51,48
H	% af VS	6,0	5,7	5,8	8,4	5,5	6,26
N	% af VS	3,4	3,7	3,2	3,2	4,2	3,55
S	% af VS	0,6	0,7	0,3	1,4	0,6	0,70
O	% af VS	39,5	40,5	41,3	34,4	35,7	38,28
N-total	g/l	5,0	5,8	4,7	5,1	3,5	4,82
NH ₄ -N	g/l	2,8	3,2	2,2	2,4	2,3	2,58
P	g/l	0,7	1,1	0,8	0,9	0,4	0,78
K	g/l	3,9	3,4	3,4	4	1,5	3,24
NH ₄ /total N	%	56,0	55,2	46,8	47,1	65,7	54,15
C/N		14,9	13,3	15,4	16,7	12,9	14,6
N:NH ₄ -N:P:K		7:4:1:6	5:3:1:3	6:3:1:4	6:3:1:4	9:6:1:4	6:3:1:4

pH-værdier

Det fremgår, at pH i den afgassede biomasse varierer fra 7,86 til 8,05 med et gennemsnit på 8,0 og er således ret ensartet for de udvalgte anlæg i forhold til tidligere undersøgelser, hvor pH varierede fra 7,6 til 8,5 (Møller og Nielsen, 2016).

TS og VS indhold

Tørstofindholdet ligger mellem 8-10 % for alle anlæg, undtagen Lynggård med under det halve. For de første ligger VS på ca. 75% af tørstoffet, for Lynggård lidt lavere.

Elementar analyser

Den afgassede biomasse har i gennemsnit følgende sammensætning: C_{51,5}H_{6,3}N_{3,6}O_{38,2}S_{0,7}.

C/N forholdet er 12,9-16,6 med et gennemsnit på 14,6. C/N forholdet er bestemt på tørret materiale, hvor en del ammoniak er fordampet under processen, og repræsenterer derfor primært C/N i det organiske bundne; det reelle C/total-N forhold vil derfor være lavere.

Kvælstof

Indholdet af kvælstof i form af organisk kvælstof og uorganisk kvælstof er målt. Det uorganiske kvælstof består af ammonium og ammoniak, hvor summen betegnes som TAN. Total-indholdet af kvælstof (TN) er summen af organisk N og TAN.

Det er tidligere vist, at biogasprocessen bliver hæmmet ved alle pH værdier, når ammoniakkoncentrationen overstiger 3 g $\text{NH}_4\text{-N/l}$. Rybjerg Biogas er det eneste anlæg, hvor niveauet af ammoniak kan give anledning til hæmning.

Alle anlæg har et total-N indhold på godt 5 kg N per ton, undtagen Lynggård hvor indholdet af kvælstof er ca. 30% lavere.

Ammonium-andelen af total-N er for de fire første anlæg lidt over eller under 50%, men for Lynggård højere, ca. 65%.

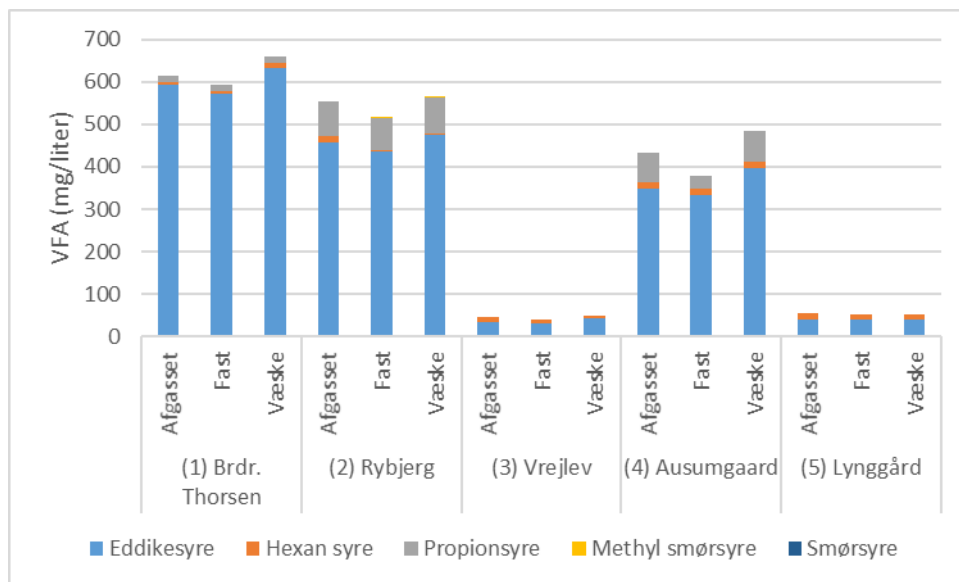
Øvrige næringsstoffer

Alle anlæg har et total-P og K indhold på knap 1 kg P og 3-4 kg K per ton, undtagen Lynggård hvor indholdet af begge næringsstoffer kun er godt det halve.

Forholdet mellem total-indholdet af de 3 vigtige makronæringsstoffer N:P:K (hvor P i alle forhold sættes til 1) er i gennemsnit for de 5 anlæg 6:1:4, men varierer fra 5:1:3 til 9:1:4.

VFA

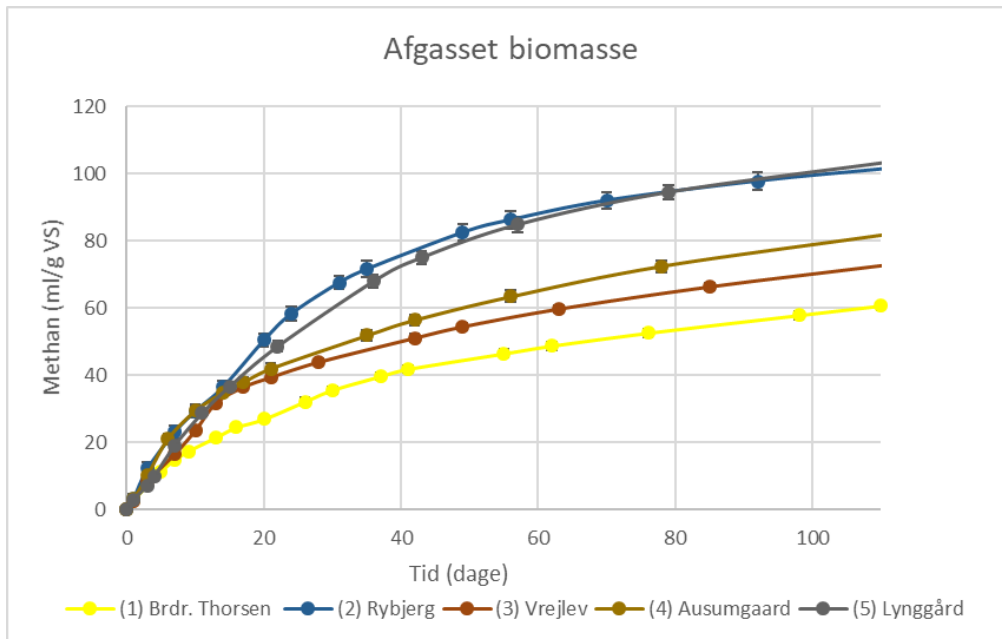
Indholdet af flygtige fede syrer (VFA) i afgasset biomasse fremgår af figur 5.2 Indholdet er generelt lavt på et niveau under 600 mg/l, og eddikesyre udgør den største andel. Vrejlev Bioenergi og Lynggård Biogas har væsentligt lavere niveauer end de øvrige. Talletene indikerer, at der er meget lidt af det meget let omsættelige tørstof tilbage på alle anlæggene.



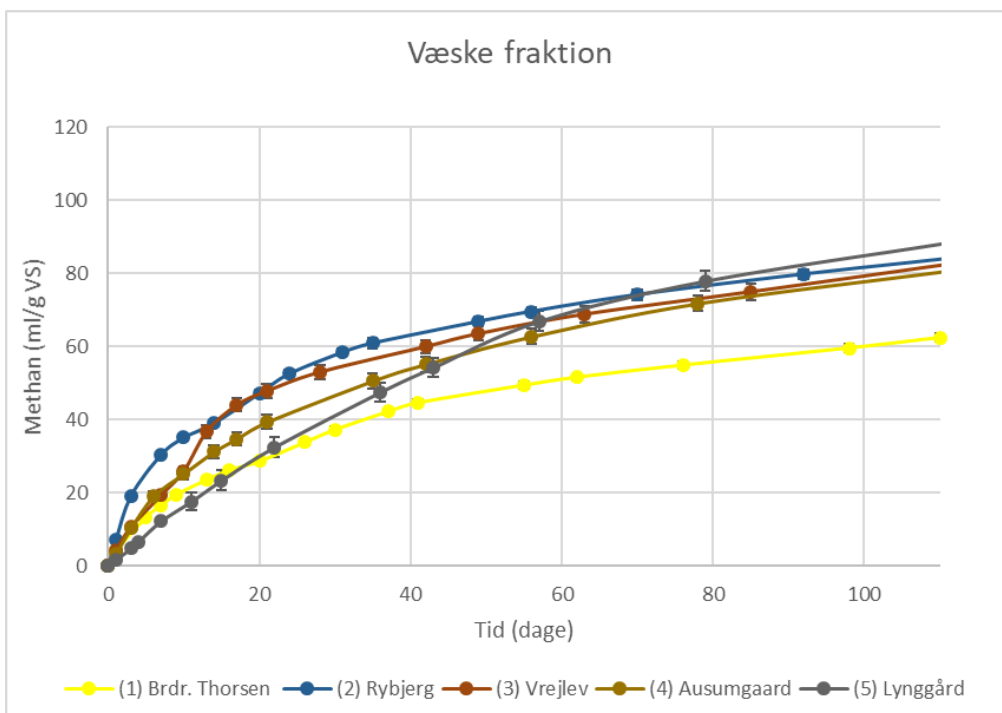
Figur 5.2. Indholdet af flygtige fede syrer (VFA) i den afgassede biomasse fra de besøgte anlæg. Indholdet er vist for afgasset biomasse uden separation samt i de to fraktioner efter separation.

Rest-gaspotentialer

Rest-gaspotentialer er det største opnåelige gasudbytte, der kan opnås ved efter-udrådning, hvis opholdstiden i sidste trin forlænges, så den samlede opholdstid i anlægget udvides til 110 dage. I figur 5.3-5.5 er vist rest-gaspotentialer i afgasset biomasse samt i væskefraktion og fast fraktion.

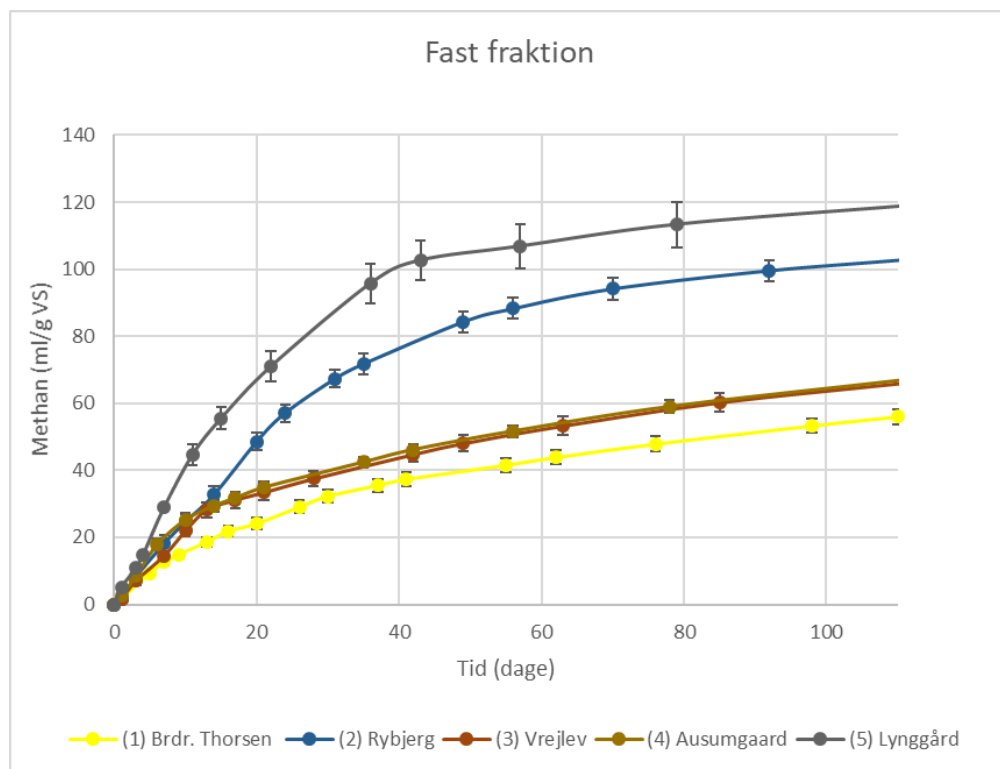


Figur 5.3. Rest-gaspotentialer i den afgassede biomasse fra de besøgte anlæg.



Figur 5.4. Rest-gaspotentialer i væskefraktionen fra den separerede, afgassede biomasse fra de besøgte anlæg.

Der er en stor variation mellem anlæggene, men til trods for lange opholdstider i anlæggene er der stadig et potentiale for at øge gasudbyttet ved forlænget opholdstid eller forbehandling. Det fremgår også at det væsentligste bidrag til variationen i restgaspotentiale stammer fra den faste fraktion (fig. 5.4)



Figur 5.5. Rest-gaspotentiale i den faste fraktion fra den separerede, afgassede biomasse fra de besøgte anlæg.

I tabel 5.3 er rest-gasudbytterne beregnet både i forhold til indhold af organisk stof og på basis af friskvægt. Det fremgår, at der i gennemsnit er et rest-gaspotentiale i den afgassede biomasse på ca. $4,8 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4/\text{ton}$ med en betydelig variation mellem anlæggene.

I forhold til tidligere undersøgelse af Møller og Nielsen (2016) ligger 3 af anlæggene i den kategori, der vil have en økonomisk gevinst ved forlænget opholdstid (Rybbjerg, Vrejlev og Ausumgaard), medens de øvrige anlæg vil have begrænset økonomisk værdi af det. De anlæg, der vil have størst værdi af forlænget opholdstid, er samtidigt de anlæg, der har det største tørstofindhold. Ved separation reduceres rest-gaspotentialet i væskefraktionen til i gennemsnit $2,9 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4/\text{ton}$, og en simpel separation er således en effektiv metode til at reducere rest-gaspotentialet og dermed potentialet for metanemission fra væskedelen, hvis den faste fraktion kan håndteres på en måde, så tab undgås.

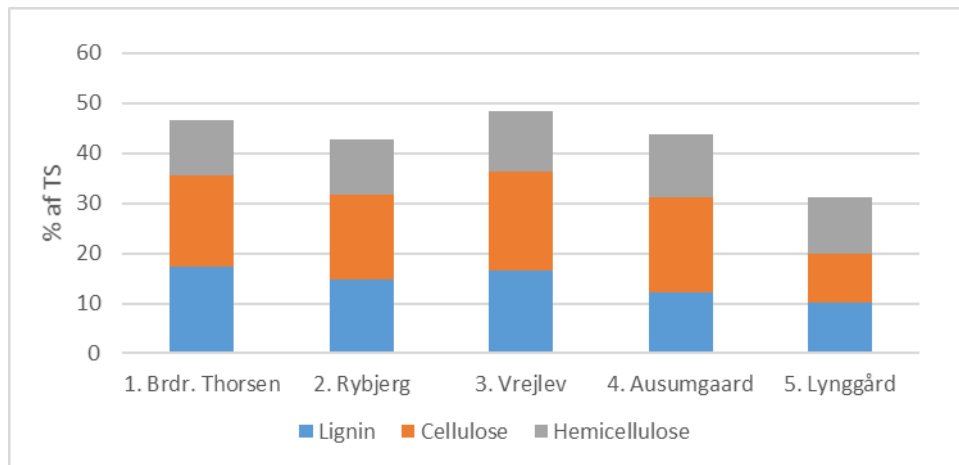
Tabel 5.3. Indhold af tørstof og organisk tørstof samt rest-gaspotentialer i afgasset biomasse.

Fraktion		Enhed	1. Brdr. Thorsen Biogas	2. Rybjerg Biogas	3. Vrejlev Bioenergi	4. Aulumgaard Biogas	5. Lynggård Biogas	Gennemsnit
Afgasset	TS	%	8,0	9,0	9,1	10,2	3,1	7,9
	VS	%	5,9	6,5	6,8	7,9	2,1	5,8
	rest-gas	Nm ³ /kg VS	60,8	101,6	73,0	82,1	103,7	84,3
		Nm ³ /ton	3,6	6,6	5,0	6,5	2,2	4,8
Væske	TS	%	6,0	5,9	2,4	6,3	7,1	5,5
	VS	%	4,0	3,7	1,5	4,1	4,9	3,6
	rest-gas	Nm ³ /kg VS	62,3	83,9	82,3	80,6	88,6	79,6
		Nm ³ /ton	2,5	3,1	1,3	3,3	4,3	2,9
Fast	TS	%	12,7	14,0	9,2	15,3	15,1	13,3
	VS	%	10,6	11,2	7,6	13,0	12,8	11,0
	rest-gas	Nm ³ /kg VS	56,0	102,9	66,2	66,9	119,0	82,2
		Nm ³ /ton	5,9	11,5	5,0	8,7	15,2	9,3

Fiberanalyser

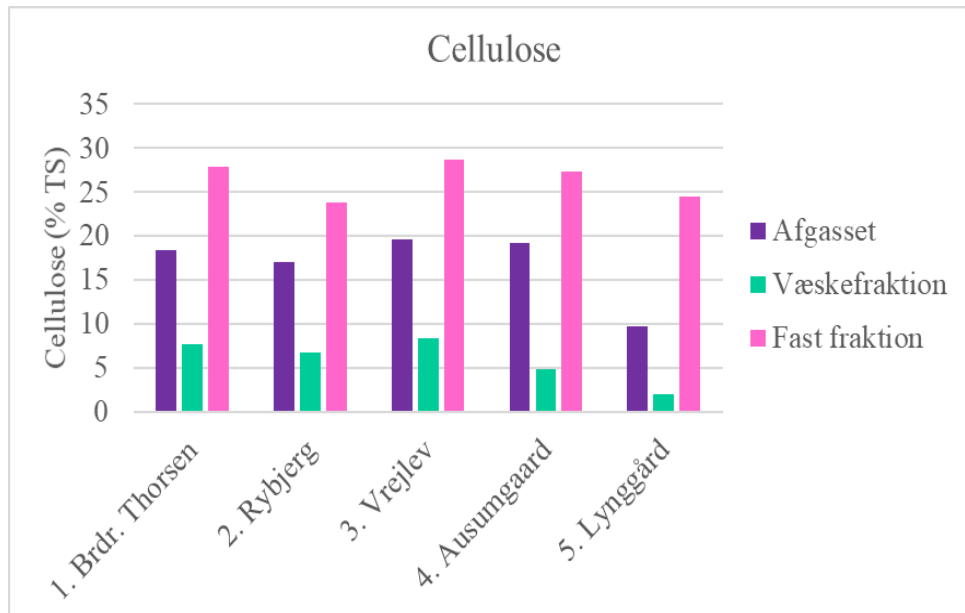
Den afgassede biomasse består efter afgangningen af organisk stof og aske. Det organiske stof består overvejende af ligno-cellulose, protein, fedt og en mindre mængde organiske syrer (VFA). Ligno-cellulosen er den største individuelle fraktion og er opbygget af cellulose, hemicellulose og lignin. Mængden af ligno-cellulose og sammensætningen af lignin, cellulose og hemicellulose er analyseret med Van Soest metoden.

Det fremgår af figur 5.6, at lignocellulose udgør 31-49% af tørstoffet. Lignin, cellulose og hemicellulose udgør i gennemsnit hhv. 14,2%, 16,8%, 11,6% af tørstoffet. 4 af anlæggene er forholdsvis ens i sammensætning medens Lynggård er meget forskellig fra de øvrige anlæg. Eftersom lignin indholdet på Lynggård er væsentligt lavere, må det formodes, at der på prøvetidspunktet har været anvendt mindre halm end på de øvrige anlæg.

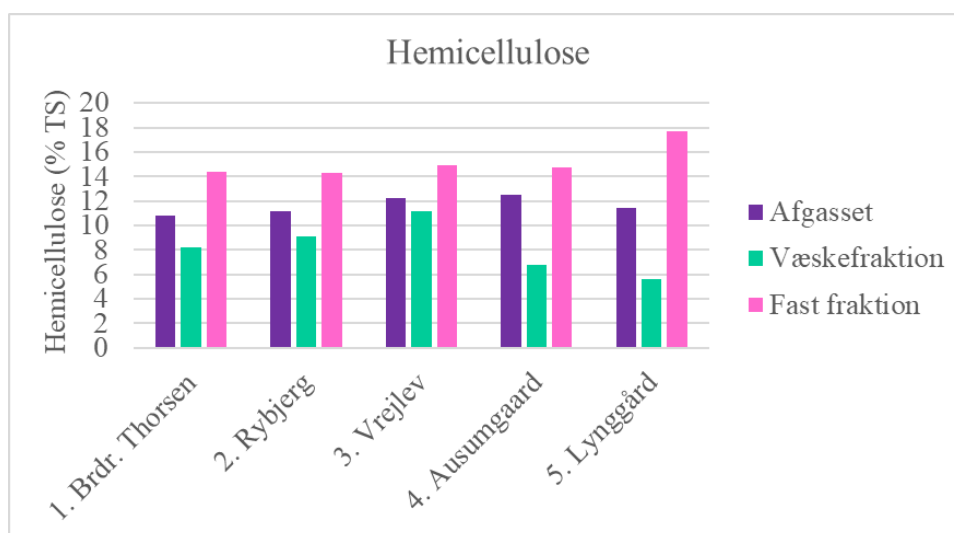


Figur 5.6. Fiberanalyse af den afgassede biomasse fra de besøgte anlæg.

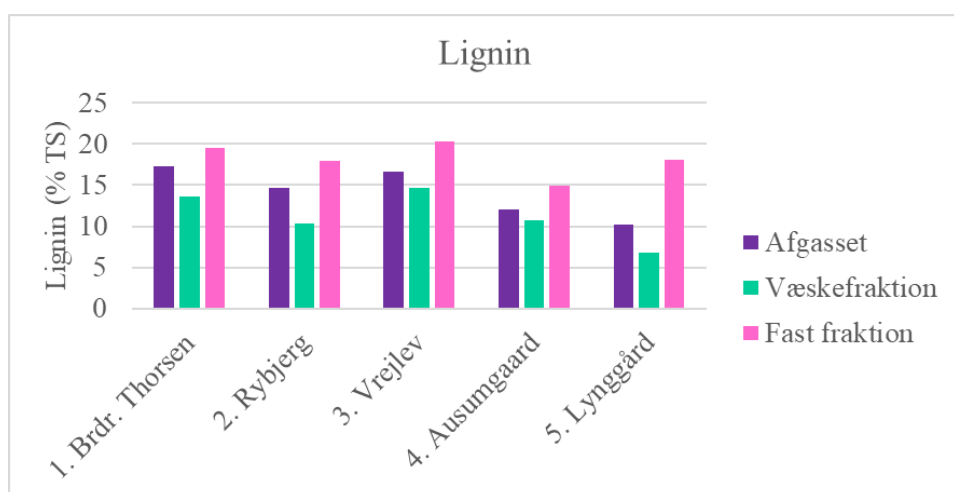
Indholdet af cellulose, hemicellulose og lignin i den afgassede biomasse, væsken og den faste fraktion fremgår af figur 5.7-5.9. Den faste fraktion indeholder den største andel af cellulosen og hemicellulosen. Det forventes, at en del af cellulosen og hemicellulosen vil kunne omsættes ved genudrådning af fiberen eller ved en længere opholdstid. Den største andel af cellulose og hemicellulose findes i den faste fraktion.



Figur 5.7. Indhold af cellulose i den afgassede biomasse samt de separerede fraktioner fra de besøgte anlæg.



Figur 5.8. Indhold af hemicellulose i den afgassede biomasse samt de separerede fraktioner fra de besøgte anlæg.



Figur 5.9. Indhold af lignin i den afgassede biomasse samt de separerede fraktioner fra de besøgte anlæg.

5.2. Vurdering af gødningsværdi af afgasset gylle

Gødningsværdien af den afgassede biomasse efter udbringning til afgrøder afhænger af en række faktorer. Først og fremmest af det absolutte indhold af plantenæringsstoffer, men også deres tilgængelighed og mulige risici for tab. For fosfor (P) og kalium (K) i gylle og afgasset biomasse gælder det generelt, at gødningsværdien ift. handelsgødning svarer stort set til total-indholdet af P og K, dvs. det er primært indholdet, der er afgørende.

For kvælstof (N) er det imidlertid helt anderledes - her er en del af kvælstoffet organisk bundet, og dermed ikke tilgængeligt. Ammonium-andelen (dvs. den uorganiske del af kvælstoffet) er dermed et godt mål for den potentielle plantetilgængelighed, forudsat ammoniak-fordampning efter udbringning kan begrænses til et minimum. Dette afhænger dog af pH i både den afgassede biomasse og jorden; desto tættere på pH 9,5, desto større risiko for ammoniaktab ved overfladeudbringning. Endvidere vil omsætning af den organiske del efter udbringning kunne resultere både i øget og reduceret tilgængelighed af kvælstof, alt afhængig af andelen af omsætteligt VS (f.eks. i form af VFA) og C/N forholdet i VS.

Ser man på den afgassede biomasse fra de 5 biogasanlæg, der er udtaget prøver på, så ligger pH omkring 8, hvilket er lidt lavere end hvad der observeres på mange biogasanlæg, og dermed udgør dette tilsyneladende ikke et særligt risiko-potentiale for bioforgasset gylle med halm. Tørstofindholdet ligger imidlertid for 4 af de 5 anlæg relativt højt, omkring 8-10 %, hvilket vil betyde, at biomassen efter overfladeudbringning vil infiltrere relativt langsomt, hvilket øger risikoen for ammoniaktab.

Med et total-N indhold på godt 5 kg N per ton indeholder den afgassede biomasse mindst lige så meget kvælstof som mange gylletyper, men ammonium-andelen af total-N er for de fire anlæg omkring 50% (et enkelt er på ca. 65%), hvilket er relativt lavt; i samme størrelsesorden som ofte findes for kvæggylle. Det vil alt andet lige betyde et lavt potentielt værdital, som ikke er på højde med den øgning i værdital på ca. 15%, som man tidligere har fundet for gylle, der blev bioforgasset. Endvidere ligger C/N forholdet i den organiske del af gyllen (VS) mellem 13 og 17 (tabel 5.2), og det betyder at omsætning af dette i jorden umiddelbart efter udbringning vil kunne forårsage en vis immobilisering af ammonium-N, især for C/N i den høje ende og især, hvis der er et vist indhold af VFA (Fig. 5.2). Dermed er der risiko for at kvælstofgødningsværdien reduceres yderligere.

Kigger vi på prøvernes indhold af total-P og K, så har alle anlæg på nær et knap 1 kg P og 3-4 kg K per ton (det sidste anlæg har dog kun godt det halve af begge næringsstoffer). Dette svarer helt til indholdet i mange gylletyper.

Forholdet mellem de tre makronæringsstoffer kan man bruge til at vurdere i hvor høj grad, den afgassede biomasse kan bruges til at fuldgøde typiske afgrøder, dvs. opfylde alle deres næringsstofbehov. Som gennemsnit af anlæggene er forholdet mellem total-N : ammonium-N : total-P : total-K ca. 6:3:1:4 (igen skiller et af anlæggene sig ud med et højere N og NH₄-N indhold ift. P og K). Afgrødernes N:P:K behovsratio varierer naturligvis, men for mange kornafgrøder ligger det på ca. 8:1:3. Hvis vi antager, at ammonium-delen svarer til den potentielle kvælstof-gødningsværdi, så har den afgassede gylle + halm altså et forhold på ca. 3:1:4, og det er dermed klart, at hvis denne doseres ift. P og K behov hos afgrøden (som her vil være det mest begrænsende) så kan den afgassede biomasse ikke fungere som en ideel fuldgødskning, men skal suppleres med yderlige mineralsk kvælstofgødning.

De separerede væske- og fast-fraktioner er kun analyseret for cellulose, hemicellulose og lignin, men ikke for N, P og K. Generel erfaring med mekanisk separation er dog at en stor del af det organiske N og total-P vil ende i den faste fraktion, og dermed øges N:P ratioen

men også $\text{NH}_4\text{-N}:\text{total-N}$ forholdet i væskefraktionen. Det vil klart øge biomassens egnethed som gødning – og for gylle bioforgasset med halm kan det måske være en nødvendig behandling, hvis væskefraktion skal kunne bruges som et værdifuldt gødningsmiddel.

5.3. Konklusioner vedr. analyser af afgasset biomasse

Resultaterne fra forsøg til bestemmelse af restgas-potentialet viser at der er i gennemsnit et uudnyttet gas potentiale i den afgassede biomasse på ca. $4,8 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4/\text{ton}$ med en betydelig variation mellem anlæggene. Rest-gaspotentialet varierer således mellem $2,2\text{-}6,6 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4/\text{ton}$ og $61\text{-}103 \text{ l CH}_4/\text{kg VS}$. I sammenligning med tidligere undersøgelser ligger 3 af anlæggene i den kategori, der vil have en økonomisk gevinst ved forlænget opholdstid medens de øvrige vil have begrænset økonomisk værdi af det. De anlæg der vil have størst værdi af forlænget opholdstid er samtidigt de anlæg der har det største tørstofindhold. Ved separation reduceres rest-gaspotentialet i væskefraktionen til i gennemsnit $2,9 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4/\text{ton}$, og en simpel separation er således en effektiv metode til at reducere restgas-potentialet og dermed potentialet for metanemission fra væskedelen, hvis den faste fraktion kan håndteres på en måde, så tab undgås. Sammenfattende omkring den afgassede biomasse kan det konkluderes af lignocellulose udgør $31\text{-}49\%$ af tørstoffet. Lignin, cellulose og hemicellulose udgør i gennemsnit hhv. $14,2\%$, $16,8\%$, $11,6\%$ af tørstoffet.

Sammenfattende omkring gødningsværdi af afgasset gylle og halm kan det konkluderes, at der er et fornuftigt indhold af de vigtige makronæringsstoffer N, P og K, men at forholdet mellem dem ikke matcher typiske afgrøders N:P:K behov. Der er for lidt tilgængeligt N ift. P og K. Dette skyldes bl.a., at ammonium-andelen er for lav ift. den forventede øgede andel efter bioforgasning, og der kan endvidere være risiko for både fordampning og immobilisering af ellers tilgængeligt ammonium-N. Det skyldes sandsynligvis, at der i biogasreaktoren bindes en del af ammonium-N på organisk form under omsætningen af halmen (der indeholder meget lidt N, dvs. har et højt C/N forhold), og at en lidt for stor andel af halmen endnu er uomsat pga. af for kort opholdstid eller utilstrækkelig omsætning.

6. Analyse af scenarier for anvendelse af halm i biogasproduktionen

Formålet med en analyse af forskellige scenarier for anvendelse af halm i biogasproduktionen er at demonstrere, hvordan forskellige typer af strategier til håndtering og forbehandling af halm påvirker den samlede effekt på energiudbytte og drivhusgasudledning.

På baggrund af analyserne vurderes scenarierne i forhold til hinanden og i forhold til et scenarie uden biogas, hvor halmen nedmuldes direkte på marken eller indsamles og udnyttes til forbrænding i et varme- eller kraftvarmeværk.

Figuren herunder viser et eksempel på den kæde af processer fra halmen ligger på marken og frem til behandling og udnyttelse af den afgassede biomasse, som indeholder den del af halmen, som ikke er omsat i biogasreaktoren. Hvert af de viste processer indeholder en række enhedsoperationer.



Der er mange muligheder for variationer i den overordnede forsyningskæde. Ligeledes er der ofte mange valgmuligheder for de teknologier og metoder, som anvendes til at udføre de enkelte enhedsoperationer under hvert procestrin.

Tre scenarier er udvalgt, som repræsenterer tre overordnede forsyningskæder fra opsamling af halmen på marken og frem til og med behandlingen og udnyttelsen af den afgassede biomasse (digestat). De tre scenarier er defineret med det mål at optimere de positive effekter på klima og miljø, samtidig med at omkostningerne forbundet med den konkrete forsyningskæde er minimeret.

Det er ikke realistisk at identificere ét scenarie, som passer alle steder. Hvad der er optimalt, vil afhænge af lokale forhold på og omkring biogasanlægget.

6.1. Beregninger og forudsætninger

Afgrænsning

I beregningerne vil følgende parametre indgå:

- Energiudbytte og fortrængning af naturgas
- Energiforbrug til proces (varme og el)
- Energiforbrug til transport (og bjergning) af biomasse
- Energiforbrug til ensilering eller forbehandling
- Metanemission fra lækage i biogasanlæg
- Metanemission ved lagring af biomasse
- Kulstoflagring i jord fra halmen med 20 års tidshorisont efter tilførsel af nedmuldet halm, halmasker, digestat eller biochar af digestat fiberfraktion.

Følgende parametre og hvordan de påvirkes af alternativerne i scenarierne, indgår ikke i beregningerne:

- Ammoniaktab fra proces, lager eller udbringning
- Lattergas- og NO_x-emissioner fra proces, lager eller udbringning
- Kvælstofudvaskning efter udbringning

Disse parametre kan påvirkes væsentligt i de tre scenarier, men de er vanskeligere at estimere, og der har ikke været ressourcer til det i dette projekt.

Energiudbytte og fortrængning af naturgas

Effekten ved fortrængning af fossil energi er beregnet for de forskellige modelanlæg ved en opholdstid på 60 dage (HRT). Endvidere er energibalancen beregnet med og uden varmeveksling. Dette er gjort for en række forudsætninger (tabel 6.1).

I beregningerne tages udgangspunkt i fortrængning af naturgas. Det antages, at det metan, der substitueres, er af fossil oprindelse med en emission på $0,057 \text{ kg MJ}^{-1}$ (Møller et al., 2008). El-forbruget på anlægget til omrører, pumper mm. antages at blive dækket af et miks af den danske el-produktion, som anslås til $0,150 \text{ g CO}_2 \text{ kWh}^{-1}$ i 2019 baseret på beregninger fra Energinet.dk (2019). Varmeforbruget til opvarmning af biomasse og temperaturkontrol af reaktorer produceres med naturgas, da det er normal praksis, at alt biogas opgraderes og købes tilbage af anlægget af afgiftsmæssige grunde. Elforbruget til biogasprocessen opgøres som det gennemsnitlige forbrug pr. tons biomasse fra 16 anlæg (Møller og Nielsen, 2016) og er anslået til $6,5 \text{ kWh ton}^{-1}$.

Tabel 6.1. Forudsætninger for energiberegninger af biogas.

Forudsætninger	
Tanktype	Ståltank
Væskevolumen	8000 m^3
Ca. dimension	$\varnothing 16 \times H=20 \text{ m}$ ($H=1,25 \times D$)
Isolering	200 mm mineraluld + trapezplade
Omrøring	Tophængt(e) vertikalomrører(e)
Gennemsnitlig udetemperatur	8°C
Gennemsnitlig temperatur af biomasse (Møller et al., 2019)	15°C
Gennemsnitlig temperatur af biomasse der forlader reaktor	25°C
Gennemsnitlig temperatur af biomasse der forlader biogas-anlæg	20°C
Den specifikke varmekapacitet for biomasse (Møller et al. 2008) ¹	$4,2 \text{ kJ K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$

¹ Cp for tørt organisk stof (halm, træ mv.) er ca. $1,3 - 2 \text{ kJ K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$. For vand er det $4,2 \text{ kJ K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$. Da der er ca. 90-95% vand i afgasset biomasse antages Cp som i vand for alle modelanlæg.

Den producerede metanmængde fastsættes for hver enkel biomasse, og ved modellering med Gompertz ligning beregnes gaspotentialet til en given tid (Olesen et al. 2020):

$$M(t) = B_0 \cdot (1 - e^{-k \cdot t}) \quad (4)$$

hvor M er det kumulative CH_4 -udbytte ($\text{ml g}^{-1} \text{ VS}$), B_0 er det teoretiske CH_4 -udbytte ($\text{ml g}^{-1} \text{ VS}$), k er en første ordens kinetisk hastighedskonstant, og t er tiden. Det teoretiske gaspotentiale angiver det teoretisk mulige CH_4 -udbytte ved en fuldstændig omsætning af alt organisk stof og anvendes til at fastsætte, hvor stor en andel af det organiske stof der omsættes i biogasprocessen. Det teoretiske gasudbytte kan beregnes, hvis forholdet C:H:N:O:S i biomassen kendes, eller ved at bestemme indholdet af de væsentligste organiske indholdsstoffer som kulhydrat, protein, lipid, VFA og lignin. Gasudbyttet vil også kunne anslås ud fra litteraturdata.

Andelen af organisk stof, der er tilbage efter biogasprocessen, fastsættes som forholdet mellem M ved den anvendte opholdstid og det teoretiske gasudbytte. De anvendte værdier for gasudbytte er vist i tabel 6.2.

Tabel 6.2. Antagelser om tørstofindhold og gaspotentiale for biomasser til biogas. VS er organisk stof. Ultimativt metanudbytte er det udbytte, der opnås ved lang opholdstid på mere end 90 dage.

¹Udbytterne for halm er under forudsætning af neddeling og ensilering eller brikettering.

Biomasse	Tørstof %	VS i tørstof %	Metanudbytte 60 dage L kg ⁻¹ VS	Ultimativt metanudbytte L kg ⁻¹ VS
Kvæggylle	7,7	80	250	275
Svinegylle	5,4	80	345	350
Hvedehalm ¹	45	95	286	290

Energiforbrug til transport af biomasser

Biomassen, der tilføres biogasfællesanlæg, transporteres i enten flydende eller fast form. Transportmængden af de forskellige biomasser varierer, og der antages forskelligt diesel-forbrug pr. kørt km. Tabel 6.3 viser forudsætningerne for energiforbrug og CO₂-udledning ved transport. Afstandene regnes som gennemsnitlig mertransport i forhold til situationen, hvor biomassen ikke tilføres biogasanlæg.

Tabel 6.3. Forudsætninger for transport af biomasse. Der regnes med en CO₂-udledning på 2,7 kg pr. liter diesel.

Biomasse type	Kategori	Af-stand, km	Transport-mængde ton læs ⁻¹	Dieselforbrug		CO ₂ udledning kg CO ₂ ton ⁻¹
				km L ⁻¹	L ton ⁻¹	
Kvæggylle	Gylle	20	38.000	1,2	0,4	1,2
Svinegylle	Gylle	20	38.000	1,2	0,4	1,2
Hvedehalm	Andet biomasse	20	15.000	2,8	0,5	1,3

Metan emission fra lækage

Der kan ske metanudslip fra forskellige kilder på biogasanlægget. Kilder til metanudslip kan være opbevaringstanke med ubehandlet og afgasset biomasse samt lækager på biogas- og opgraderingsanlæg. Der er i de senere år sket en betydelig indsats i forhold til reduktion af metanlækager fra anlæggene. Indtil 2018 blev metantabet undersøgt på et stort antal anlæg med en samlet produktion på ca. 150 mio. Nm³ CH₄, svarende til ca. halvdelen af biogasproduktionen i 2018. Det aktuelle samlede tab blev målt til ca. 1,1 %, og nærmer sig Biogasbranchens mål om et tab i 2020 på maksimalt 1 % (Nielsen, 2019). Siden 2018 er der sket en betydelig indsats for yderligere at reducere lækagerne. I beregningerne er anvendt et tab på 1% af det producerede metan.

Energiforbrug til ensilering eller forbehandling

Energiforbrug til ensilering af halm er fastsat til 5 liter diesel pr. ton våd halm ved 42% tørstof (Christensen and Schjønning, 1987). Processen inkluderer en neddeling med I-Grinder og sammenkørsel af den våde halm i stak. I forbindelse med forbehandling af tør halm med briket-presse er indregnet et elforbrug på 100 kWh/ton halm. Der indregnes ikke energiforbrug til presning af halm, da der ikke vurderes at være forskel i forhold til levering til varmeværk eller biogas.

Metan-emission ved lagring af biomasse

Der anvendes samme beregningsgrundlag som i den nationale opgørelse (Mikkelsen et al., 2016), hvor mængderne af let omsætteligt (VS_d , kg kg^{-1}) og tungt omsætteligt organisk stof (VS_{nd} , kg kg^{-1}) i gylle og afgasset biomasse er grundlaget for en beregning af metan-emission, som bl.a. afhænger af opbevaringstemperaturen. Den centrale formel er:

$$F_t = (VS_d + 0.01VS_{nd}) e^{(\ln A - \frac{E_a}{RT})} \quad (1)$$

hvor F_t er metanproduktionsraten (g CH_4 kg^{-1} VS h^{-1}), E_a er processens aktiveringsenergi (J mol^{-1}), $\ln A$ (g CH_4 kg^{-1} VS h^{-1}) er en konstant relateret til gyllens metanproduktionspotentiale, R er den universelle gaskonstant (J K^{-1} mol^{-1}), og T er temperaturen (K). Denne formel kan anvendes til beregning af en daglig metan-emission med de nævnte forudsætninger; det vil sige, at mængde og nedbrydelighed samt opbevaringstemperatur er styrende variable, mens øvrige parametre er konstante (Olesen et al. 2020). E_a vurderes at være konstant for alle typer biomasse, medens $\ln A$ er forskellig mellem ubehandlet og afgasset biomasse (Olesen et al. 2020). I tabel 6.4 er metanemissionen ved lagring af hhv. ubehandlet og afgasset biomasse angivet.

Tabel 6.4. Metan-emission ved lagring over 9 måneder af hhv. ubehandlet og afgasset biomasse.

	Ubehandlet	Afgasset
	(g CH_4 /kg VS)	
Halm	0	6,02
Kvæggylle	14,91	6,02
Svinegylle	40,05	6,02

Kulstoflagring i jord

Kulstoflagringen fra halm vurderes på forskellig vis, afhængigt af den form det tilføres til jorden på i scenarierne uden biogas eller med biogas: direkte nedmuldet i marken, forbrændt på kraftvarmeanlæg med udbringning af restkulstof i halmaske, eller ensileret eller briketteret og bioforgasset og udbragt i rå digestat, eller separeret og udbragt i væskefraktion og fiberfraktion pyrolyseret og udbragt som biochar. Det antages, at halmen ved nedmuldning har et gennemsnitligt initialt kulstofindhold på 42 % af TS (Christensen &

Schjønning, 1987), dvs. 189 kg kulstof per ton halm til ensilering (45% TS) eller 353 kg kulstof pr. ton presset halm (84% TS).

Den potentielle kulstoflagring fra nedmuldet halm baseres på en eksponentielt aftagende fremskrivning af forsøgsresultater for kulstofindhold i jorden efter halmnedmulding op til 18 år fra Christensen og Schjønning (1987). På baggrund af disse estimeres det med en simpel enkelt-pulje eksponentiel henfaldsfunktion, at der efter 2 år er ca. 26 % af det tilførte kulstof tilbage, efter 20 år ca. 7,5 %, mens der efter 100 år kun er 0,03 % af kulstoffet tilbage fra den nedmuldede halm i år 0. Sidstnævnte er dog formodentlig underestimeret, da det dels repræsenterer en væsentlig ekstrapolering ud over de forsøgsdata der er estimeret på, dels at der i realiteten sker en betydende yderligere stabilisering af tilført kulstof over tid, som denne simple en-pulje tilpasning ikke kan beskrive. En estimering af en længere tidshorisont som 100 år vil kræve en mere avanceret dynamisk modellering (som f.eks. Yoshida et al., 2018), der ikke ligger indenfor rammerne af dette projekt; vi har derfor i det efterfølgende valgt kun at estimere kulstof lagring indenfor de første 20 år, både for halm nedmuldet direkte og i de andre former.

For den potentielle kulstoflagring for bioforgasset halm (ensilage eller tørt) mangler der generelt data i litteraturen på nedbydeligheden og lagringen af kulstof i jorden fra digestatet. En af de få brugbare kilder, Thomsen et al. (2013), estimerede, at 42 % af kulstoffet i bioforgasset græsensilage nedbrydes over 1-2 år, hvorved 58 % af kulstoffet tilbageholdes i jorden efter 2 år. Det svarer til godt den dobbelte tilbageholdelse af kulstoffet i forhold til nedmuldet halm beskrevet ovenfor (hvor der kun tilbageholdes knap 30 % efter 2 år); over 20 år antager vi derfor, at 15 % af det udbragte kulstof i den bioforgassede halm tilbageholdes. Dette svarer meget godt til de 13 % tilbageholdelse Thomsen *et al.* (2013) selv estimerede for 'long-term carbon storage', uden at de dog angav, hvilken tidshorisont long-term dækker over.

Stabiliteten på den producerede biochar estimeres med udgangspunkt i et O:C ratio beregnet ud fra pyrolyseret spildevandsslam på et anlæg, som det der er udviklet af Aquagreen (Ravenni et al. (2020)); det antages, at digestat-fiberfraktion på mange punkter ligner spildevandsslam. Derfor regner vi med, at den producerede halm-biochar produceret fra digestat-fiberfraktion har et O:C ratio på 0,24, hvilket resulterer i en estimeret halveringstid på ca. 1000 år (Ravenni et al., 2020; Spokas, 2010). Det antages, at kulstoffet i biochar har en halveringstid på 1000 år, hvilket svarer til, at der efter 20 år er 99 % af det udbragte kulstof i biochar på jorden tilbage.

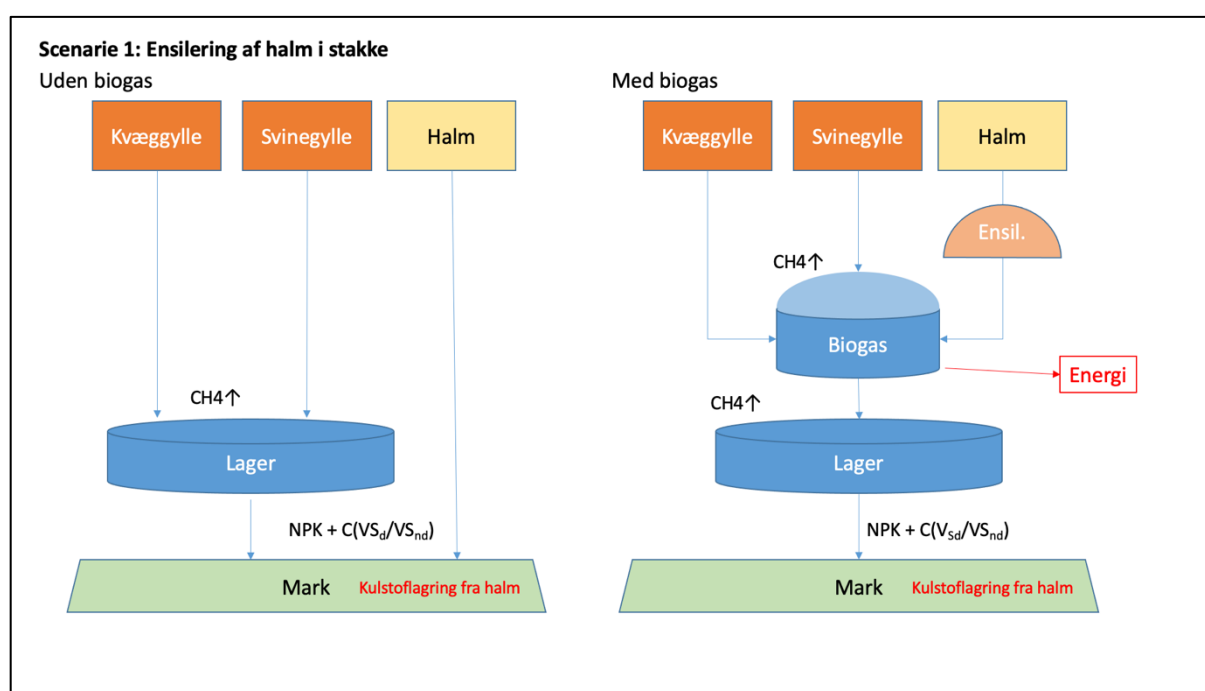
For rest-kulstof i halmaske, der udbringes på jorden, antager vi samme stabilisering som for biochar.

I alle scenarier med og uden biogas beregnes effekter på kulstoflagring i jord i forhold til, at halmen fjernes fra marken til andre formål. Desuden regnes reduktion af drivhusgas-emissioner (angives i CO₂-eq) som positive værdier, mens negative værdier angiver øgede emissioner.

6.2. Scenarie 1: Ensilering af halm i stakke

Beskrivelse af scenarie 1

Det beregnes, hvor stor CO₂-effekt det vil have at anvende 25 % halm ensilage (friskvægt) som biomasse på biogasanlægget (dvs. 75 % gylle), i forhold til et scenarie uden biogas hvor halmen ikke indsamles, men nedmuldes direkte på marken, og gyllen anvendes ubehandlet. Parametrene estimeres i et biogasscenarie og i et uden-biogas scenarie for at kunne fastsætte effekten af biogas (figur 6.1).



Figur 6.1. Principskitse af Scenarie 1.

Forbehandling af halm til scenarie med biogas

Halm på marken snittes med finsnitter og neddeles med I-Grinder i fugtig/våd tilstand (45 % TS), lagres som ensilage i overdækket markstak eller i plansilo, neddeles og indføres i biogasreaktorerne med traditionelt system for indfødnings af majsensilage ("grovfoderbland"). Ved at bjerge halmen i fugtig tilstand og lagre det som ensilage, er det hensigten, at halmen gøres lettere at håndtere i reaktoren samtidig med, at gasudbyttet pr. ton halm måske øges på grund af en lettere omsætning i reaktoren. Desuden giver denne løsning mulighed for at udnytte lokale, våde restbiomasser som f.eks. roetoppe til samensilering med halm med de klima- og miljømæssige gevinster, som følger heraf. Bio-forgasset gylle (digestatet) køres på mark uden yderligere behandling (i scenarie 3 sker der derimod en yderligere behandling inden udbringning).

Beregninger og forudsætninger:

Der opstilles et modelanlæg til at beregne klimaeffekten af at anvende ensileret halm i et biogasanlæg. Anlægget dimensioneres efter en opholdstid på ca. 60 dage. Anlægget forsynes udelukkende med gylle og ensileret halm. Mængden af ensileret halm, der kan tilsættes, er begrænset af, at der er et maksimum for hvor højt tørstofindhold, der kan håndteres i reaktoren. I undersøgelsen antages, at der kan anvendes 25 % halmensilage og et ligeligt miks af kvæg og svinegylle.

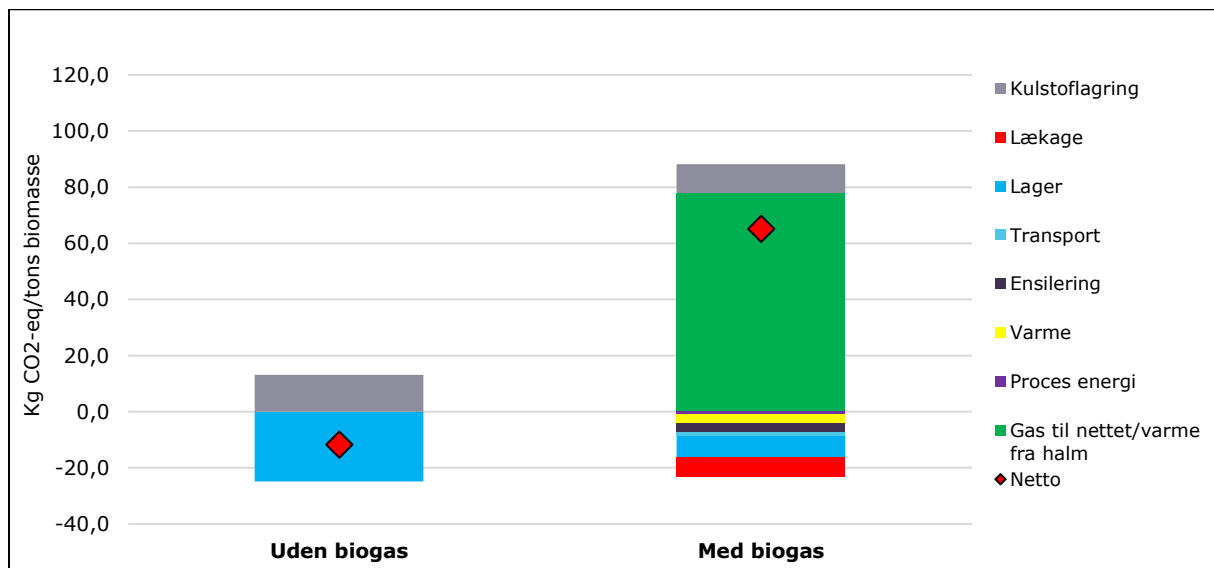
Det antages, at det organiske materiale (VS), der er tilbage efter afgang, er 33,9 % af den tilførte mængde halm ensilage VS før afgang. Andelen af VS der er tilbage efter afgang er baseret på en antagelse om, at det svarer til forholdet mellem det gasudbytte der opnås pr. kg VS og det teoretiske gaspotentiale pr. kg VS. Det gennemsnitlige kulstofindhold i det bioforgassede organiske materiale antages at være 51 % af VS (gennemsnittet af kulstofindholdet fundet i analyser ved Brdr. Thorsen Biogas, Lynggård Biogas og Rybjerg Biogas). Af den tilbageværende mængde halm-kulstof beregnes derefter, som beskrevet ovenfor, en kulstoflagring ud fra antagelsen om, at 15 % det tilførte kulstof tilbageholdes over 20 år.

Klima- og miljøeffekter – resultater for scenarie 1

Scenariet uden biogas har totalt set en negativ netto CO₂-effekt som følge af metan-tabet ved lagring af husdyrgødning, på trods af at kulstoflagring ved nedmuldningen af halm bidrager positivt (tabel 6.5 og figur 6.2). Biogasscenariet har totalt set en positiv CO₂-effekt, som i høj grad skyldes den positive effekt af den producerede biogas til nettet. Kulstoflagringen er en anelse lavere ved bioforgasning, da der sker et tab af kulstof ved bioforgasning, men det kulstof, der er tilbage, er til gengæld mere stabilt i jorden. I biogasscenariet bidrager energiforbrug til varme, ensilering og transport negativt, ligesom lækage af metan fra anlægget tæller negativt. Tabet af metan bidrager ligeledes negativt primært som følge af emission fra den del af VS fra husdyrgødning og halm, der ikke er omsat, men emissionen er stadig væsentlig lavere end i scenariet uden biogas med lagring af ubehandlet gylle.

Tabel 6.5. Oversigt over netto klimaeffekt og de enkelte parametres/processers bidrag til årlig effekt, opgjort i CO₂-ækvivalenter pr. ton friskvægt biomasse (her 25 % halm og 75 % gylle) i scenarie 1 uden og med biogas. Positive værdier indikerer en reduktion af klimabelastning, mens negative værdier øger disse. 'Kulstof – tilført og lagret med 20-årig horisont' angiver, hvor meget kulstof der er lagret efter 20 år opgjort pr. ton halm, pr. ton biomasse og pr. ton tørstof (i biomasse).

	Uden bio-gas (kg CO ₂ -eq /ton biomasse)	Med biogas (kg CO ₂ -eq /ton biomasse)	Nettoeffekt (kg CO ₂ -eq /ton biomasse)
Gas til nettet	0,0	77,9	77,9
Proces energi	0,0	-1,0	-1,0
Varme	0,0	-3,1	-3,1
Ensilering	0,0	-3,4	-3,4
Transport	0,0	-1,2	-1,2
Lager	-24,8	-7,5	17,3
Lækage	0,0	-6,9	-6,9
Kulstoflagring	13,1	10,2	-2,9
Netto	-11,8	65,1	76,9
<i>Kulstof lagret med 20-årig horisont</i>			
Kulstoflagring i jord (kg CO ₂ -eq/ton halm)	52,2	40,8	
Kulstoflagring i jord (kg CO ₂ -eq/ton biomasse)	13,1	10,2	
Kulstoflagring i jord (kg CO ₂ -eq/ton TS)	31,1	24,3	

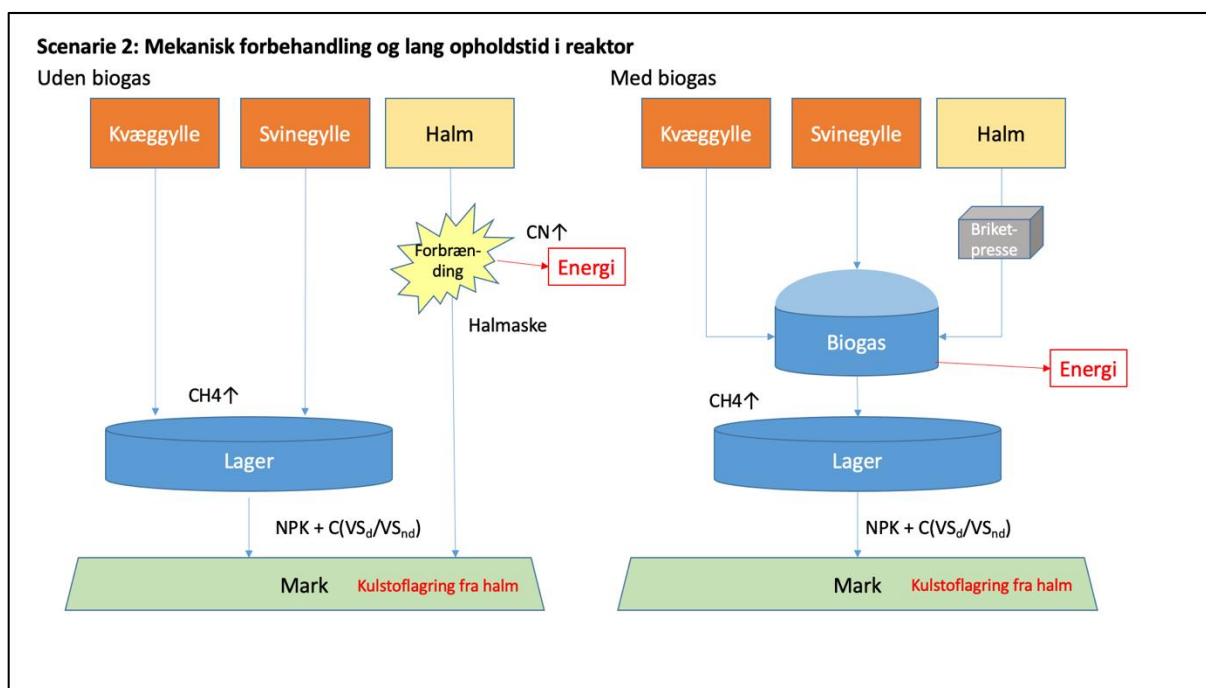


Figur 6.2. Samlet netto klimaeffekt og de enkelte parametres/processers bidrag til årlig effekt, opgjort i CO₂-ækvivalenter pr. ton friskvægt biomasse i scenarie 1 uden og med biogas.

6.3. Scenarie 2: Mekanisk og kemisk forbehandling og lang opholdstid i reaktor

Beskrivelse af scenarie 2

Det beregnes, hvor stor CO₂ effekt det vil have at anvende 15 % forbehandlet halm (presset og lagerfast, pelleteret) i forhold til en et scenarie uden biogas, hvor halmen forbrændes på et kraftvarmewærk, og gyllen anvendes ubehandlet. Det forudsættes, at halmen til biogasanlægget forbehandles ved brikettering. Parametrene estimeres i et biogasscenarie og i et scenarie uden biogas men med anvendelse af halmen til kraft-varmeproduktion, for at kunne fastsætte den reelle effekt af bioforgasning af tør og presset halm (figur 6.3).



Figur 6.3. Principskitse af scenarie 2.

Forbehandling af halm til scenarie med biogas

Halm presses i bigballer (ca. 85 % tørstof), lagres i markstakke hos landmanden eller ved biogasanlægget, neddeles/forbehandles mekanisk på biogasanlægget eller decentralt (se kapitel 7) med briketpresse, indføres i reaktorerne, hvor der er en relativt lang opholdstid (60 dage). Afgasset biomasse køres på mark uden yderligere behandling. Med denne løsning er intentionen at gøre bjærgningen og lagringen af halmen så billig som mulig ved at anvende teknologier og metoder, som er optimerede og velafprøvede over en lang periode. Udfordringen er at finde den rette kombination af en mekanisk forbehandling og opholdstid, som dels sikrer et tilfredsstillende gasudbytte samtidig med, at halmen rent praktisk kan håndteres i biogasreaktoren uden dannelse af flydelag og uden meget stort energiforbrug til omrøring.

Beregninger og forudsætninger

Der opstilles et scenarie til at beregne klimaeffekten af et biogasanlæg, der anvender tør halm med en mekanisk forbehandling. Dette kan eksempelvis være en briketpresse. Anlægget forsynes med gylle og tør halm med en powerfeed. Mængden af briketteret halm, der kan tilsættes, er begrænset af, at der er et maksimum for, hvor højt tørstofindhold, der kan håndteres i reaktoren. I undersøgelsen antages, at der kan anvendes ca. 15 % tørt og forbehandlet halm og et ligeligt miks af kvæg og svinegylle.

I scenariet uden biogas antages det, at halmen afbrændes i et kraftvarmeanlæg med 85 % virkningsgrad på kedel med en produktion på 17,6 MJ/kg TS.

Den potentielle kulstoflagring fra forbrænding af halm til kraftvarmeanlæg (uden biogas) vurderes ud fra stabiliteten af kulstof tilført jorden fra halmaske. Det antages, at der produceres 4 % aske pr. ton afbrændt halm, og at 20 % af den producerede aske er flyveaske (Skøtt, 2011). Den resterende bundaske (som er den, der må udbringes som halmaske på landbrugsjord) indeholder kun ganske lidt uforbrændt VS, typisk ca. 2-5 % af TS (Hansen, 2004), vi antager her 5 %, og kulstofindholdet i dette VS er gennemsnitligt 50 % (Olanders & Steenari, 1995; Saletnik et al., 2018; Skøtt, 2011). Det antages, at kulstoffet i halmasken har samme stabilitet i jorden som den i biochar produceret ved pyrolyse, da forbrændning sker ved lignende eller højere temperatur (pyrolyse ved 650°C (Ravenni et al., 2020); forbrænding af halm i kraftvarmeværk ved 800-900°C (Skøtt, 2011)).

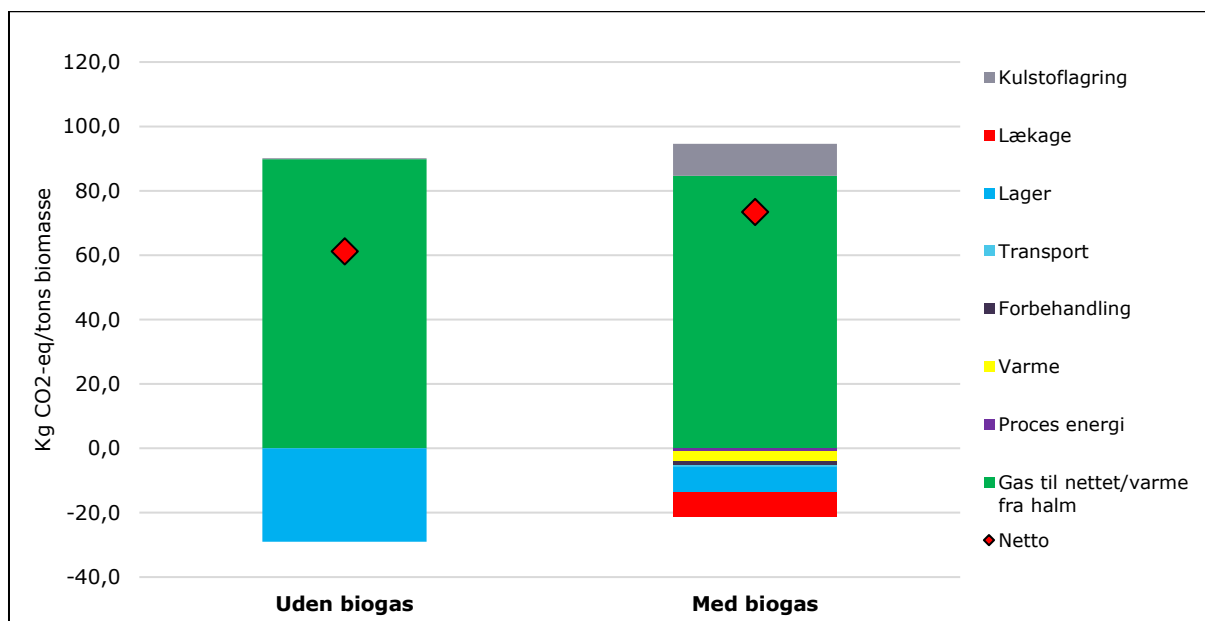
Den potentielle kulstoflagring for briketteret, bioforgasset halm (med biogas) estimeres ud fra samme beregninger og forudsætninger som for den bioforgasset halmensilage (scenarie 1, med biogas). Dog afviger tørstofindholdet i halmen mellem de to scenarier, hvilket resulterer i en anden kulstoflagring pr. ton friskvægt halm i dette scenarie.

Klima- og miljøeffekter – resultater for scenarie 2

Både scenariet uden og med biogas scenariet har totalt en positiv CO₂-effekt, dog er den en anelse højere for biogas-scenariet (tabel 6.6 og figur 6.4). Den dominerende parameter i begge scenarier er energiproduktionen, hvor biogasanlægget producerer gas til naturgasnettet, og halmforbrænding giver fjernvarme. Halmforbrænding har en lidt højere produktion af energi. I sammenligningen er "kvaliteten" af energi imidlertid ikke værdisat, hvor fjernvarme har en langt mindre "energi-kvalitet" end gas, der kan lagres i naturgasnettet og bruges til at dække huller i en fremtid med fluktuerende el-produktion fra vind. I scenariet uden biogas er der en langt højere metanemission fra lager end i biogas-scenariet som følge af effekten af afgasning af gyllen. Derudover er kulstoflagringen også lavere. I biogas-scenariet er der en negativ effekt som følge af energiforbrug til forbehandling af halmbriketterne og lækage, medens lagertabet er lavere end uden biogas.

Tabel 6.6. Oversigt over netto klimaeffekt og de enkelte parametres/processers bidrag til årlig effekt, opgjort i CO₂-ækvivalenter pr. ton friskvægt biomasse (her 15 % halm og 85 % gylle) i scenarie 2 uden og med biogas. Positive værdier indikerer en reduktion af klimabelastning, mens negative værdier øger disse. 'Kulstof – tilført og lagret med 20-årig horisont' angiver hvor meget kulstof er lagret efter 20 år opgjort pr. ton halm, pr. ton biomasse, og pr. ton tørstof (i biomasse).

	Uden biogas	Med biogas	Nettoeffekt
	(kg CO ₂ -eq /ton bio-masse)	(kg CO ₂ -eq /ton bio-masse)	(kg CO ₂ -eq /ton bio-masse)
Gas til nettet/el og varme fra halm	89,8	84,7	-5,1
Proces energi	0,0	-1,0	-1,0
Varme	0,0	-3,1	-3,1
Forbehandling	0,0	-1,3	-1,3
Transport	0,0	-0,4	-0,4
Lager	-29,0	-7,9	21,0
Lækage	0,0	-7,5	-7,5
Kulstofslagring	0,4	9,9	9,5
Netto	61,2	73,4	12,2
Kulstof lagret med 20-årig horisont			
Kulstoflagring i jord (kg CO₂-eq/ton halm)	2,9	76,0	
Kulstoflagring i jord (kg CO₂-eq/ton biomasse)	0,4	9,9	
Kulstoflagring i jord (kg CO₂-eq/ton TS)	0,4	11,8	



Figur 6.4. Samlet netto klimaeffekt og de enkelte parametres/processers bidrag til årlig effekt, opgjort i CO₂-ækvivalenter pr. ton friskvægt biomasse i scenarie 2 uden og med biogas.

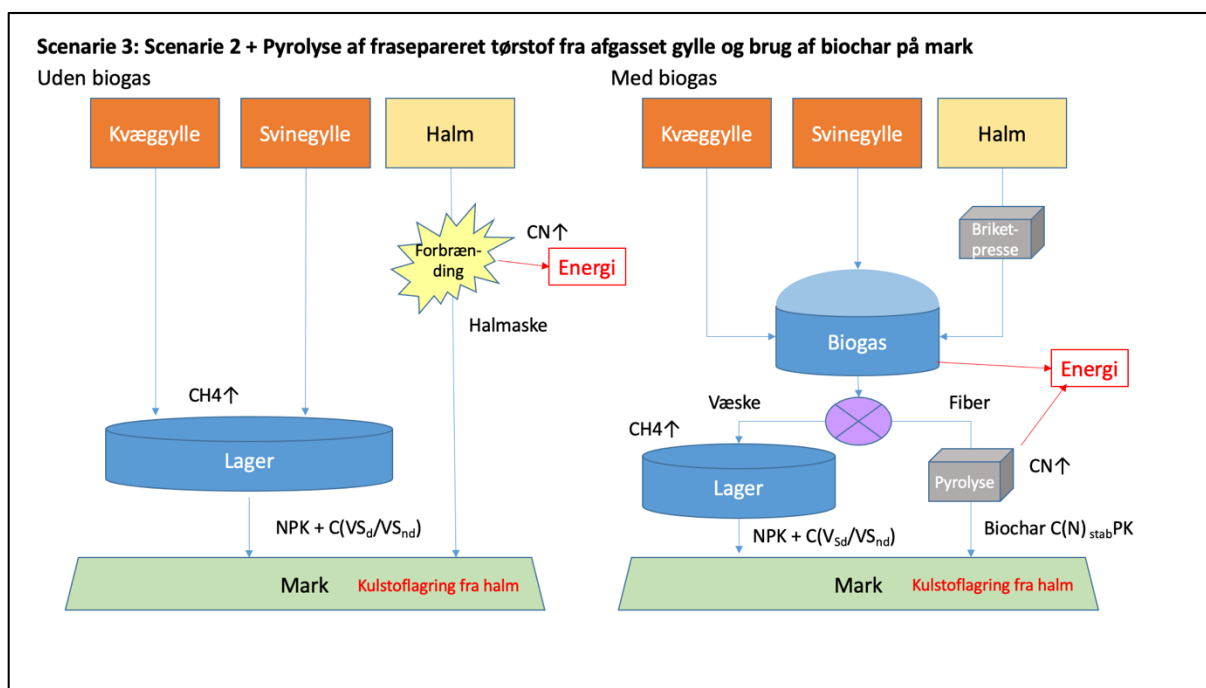
6.4. Scenarie 3: Pyrolyse af frasepareret tørstof fra afgasset gylle og brug af biochar på mark

Beskrivelse af scenarie 3

Det beregnes, hvor stor CO₂-effekt det vil have at separere væske- og fiberfraktionen af briketteret, bioforgasset halm, pyrolysere fiberfraktionen til biochar og udbringe biochar og væskefraktionen, i forhold til en situation uden biogas, hvor halmen forbrændes på kraftvarmeanlæg (som i scenarie 2), og gyllen anvendes ubehandlet. Det forudsættes, at halmen til biogasanlægget forbehandles ved brikettering. Parametrene estimeres i et biogasscenarie og i et scenarie uden biogas for at kunne fastsætte effekten af biogas, præcis som i scenarie 2 (figur 6.5).

Forbehandling og pyrolyse af halm til scenarie med biogas

I stedet for at udbringe den afgassede gylle direkte på mark, separeres gyllen først mekanisk i en fast og en flydende fraktion. Den faste fraktion tørres og anvendes i et pyrolyse-anlæg, hvor en del af tørstoffet konverteres til pyrolysegas, og resten kommer ud af anlægget som biokoks/biochar. Denne løsning kan bidrage til at løse et fosfor-overskudsproblem på biogassfælesanlæggene, hvor separation med rette teknologi kan frembringe en væskefraktion, som ikke giver udfordringer med fosforloftet hos aftagerne af den afgassede gylle.



Figur 6.5. Principskitse af scenarie 3.

Biocharen udgør vægtmæssigt en lille andel i det digesterede og kan derfor let transporteres længere væk til arealer uden fosforoverskud, og kulstoffet i biochar er relativt stabilt og kan derfor bruges som middel til at lagre kulstof i landbrugsjord. Metantabet fra lagring af væskefraktionen er muligvis lavere end metantabet fra lagring af den ikke-separerede gylle, men i beregningerne antager vi samme metan emission pr. kg VS.

Den potentielle kulstoflagring fra halmforbrændings-scenariet (uden biogas) er den samme som i scenarie 2.

Den potentielle kulstoflagring fra briketteret, bioforgasset og pyrolyseret halm (med biogas) og væskefraktion af separeret briketteret, bioforgasset halm estimeres med følgende forudsætninger:

Separationen af tørstof i digestatet antages at have en effektivitet på 60 %, dvs. 60 % af VS ender i fiberfraktionen, 40 % i væskefraktionen. Det antages, at pyrolysen af fiberfraktionen foretages med et anlæg som det, der er kommercielt tilgængeligt fra AquaGreen, svarende til den proces der er beskrevet i Ravenni *et al.* (2020). Det antages, at der produceres 30 % (af TS) biochar ved pyrolyse af den afgassede fiber fraktion, og at kulstofindholdet på den afgassede biochar er 60 % af TS (Monlau *et al.*, 2016).

Dertil kommer kulstoflagring med væskefraktionen, som vi antager lagres med 15 % over 20 år, som tidligere beskrevet for scenarie 1 og 2.

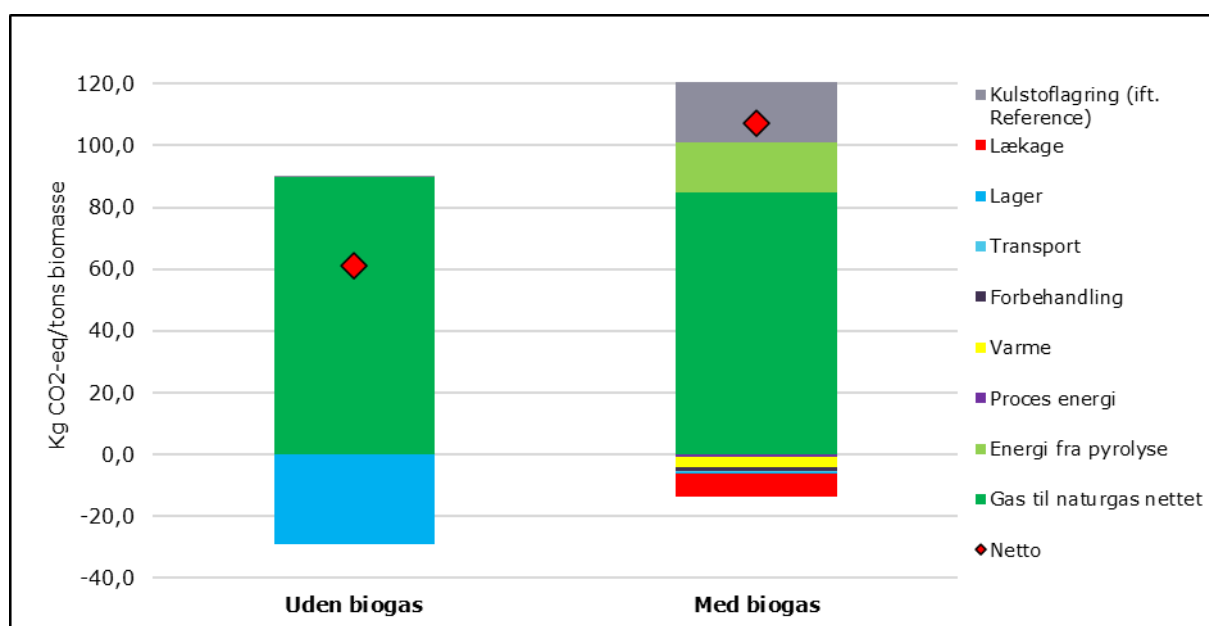
Klima- og miljøeffekter – resultater for scenarie 3

I dette scenarie har biogas den største klimagevinst, dog har scenariet uden biogas også en positiv klimagevinst (tabel 6.7 og figur 6.6). Produktionen af naturgas til nettet er energimæssigt sammenligneligt med varme fra forbrænding af halm.

Tabel 6.7. Oversigt over netto klimaeffekt og de enkelte parametres/processers bidrag til årlig effekt, opgjort i CO₂-ækvivalenter per ton friskvægt biomasse (her 15 % halm og 85 % gylle) i scenarie 3 uden og med biogas. Positive værdier indikerer en reduktion af klimabelastning, mens negative værdier øger disse. ' Kulstof – tilført og lagret med 20-årig horisont' angiver hvor meget kulstof er lagret efter 20 år opgjort pr. ton halm, pr. ton biomasse, og pr. ton tørstof (i biomasse).

	Uden bio- gas (kg CO ₂ -eq /ton bio- masse)	Med biogas (kg CO ₂ -eq /ton bio- masse)	Nettoeffekt (kg CO ₂ -eq /ton bio- masse)
Gas til nettet/varme fra halm	89,8	84,7	-5,1
Energi fra pyrolyse	0,0	16,2	16,2
Proces energi	0,0	-1,0	-1,0
Varmer	0,0	-3,1	-3,1
Forbehandling	0,0	-1,3	-1,3
Transport	0,0	-0,4	-0,4
Lager	-29,0	-0,3	28,7
Lækage	0,0	-7,5	-7,5
Kulstofslagring	0,4	19,7	19,3
Netto	61,2	107,1	45,9
<i>Kulstof lagret med 20-årig horisont</i>			
Kulstoflagring i jord (kg CO ₂ -eq/ton halm)	2,9	151,6	
Kulstoflagring i jord (kg CO ₂ -eq/ton bio- masse)	0,4	19,7	
Kulstoflagring i jord (kg CO ₂ -eq/ton TS)	0,4	23,5	

I sammenligningen er "kvaliteten" af energi imidlertid ikke værdisat, hvor fjernvarme har en langt mindre "energi-kvalitet" end gas, der kan lagres i naturgasnettet og bruges til at dække huller i en fremtid med fluktuerende el-produktion fra vind. Dog bidrager emissioner fra lageret særdeles negativt uden biogas, medens dette stort set elimineres i biogas-scenariet, hvor digestatet separeres. Energien fra pyrolyse bidrager derudover positivt til scenariet, og der bliver en positiv effekt på kulstoflagring som følge af anvendelsen af biochar.



Figur 6.6. Samlet netto klimaeffekt og de enkelte parametre/processers bidrag til årlig effekt, opgjort i CO_2 -ækvivalenter pr. ton friskvægt biomasse i scenarie 3 uden og med biogas.

6.5. Konklusioner vedr. scenarieberegninger

Der er udvalgt tre scenarier for anvendelse af halm til biogas. Kvantificering af biogasproduktionens klimaeffekter ved anvendelse af halm udgør et vigtigt grundlag for at kunne designe forskellige udviklingsveje.

Det fremgår af tabel 6.8, at der er en samlet positivklimaeffekt ved biogas på 12,2-76,9 $\text{kg CO}_2\text{-eq}$ pr. ton halmbiomasse i de 3 scenarier. Anvendelsen af halm i scenarierne uden biogas spiller en afgørende rolle for resultatet. Scenarie 2 og 3 har en væsentligt mindre effekt end scenarie 1, hvilket primært skyldes, at der produceres mere energi i scenariet uden biogas som følge af anvendelse af halm til forbrænding og produktion af el og fjernvarme ift. nedmulding af halm på mark. Dog er der i denne beregning ikke taget hensyn til, at energikvaliteten i fjernvarme er langt dårligere end opgraderet gas til naturgasnettet. Samtidigt er der en positiv effekt af kulstoflagringen til jord ved biogas i scenarie 2 og 3, der gør at biogas stadig falder positivt ud. Særligt når der anvendes separation af digestatet og pyrolyse af den faste fraktion (scenarie 3), er der en særdeles

positiv effekt af kulstoflagring. Ligeledes medfører separation og pyrolyse, at tabet af metan ved lagring reduceres til et minimum, og dette bidrager til en positiv effekt.

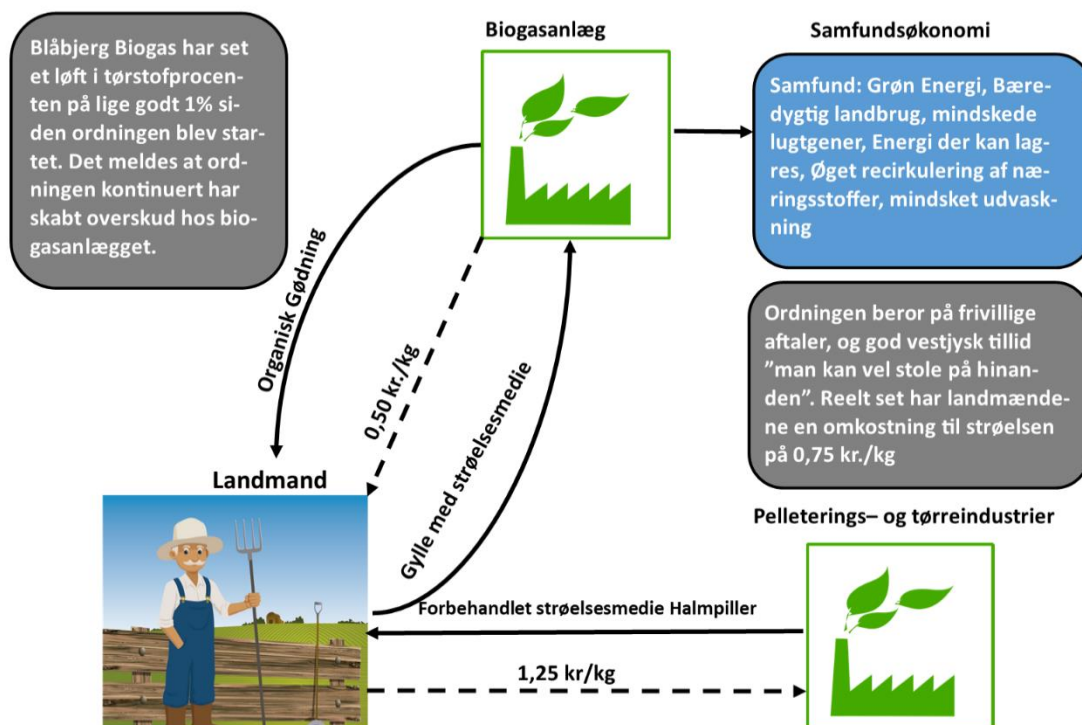
Tabel 6.8. Oversigt over netto-klimaeffekt og de enkelte parametres/processers bidrag til årlig effekt, opgjort i CO₂-ækvivalenter pr. ton friskvægt biomasse, (halm og gylle) for forskellen mellem uden- og med-biogas scenariet for alle tre scenarier. Positive værdier indikerer, at anvendelsen af halm til biogas har en gavnlig effekt og dermed reducerer klimabelastning, mens negative værdier øger dette.

	Scenarie 1	Scenarie 2	Scenarie 3
	(kg CO ₂ -eq /ton bio- masse)	(kg CO ₂ -eq /ton bio- masse)	(kg CO ₂ -eq /ton bio- masse)
Gas til nettet/halm varme	77.9	-5.1	-5.1
Energi fra pyrolyse	0.0	0.0	16.2
Proces energi	-1.0	-1.0	-1.0
Varme	-3.1	-3.1	-3.1
Forbehandling/Ensilering	-3.4	-1.3	-1.3
Transport	-1.2	-0.4	-0.4
Lager	17.3	21.0	28.7
Lækage	-6.9	-7.5	-7.5
Kulstoflagring	-2.9	9.5	19.3
Netto	76.9	12.2	45.9

7. Pelleteret halm som strøelse i leverandørstalde og derefter til biogas

Dette kapitel beskriver en proces som kan indarbejdes i både scenarie 2 og 3, hvor det resulterer i en alternativ måde at få tilført pelleteret halm til biogasanlæggene. Der er dog ikke lavet beregninger på CO₂-effekt på samme vis som i kapitel 6, da resultatet vil være nogenlunde det samme som scenarie 2 og 3. Kapitlet her præsenterer i stedet de kvalitative gevinster ved modellen.

I dette scenarie er der blevet arbejdet med en model, hvor halm finder vej til biogasanlæggene, efter det først er blevet anvendt i danske malkekvægstalde som strøelsesmedie enten i sengebåse eller som dybstrøelse. Denne model bevirker, at der er to led i værdikæden, der sammen kan løfte og dele omkostningen for forbehandlingen, som i dette tilfælde består af en hammermølle-neddeling samt en løsere pelletering – se figur 7.3. Omkostningen til forbehandlingen afspejles i prisen på det pelleterede strøelsesprodukt. Til undersøgelsen af denne model er der til denne rapport taget udgangspunkt i Blåbjerg Biogas i Vestjylland, der har startet en samarbejdsmodel med deres biomasse- og gylleleverandører. Samarbejdsmodellen er opbygget således, at Blåbjerg Biogas bidrager med et tilskud for hvert kilo af det pelleterede strøelsesprodukt, dvs. halmpillerne deres leverandører anvender, imod at få det bragt til biogasanlægget opblandet med en mere tørstofrig gylle. Modellen er illustreret på figur 7.1.



Figur 7.1. Illustration af samarbejdsmodel mellem biogasanlæg og leverandører omkring brugen af halmpiller fra pelleteringsindustrier (bl.a. de tidligere grønttørringsindustrier).

Modellens simplicitet gør den nem at administrere for alle parter. Leverandører fremsender faktura på indkøb af pelleteret strøelsesmedie til Blåbjerg Biogas, der efterfølgende udbetaler 0,50 kr./kg. Dette bringer udgiften for strøelsesmediet ned på 0,75 kr./kg, der er nogenlunde samme prisniveau som råhalm indkøbt og leveret til landbruget. Godt 1/3 af Blåbjerg Biogasanlægs leverandører er med i ordningen.

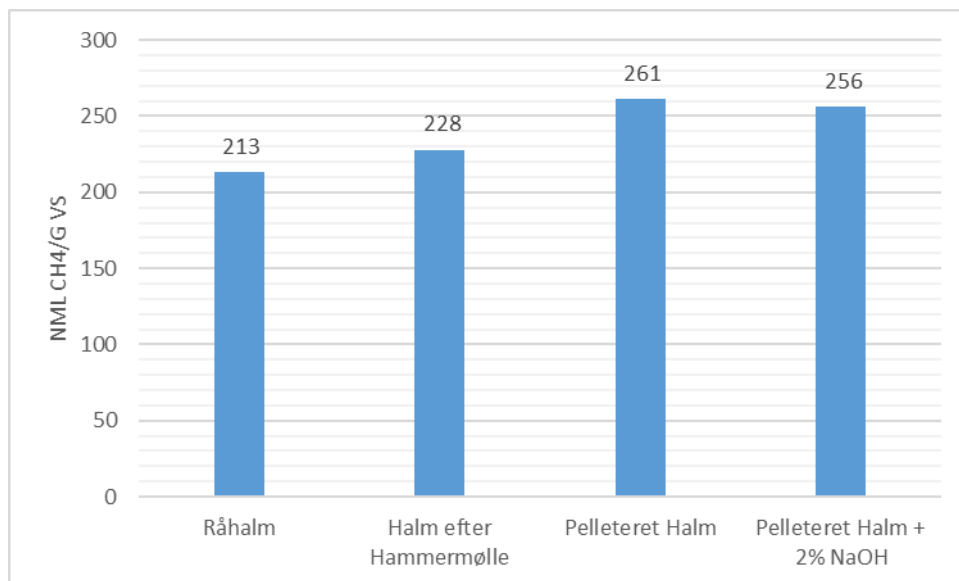
Ordningen startede som en 2-årig forsøgsordning, der senere er blevet et permanent tilbud fra Blåbjerg Biogas til deres leverandører. Modellen er inspirationskilden til dette kapitel, der på baggrund af interviews med Blåbjerg Biogas samt en række af deres leverandører har indsamlet kvalitative data omkring ordningen og dens effekter.

Datagrundlaget anvendt i dette kapitel beror på kvalitativ dataindsamling gennem sommeren 2020 under samtaler og interviews. Der er foretaget et indledende interview med Blåbjerg Biogas, der efterfølgende har adviseret dem af deres leverandører, der er deltagende i samarbejdsordningen om, at de ville blive kontaktet. Efterfølgende er der taget kontakt til leverandørerne, hvoraf 4 kunne afse tid til en samtale om modellen og anvendelse af pelleteret halm som strøelse i deres besætninger. Da tiden for interviewene faldt sammen med generel travlhed med grovfoderhøst, var der flere leverandører, der ikke havde tiden til at deltage. Spørgsmål, der har ligget til grund for interviews, kan ses i bilag bagerst i rapporten.

Klima- og miljøeffekter – resultater

Da dette kapitel beror på kvalitative data, er grundlaget for at estimere valide klima- og miljøeffekter begrænset. På baggrund af interviewarbejdet kommer der i det følgende et sammendrag af de indsamlede data.

Der er foretaget en række laboratorieforsøg med det formål at belyse biogaspotentialitet i pelleteret halm sat i forhold til råhalm. Disse forsøg viser, at pelletering har en positiv effekt på metanpotentialitet af halm i biogassammenhænge på mellem 15-25 NmL CH₄/g VS (Savari Horváth et al., 2015; Møller & Hansen, 2014). I figur 7.2 er vist resultater fra nyligt udførte laboratorieforsøg, udført af Institut for Energiteknologi ved AAU Esbjerg, der viser samme tendens som litteraturen på området og erfaringer fra branchen.



Figur 7.2. Metanpotentiale for forskellige halmtyper.

I ovenstående forsøg udført med materiale udtaget fra halmpilleproduktionen ved Sønderjysk Tørreindustri A/S i Løgumkloster, resulterer pelletering i et metanpotentiale, der er 18,6% højere end resultatet for råhalm. Det kan ligeledes udledes, at mekanisk neddeling har en mindre positiv effekt, og at anvendelsen af halmpiller frem for snittet halm fra et biogasperspektiv vil være at fortrække (Lind, Al Seadi og Holm-Nielsen, 1999). Det beviste højere gasudbytte ved pelleteret halm kan sammen med nedenstående kvalitative viden danne afsæt for en argumentation for en øget anvendelse af halmpiller inden for animalsk produktion.

Halmpiller som strøelse i sengebåse generelt

Halmpiller er et alternativ til eksempelvis savsmuld og snittet halm til brug i sengebåse med faste madrasser i malkekvægsbesætninger. I modsætning til sand, der anvendes som fyld i hele sengebåsen i lag på min. 25cm, så strøs de løse halmpiller på toppen af latex, gummi eller andet slidstærkt "blødt" materiale.



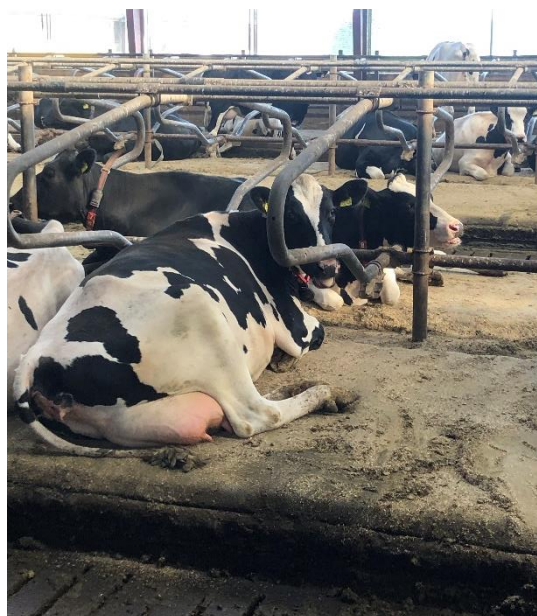
Figur 7.3. Pelleteret hvedehalm.



Figur 7.4. Pelleteret halm anvendt som strøelse i sengebåse med madrasser.



Figur 7.5. Pelleteret Halm anvendt som strøelse i sengebåse.



Figur 7.6. Sengebås strøet med halmpiller.

Det har været klart igennem alle udførte interviews, at landmændene generelt set er meget tilfredse med halmpillers egenskaber som strøelsesmedie. Forbruget af halmpiller hos de adspurgte landbrug ligger imellem 0,5 kg/ko/dag og 1,2 kg/ko/dag i sengebåse. Følgende væsentlige effekter blev fremhævet:

- Høj evne til at renholde køerne.
 - Halmpiller har et højt absorptionsniveau, der ligger omkring 500% i forhold til egenvægten af produktet. Der er en generel stor tilfredshed med halmpillers evne til at sikre rene køer. Både hvad angår køernes ben og bagpartier, men også på yveret. Et rent yver er vigtig i forhold til at mindske risiko for kontaminering af mælk under malkning.
- Ingen brug af kemi.
 - Der er generelt oplevet et fald i nødvendigheden af at anvende kemi i sengebåse hos malkekvæg hos landmænd, der er skiftet fra savsmuld og snittet halm til halmpiller. For at holde sengebåsene tørre ved brug af savsmuld og snittet halm, var der behov for at anvende bl.a. hydratkalk. Dette behov findes ikke ved anvendelse af halmpiller.
- Nem håndtering.
 - Håndtering af halmpiller i produktionen meldes at være meget nem og forbundet med mindre arbejde end savsmuld, snittet halm og i særdeleshed sand.
 - Det blev nævnt at omlægning af produktioner med standard sandbåse ikke er forbundet med større problematik end, at sandbåsene tømmes og fyldes op med halmpiller. Det blev i den forbindelse foreslået, at man eventuelt kunne udlægge 10 cm sand i bunden som billigt fyld nederst og derfra fylde op med halmpiller for at holde omkostningerne for landbruget nede.
- Bedre udnyttelse af strøelsen.
 - Idet halmpiller vejer mere end især snittet halm, bliver de i højere grad liggende i sengebåsene. Derved opnås der en højere udnyttelsesgrad af strøelsen.
- Mindre støv.
 - I forhold til savsmuld og snittet halm er anvendelse og håndtering af halmpiller forbundet med meget mindre støv og derfor mindre støvgener.
 - Endvidere nævntes det, at støvet der nu en gang findes, og som man ikke undgår, er af en "anden karakter" end støvet fra savsmuld og snittet halm. Generne ved halmpillestøv nævnes at være meget mindre end snittet halm og især savsmuld.
 -

Halmpiller anvendt som dybstrøelse

En interessant anvendelse, som et af landbrugene praktiserede, var halmpiller som dybstrøelse. Dette bevirkede naturligt, at forbruget pr. ko forøgedes markant og i denne besætning lå forbruget på cirka 5 kg/ko/dag. Følgende væsentlige effekter blev fremhævet:

- Meget rene dybstrøelsesstalde.
 - Halmpillerne bevirkede nogle meget rene dybstrøelsesstalde, der endvidere var meget nemme at holde rene og pæne.
 - Køerne befinder sig godt i halmpillerne.
 - Som ovenfor var mængden af støv kraftig reduceret og bevirker et mere behageligt staldmiljø.

En af de besøgte landmænd benyttede halmpiller som dybstrøelse i staldafsnittet for kælvende køer. Her var der førhen benyttet almindelig råhalm som strøelse, og der blev muget ud 3-4 gange årligt. Den nuværende dybstrøelsesmåtte bestående af halmpiller er 2 år gammel, og der er ikke blevet muget ud. Halmpillerne gør renholdelse nemt, og holder afsnittet rent og godt for de kælvende køer og deres nyfødte kalve.

Det blev derudover bemærket, at lugten af ammoniak var væsentligt mindre, og temperaturen i dybstrøelsesmåtten markant lavere. Denne observation er meget interessant, da halmpiller muligvis har en positiv effekt på opslugning af ammoniak i halmpille strøelsen med det høje C/N forhold og store sugeevne.

7.1. Konklusioner vedr. pelleteret halm som strøelse i leverandørstalde og derefter til biogas

Halmpiller er en interessant måde, hvorpå mere forbeholdt halm kan finde vej til biogasanlæggene. Denne forbehandling kan medføre en værdiskabelse hos både landbruget og hos biogasanlæggene, idet der findes positive effekter ved anvendelse i stalderne, og forsøg i laboratorier med bestemmelse af biogaspotentialer i halmpiller viser et højere gasudbytte inden for opholdstiden af det gennemsnitlige biogasanlæg.

I denne forundersøgelse af halmpiller i dette scenarie er der ikke blevet kigget ind i kvantitative datagrundlag så som sygdomsdata på besætninger, arbejdsmiljødata eller lignende. Men et nyt interessant strøelsesmedie i forhold til sand, savsmuld og snittet halm er fundet og dokumenteret meget anvendeligt. Det må konkluderes, at det vil være oplagt at undersøge sammenhænge nærmere mellem strøelsesmedie, staldmiljø, arbejdsmiljø, økonomi, biogasudbytter og samfundsøkonomi.

Det må bemærkes, at samarbejdsmodellen beskrevet i dette kapitel, og som eksisterer i praksis, er et godt eksempel på den nære relation, der eksisterer imellem landbruget og biogassektoren. Den synergi, der kan skabes ved sektorernes indbyrdes samarbejde, der i sidste ende skaber værdi hos begge parter, bør undersøges nærmere og bruges som inspirationskilde for sektoren generelt.

8. Referencer

- Christensen, B. T., & Schjønning, P. (1987). Nedmuldning af halm. *Tidsskrift for Planteavl Specialserie*, S1911.
- Hansen, M. T. (2004). Separation og genanvendelse af aske fra biobrændselsanlæg. *Miljøministeriet*, 962.
- Lind, J., T. Al Seadi og J.B. Holm-Nielsen. (1999) Halmtilsætning til biogasanlæg. Energistyrelses projekt, Juni 1999. Bioenergigruppen, SDU.
- Mikkelsen MH, Albrechtsen R, Gyldenkerne S, 2016. Biogasproduktions konsekvenser for drivhusgasudledning i landbruget. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 41 s. - Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 197.
- Monlau, F., Francavilla, M., Sambusiti, C., Antoniou, N., Solhy, A., Libutti, A., Zabaniotou, A., Barakat, A., & Monteleone, M. (2016). Toward a functional integration of anaerobic digestion and pyrolysis for a sustainable resource management. Comparison between solid-digestate and its derived pyrochar as soil amendment. *Applied Energy*, 169, 652–662. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.084>
- Møller HB, Nielsen KJ, 2016. Biogas Taskforce – udvikling og effektivisering af biogasproduktionen i Danmark. Aarhus Universitet, DCA rapport Nr. 077.
- Møller HB, Nielsen A, Murto M, Christensson K, 2008. Manure and energy crops for biogasproduction Nordic council of Ministers TemaNord, ISSN 0908-6692; 2008:544.
- Nielsen BS, 2019. Frivilligt måleprogram for metantab. GASenergi, nr. 3
- Olanders, B., & Steenari, B. M. (1995). Characterization of ashes from wood and straw. *Biomass and Bioenergy*, 8(2), 105–115. [https://doi.org/10.1016/0961-9534\(95\)00004-Q](https://doi.org/10.1016/0961-9534(95)00004-Q)
- Olesen, J. E., Petersen, S. O., Sørensen, P., Nyord, T., & Sommer, S. G. 2020. Bæredygtig biogas - klima- og miljøeffekter af biogasproduktion. DCA - Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug. DCA rapport, Nr. 175.
- Ravenni, G., Cafaggi, G., Sárossy, Z., Rohde Nielsen, K. T., Ahrenfeldt, J., & Henriksen, U. B. (2020). Waste chars from wood gasification and wastewater sludge pyrolysis compared to commercial activated carbon for the removal of cationic and anionic dyes from aqueous solution. *Bioresource Technology Reports*, 10(March), 100421. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100421>
- Saletnik, B., Zagula, G., Bajcar, M., Czernicka, M., & Puchalski, C. (2018). Biochar and biomass ash as a soil ameliorant: The effect on selected soil properties and yield of giant miscanthus (*Miscanthus x giganteus*). *Energies*, 11(10). <https://doi.org/10.3390/en11102535>
- Sárvári Horváth, I., Del, M., Castillo, P. and Schnürer, A. (2015). Utilization of straw pellets and briquettes as co-substrates at biogas plants. EUBCE conference paper 2015.
- Skøtt, T. (2011). *Halm til energi - Status, teknologier og innovation i Danmark 2011*.
- Spokas, K. A. (2010). Review of the stability of biochar in soils: Predictability of O:C molar ratios. *Carbon Management*, 1(2), 289–303. <https://doi.org/10.4155/cmt.10.32>

- Thomsen, I. K., Olesen, J. E., Møller, H. B., Sørensen, P., & Christensen, B. T. (2013). Carbon dynamics and retention in soil after anaerobic digestion of dairy cattle feed and faeces. *Soil Biology and Biochemistry*, 58, 82–87. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.11.006>
- Yoshida, H., ten Hoeve, M., Christensen, T. H., Bruun, S., Jensen, L. S., & Scheutz, C. (2018). Life cycle assessment of sewage sludge management options including long-term impacts after land application. *Journal of Cleaner Production*, 174, 538–547. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.175>

9. Bilag

9.1. Spørgeskema anvendt ved besøg på biogasanlæg

Spørgsmål anvendt som udgangspunkt for interviews ved besøg på biogasanlæg-gene

Generelle spørgsmål vedr. anvendelse af halm på biogasanlægget

Generelt vedr. anlægget:

- Biogasanlæggets alder, 'fabrikat', opbygning (antal reaktorer, serieforbundet), indføringsanlæg til fast biomasse m.m.?
- Biogasanlæggets størrelse (reaktorvolumen)?
- Temperatur i reaktoren?
- Gennemsnitlig opholdstid (reaktor hhv. efterlager)?
- Hvilken tørstofprocent køres der med i reaktoren?
- Typisk biomassesammensætning (procentandele af hovedtyper, husdyrgødnings-typer, energiafgrøder, diverse andre biomasser)?

Generelt vedr. brug af halm på anlægget:

- Hvor længe er der brugt halm?
- Hvilken type halm anvendes (hvede, byg osv.)?
- Hvor stor andel af halm anvendes (gnsn., evt. maks.)?
- Hvordan forbehandles halmen før indfødering (neddelingsmetode/-teknologi, partikelstørrelse m.m. – gerne fotos inkl. tommestok)?
- Hvordan indføres halmen?
- Erfaringer med anvendelse af halm?
 - Flydelagsdannelse?
 - Omrøringsproblemer/elforbrug til omrøring?
 - Energiproduktion (selvom det er svært at kvantificere effekten af halmen)?
- Plan for fremtidig anvendelse af halm?
- Anbefalinger til andre biogasanlæg vedr. brug af halm?
- Behov for undersøgelser vedr. halm til biogas?
-

Specifikke spørgsmål i relation til udtaget prøve af afgasset gylle fra biogasanlægget

Vedr. brug af halm og anlæggets drift i perioden op til udtagning af prøve af afgasset biomasse:

- Udtagningstidspunkt?
- Udtagningssted på anlægget?
- Gennemsnitlig opholdstid i reaktoren i perioden op til prøvetagning?
- Hvor stor andel af halm er anvendt?
- Hvilken type halm er anvendt (hvede, byg osv.)?
- Hvordan er halmen forbehandlet før indfødering (neddelingsmetode/-teknologi, partikelstørrelse m.m.)?
- Sammensætning af øvrige anvendte biomasser (procentandel på friskvægtbasis)?

9.2. Beskrivelser og fotos fra besøg på biogasanlæg

Brdr. Thorsen Biogas I/S

Anlæg: Brdr. Thorsen Biogas I/S, Østenfjeldvej 9, 8581 Nimtofte

Dato for besøg: Tirsdag 2/6 2020

Interview med: Steffen Thorsen, tlf. 40 80 90 50

Anlægget besøgt af: Søren Ugilt Larsen, Teknologisk Institut og Henrik Møller, Aarhus Universitet

Biogasanlæggets opbygning

Biogasanlægget er bygget i år 2000, ombygget i 2005 og er netop ombygget igen i 2020. Anlægget producerer strøm på to motorer (730 kW) og leverer varme til lokalt varmeværk. Anlægget er opbygget af to opvarmede reaktorer (5.500 og 5.000 m³ volumen), der begge er opvarmet til 46°C, samt et uopvarmet efterlager med gasopsamling (5.000 m³ volumen). De to opvarmede reaktorer kører delvis parallelt og delvis i serie; der indpumpes rågylle og fast biomasse i begge reaktorer, men efter ca. 100 dages opholdstid pumpes biomassen fra reaktor 1 til reaktor 2, og efter ca. 50 dages opholdstid pumpes biomassen fra reaktor 2 til efterlageret. En del af biomasse vil så have en gennemsnitlig opholdstid på ca. 150 dage, og en del vil have en opholdstid på ca. 50 dage.



Thorsen Biogas. Forrest ses reaktor 1 og derefter reaktor 2, efterlager uden opvarmning og endelig en udleveringstank uden overdækning.

Fast biomasse indføres via et BvL-premix-system, der står på vejeceller, samt en Vogel-sang mixer med rotorcutter, der blander den faste biomasse i recirkuleret biomasse fra

reaktor 1. Indføddningen styres efter et maks. tryk på 1 bar, dvs. indføddningen styres ikke efter et bestemt tørstofindhold men efter, at biomassen ikke bliver for tyk at pumpe og omrøre. Der er hhv. 7, 5 og 5 omrørere i reaktor 1, reaktor 2 og efterlageret. I reaktor 1 og 2 kører én af omrørerne i bunden hele tiden, mens de øvrige rører en halv time hver 3. time, og alle omrørere kører en time hver 8. time.



Øverst BvL premixer og nederst Vogelsang-mixer til indføddning af fast biomasse.

Anvendte biomassetyper

Der indføres typisk ca. 100 tons biomasse pr. dag, f.eks. i størrelsesordenen 80 tons gylle og 20 tons fast biomasse. Gyllen består af ca. 70% kvæggylle og ca. 30% svinegylle. Derudover anvendes forskellige supplerende biomasser, og sammensætningen af disse biomasser bestemmes løbende, bl.a. afhængig af pris og tilgængelighed. Hovedfokus er først og fremmest på billige biomasser, som fungerer i biogasanlægget. Typerne af supplerende biomasse omfatter bl.a. ensileret halm, dybstrøelse fra f.eks. tyre eller heste, slætgræs af lav kvalitet, olivenrester, sojamelasse, glycerin m.m. Der laves tørstofbestemmelse af nye biomasser. Der er betydelig synergi mellem biogasanlægget og Brdr. Thorsens maskinstationsdrift, da der via maskinstationen er et stort netværk blandt landmænd på Djursland, som giver mulighed for at skaffe biomasser, der er uegnede til andre formål. Forventningen er, at man fremover især vil bruge dybstrøelse, ensileret halm samt enten sojamelasse eller glycerin.

Erfaringer med anvendelse af halm

Brdr. Thorsens Maskinstation presser omkring 100.000 bigballer med halm om året, og der er altid en vis andel af halmen, som er mere eller mindre fugtig og dermed ikke af prima kvalitet. En del af den dårlige halm ville medføre en omkostning til udspredning på marken, og hvis den i stedet kan anvendes til biogasproduktion, kan omkostningen vendes til en indtægt. For at anvende halmen i biogasanlægget er det vigtigt, at halm kan optage vand, og det erfaringen, at halm optager vand væsentligt bedre efter ensilering. Man har derfor siden 2013 ensileret halm til brug i biogasanlægget. Der er tale om halm i meget blandet kvalitet fra rådden halm til fugtig eller halvtør halm.



Diverse sekunda-halmballer, der kan bruges til biogas fremfor at skulle udsprede på mark.

Ved ensileringsprocessen snittes halmen i en Haybuster eller I-Grinder. Ved fraførelsesbåndet på snitteren tilføres halmen vand med en sprinkler; der er ikke tale om en præcis dosering, men typisk ender det med et tørstofindhold på ca. 60% i halmen. Den snittede,

fugtige halm lægges i stak og køres lagvis sammen med en gummiged. Stakken overdækkes ikke. På nuværende tidspunkt tages der halmensilage fra en stak, der blev lavet for ca. 3 år siden. Generelt lugter ensilagen godt og syrligt som anden ensilage. Der er dog nogen variation i kvaliteten i stakken, hvilket bl.a. ses ved den meget varierende farve.



En ca. 3 år gammel stak med ensileret halm til biogasproduktion. Stakken har ikke været overdækket. Inde i stakken lugter halmensilagen god og syrlig som ensilage.

Som nævnt varierer det, hvor meget halm der indføres, men typisk indføres der i størrelsesordenen 7½ tons tons halmensilage pr. døgn og ca. 4 tons dybstrøelse pr. døgn ud af

de i alt ca. 100 tons råvarer pr. døgn. Det er vanskeligt at kvantificere energiproduktionen fra halmen, men umiddelbart er fornemmelsen, at der er væsentligt mere gas i ensileret halm end i dybstrøelse, måske omkring dobbelt så meget pr. ton. Der er ingen flydelag i reaktorerne på nuværende tidspunkt, men der røres som nævnt også meget. I perioder med mindre omrøring kan der være lidt flydelag, men ikke mere end at det kan røres op igen.



Overfladen i reaktor 1, hvor fast biomasse indføres, og hvor den gennemsnitlige opholdstid er ca. 100 dage. Der er ingen flydelag.

Der anvendes også dybstrøelse fra tyre, hvor der er strøet med halmpiller. Dybstrøelsen har en god, fin struktur men synes ikke at give større gasproduktion end dybstrøelse med alm. halm.



Dybstrøelse fra tyre, hvor der er strøet med halmpiller.

Rybjerg Biogas

Anlæg: Rybjerg Biogas, Rybjergvej 55, 7870 Roslev

Dato for besøg: Tirsdag den 9/6 2020

Interview med: Jens Christensen, tlf. 23 20 26 75

Anlægget besøgt af: Søren Ugilt Larsen og Malene Jørgensen, Teknologisk Institut

Biogasanlæggets opbygning

Biogasanlægget er et gårdbiogasanlæg, der er bygget i 2016 i tilknytning til et ca. 20 år gammelt biogasanlæg. Der produceres ca. 550 Nm³ pr. time i det nye anlæg, og hovedparten af biogassen fra anlægget opgraderes og leveres til naturgasnettet, mens resten af biogassen anvendes til kraftvarme i motoren på det ældre 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.



Rybjerg Biogas. Indfødningsanlæg til fast biomasse samt de to parallelforbundne reaktorer i baggrunden.



Rybjerg Biogas. T.h. To af de tre efterlagertanke.

Gylle indføres direkte i toppen af de to reaktorer. Fast biomasse indføres via et Lobe/BIG-Mix premixer-anlæg, der opfyldes to gange i døgnet. Fra premixer-anlægget køres biomassen gennem en BHS-Sonthofen biogrinder/hammermølle med kraftige slagler og magnet til at opfange metal fra f.eks. dybstrøelse. Efter biogrinderen blandes den faste biomasse med flydende biomasse fra reaktorerne, og blandingen pumpes derefter ind i midten af reaktorerne.



BIG-Mix premixer-anlæg, der fyldes to gange om dagen.



BHS-Sonthofen biogrinder/hammermølle samt slagler før og efter slitage.



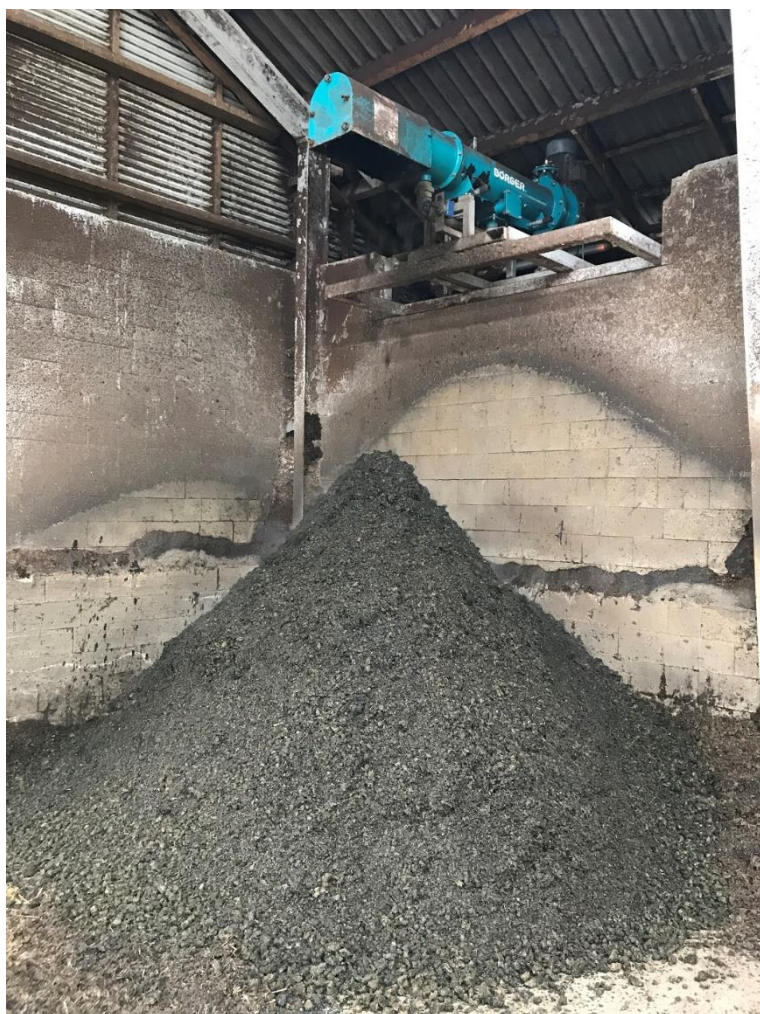
T.v. Lobe mixerenhed til opblanding af gylle fra reaktor 1 og 2 med fast biomasse fra biogrinder. T.h. Opstilling med biogrinder øverst og mixerenhed nederst.

Omrøring i reaktorerne sker med Landia gasmix-pumper med knive; fra bunden af reaktorerne udtages biomasse, som snittes i gasmix-pumperne, blandes med gas fra toppen af reaktorerne og blæses ind i bunden, midten og toppen af reaktorerne. Dette giver cirkulation i reaktorerne uden mekaniske omrørere inde i reaktorerne. Der anvendes også gasmix-pumper til omrøring i efterlager 1 og 2, mens der er alm. mekaniske omrørere i efterlager 3.



Gasmix-pumper med knive til injektion og omrøring i reaktorer.

Tørstofindholdet i reaktorerne er ca. 12%, mens tørstofindholdet i efterlager 3 er ca. 7%. Ca. 75% af den afgassede biomasse fra efterlager 3 separeres i en Börger skruepresse med en 0,1 mm si, og fiberfraktionen køres igennem biogasanlægget igen via indfødnings-systemet til fast biomasse. Tørstofindholdet i væskefraktionen er ca. 6%, dvs. det er kun de største partikler fra den afgassede biomasse, der recirkuleres.



*Börger skruepresse, der separerer ca. 75% af den afgassede gylle. Gyllefiberen køres igen-
nem biogasanlægget igen.*

Anvendte biomassetyper

Der anvendes biomasse fra 35-40 leverandører i lokalområdet samt fra egen svineproduktion. Udover kvæg- og svinegylle anvendes især dybstrøelse, ensileret frøgræshalm, majs og græs fra engarealer. I alt anvendes ca. 6-7% energiafgrøder. Desuden anvendes flydende bioprodukter såsom molasse, der indføres i efterlager 1 og 2, og dette vurderes at bidrage med ca. 20% af gasproduktionen.

Dybstrøelse kommer fra både små og store leverandører, primært kvægbedrifter. Frøgræshalm bjærges fra egne marker og andre frøavlere i området. I 2019 blev der bjærget frøgræshalm fra ca. 500 ha, og i 2020 ventes der bjærget fra ca. 300 ha. Frøgræshalmen opsamles med snittevogn lige efter høst af græsfrø, og den snittede frøgræshalm lægges ind i plansilo og tildækkes. Ved majshøst lægges den snittede majs ind ovenpå frøgræshalmen, som derved komprimeres yderligere og desuden kan opsamle evt. saftafløb fra majsensilagen.

Der indføres typisk 230 tons gylle og 130 tons fast biomasse pr. døgn. I perioden april til primo juni 2020 er der i gennemsnit anvendt ca. 115 tons fast biomasse pr. døgn, heraf 49 tons dybstrøelse, 37 tons majsensilage, 15 tons recirkuleret fiberfraktion samt 14 tons

andre biomasser såsom ensileret frøgræshalm, kyllingemøg, sheamel, roer og græsensilage m.m.

Generelt tilstræbes det at anvende omtrent lige store mængder ensilage af frøgræshalm og ensilage, men forholdet mellem dybstrøelse og frøgræshalm varierer lidt hen over året; der modtages ofte store mængder dybstrøelse om foråret, hvorfor andelen af dybstrøelse øges, mens der på andre tider af året anvendes en større andel af ensileret frøgræshalm. I den forgangne periode har andelen af frøgræshalm derfor været meget lav, mens der er brugt en ret stor andel dybstrøelse.



Stak med ensileret frøgræshalm nederst og majsensilage øverst.



Ensileret frøgræshalm.



Dybstrøelse med en stor andel af halm.

Erfaringer med anvendelse af frøgræshalm og dybstrøelse

På anlægget har man gode erfaringer med at anvende frøgræshalm og dybstrøelse. Der opleves ingen problemer med flydelag i reaktorerne eller efterlagrene. Der er naturligvis en del vedligehold på anlægget, bl.a. på gasmix-pumperne, og man tilstræber at vedligeholde fremfor at komme ud for driftsstop pga. havari, da det er væsentligt billigere at forebygge. Til gengæld er frøgræshalm og dybstrøelse relativt billige biomasser.

Især for dybstrøelse er det vigtigt at kunne frasortere metalgenstande via magneten i biogrinderen for at forhindre skader i pumper m.v., og der fanges betydelige mængder metal. Det fungerer godt med ensilering af frøgræshalm, der kan høstes selv i fugtigt vejr. Det er desuden praktisk at have frøgræshalm og majsensilage i én stak, så der kun skal tages ét sted. Det er desuden lettere at håndtere frøgræshalm i stak end f.eks. halm i halmballer, hvor man først skal have snorene af m.m.

Vrejlev Bioenergi

Anlæg: Vrejlev Bioenergi, Vrejlev Møllevej 11, 9760 Vraa

Dato for besøg: Mandag den 15/6 2020

Interview med: Henning Jensen, tlf. 40 94 08 50

Anlægget besøgt af: Søren Ugilt Larsen, Teknologisk Institut, Henrik Møller, Aarhus Universitet

Biogasanlæggets opbygning

Biogasanlægget er et gårdbiogasanlæg, der er et Lundsby-anlæg bygget i 2016, og som leverer opgraderet og certificeret grøn gas til naturgasnettet. Anlægget er opbygget af en reaktor på 4.900 m³ samt tre efterlagertanke på hhv. 4.900, 6.000 og 3.000 m³, og tankene er serieforbundet. Temperaturen i reaktoren og de to efterlagertanke er ca. 51°C, mens den tredje efterlagertank er uopvarmet; temperaturen kendes ikke men er formodentlig 40-45°C. Der er omrører i alle tanke, og i reaktoren er der nu indsat en ekstra omrører, så der nu er 6 omrørere à 15kW. Den samlede opholdstid i reaktor og de to efterlagertanke har tidligere være ca. 90 dage, men er nu reduceret til ca. 70 dage pga. tilladelse til større produktion. Tørstofindholdet i reaktoren er ca. 9%.



Biogasanlægget Vrejlev Bioenergi. Bagerst ses reaktoren og forrest ses efterlager 1.

Fast biomasse som dybstrøelse og halm-roe-ensilage indføres i reaktoren via et Terbrack påslag og knusning i en Bomatech hammermølle med 4 slagler og modskær, der kværner halmstrå m.m. Den knuste biomasse opblandes i rågylle og recirkuleret biomasse fra reaktoren i en mixertank med 3 omrørere og pumpes derefter ind i reaktoren. Biomasse fra

reaktoren pumpes videre til efterlager 1, hvor der vha. af en Flexfeeder indføres finsnittede biomasser som majsensilage, solsikkerester og DBG fra AST. Desuden tilføres glycerin til efterlager 1. Biomassen pumpes videre til efterlager 2, hvor der desuden tilføres lidt glycerin. Ca. 80% af biomassen fra efterlager 2 separeres vha. en skruepresse, mens ca. 20% pumpes videre til efterlager 3.



Øverst ses Terbrack påslag til indfødnings af fast biomasse såsom dybstrøelse og halm-roetopensilage. Nederst ses Bomatech hammermøller til knusning før iblanding i mixertank med tre omrørere (nederst til venstre).



Bioflex Feeder til indfødning af finsnippet biomasse såsom majsensilage, solsikkeaffald, DBG m.m. i efterlager 1. Der installeres snart et tilsvarende indfødningssystem i selve reaktoren.



Til venstre ses de 4 slagler i Bomatech hammermølle og bagerst udtaget. Til højre ses et brugt modskær samt 4 nye modskær til montering i hammermøllen.

Anvendte biomassetyper

Der indføres i alt ca. 200 tons biomasse pr. døgn. Der anvendes svinegylle fra egen svineproduktion og ingen gylle fra andre gårde. Der anvendes dybstrøelse, som primært er fra et stort stutteri samt i mindre grad dybstrøelse fra kvæg. Der dyrkes roer og majs som energiafgrøder, og majsensilagen finskives og ensileres for sig i plansilo. Roe og halm sam-ensileres i plansilo i et friskvægtforhold på ca. 80% roer og ca. 20% halm (mængderne måles ikke). Ved optagning af roerne opsamles roetop og roerod hver for sig, og roetoppen køres hjem og blandes med usnittet halm vha. en teleskoplæsser. Senere vaskes roerod med en roevasker fra Ørumsmeden, som har indbygget knuser, og usnittet halm og snittet roe blandes med møgspreader og lægges ind oveni stakken med halm+roetop. Der anvendes

også græs fra lavbundsarealer og frøgræs, som ensileres. I 2019 var frøgræshalmen dog for tør til rigtigt at ensilere, og i 2020 vil man forsøge at bjærge mere våd frøgræshalm. Endelig indkøbes der solsikkeaffald og DBG (grinded biomasse af f.eks. græs, havreskaller m.m.) samt glycerin. Tidligere har der været anvendt oliveaffald, men dette bruges ikke mere.

Der indføres ca. 200 tons biomasse pr. døgn, hvoraf de ca. 140 er svinegylle og ca. 50 tons er fast biomasse. Den faste biomasse består af 35% dybstrøelse, 35% halm-roensilage, 15% DBG og 15% solsikkeaffald, dvs. af de ca. 200 tons biomasse pr. døgn indføres ca. 17,5 tons dybstrøelse, ca. 17,5 tons halm-roensilage (svarende til ca. 3,5 tons halm), ca. 9 tons DBG og ca. 9 tons solsikkeaffald.



Dybstrøelse. Der anvendes primært dybstrøelse fra heste fra et stort stutteri.



Stak med halm-roeensilage. Normalt lægges der i første omgang en blanding af halm og roetop ind, og de to biomasser blandes vha. en møgspreader, hvor der sættes hele halm-baller op og læsses roetop i. Senere lægges en blanding af halm og snittet roerod ind ovenpå.



Halm-roerod-ensilage. Man kan stadig se roestykkerne, der har afgivet saft til halmen og er blevet gummiagtige.



Til venstre solsikkeaffald, til højre DBG med bl.a. havreskaller. Begge dele indføres vha. Bioflex Feeder i efterlager 1.



Ensilage af majshelsæd. Indføres vha. Bioflex Feeder i efterlager 1.

Erfaringer med anvendelse af halm-roensilage og dybstrøelse

Anlægget har gode erfaringer med at bruge halm-roensilage. Tidligere har der været problemer med flydelag i reaktoren, men efter montering af ekstra omrører, har der ikke været problemer med dette. Der er meget logistik, der skal fungere, når roerne skal tages op, og roetop skal blandes med halm ved indlægning i plansilo, og tilsvarende er der mange aktiviteter at koordinere, når roerne senere skal vaskes og snittes og blandes med halm ved indlægning i siloen. Pga. de mange led i håndteringskæden er der også mange omkostninger forbundet med fremstilling af halm-roensilagen. Selvom halm og roer blandes godt, sker der alligevel et vist saftafløb fra stakken.

Ausumgaard Biogas

Anlæg: Ausumgaard Biogas, Holstebrovej 101 / Ausumvej 4, 7560 Hjerm

Dato for besøg: Tirsdag den 23/6 2020

Interview med: Holger Thusholt Lauritsen, tlf. 61 73 80 61

Anlægget besøgt af: Søren Ugilt Larsen, Teknologisk Institut

Biogasanlæggets opbygning

Biogasanlægget er et gårdbiogasanlæg opført i 2017, som leverer opgraderet gas til naturgasnettet. Anlægget er af lavet af den tyske producent Envitec og er opbygget af 3 parallelle reaktorer (A, B og C) på hhv. 5.200, 5.200 og 5.800 m³ og med hhv. 4, 4 og 6 omrørere. Desuden er der to uopvarmede 'slavetanke' på 2.800 m³ med 4 omrørere, og disse tanke er enkeltvis knyttet til de to reaktorer på 5.200 m³, dvs. biomassen cirkuleres mellem hovedreaktoren og den uopvarmede reaktor. I alt er der en samlet reaktorkapacitet på 21.800 m³. Den afgassede biomasse pumpes fra reaktorerne via de to slavetanke. Der er ingen efterlager med gasopsamling, men gyllen køles ned til ca. 28°C, når den pumpes fra slavetankene. Temperaturen er ca. 51,6-51,7°C i de tre hovedreaktorer og ca. 46-47°C i de to slavetanke uden opvarmning. Tørstofindholdet i reaktorerne må maks. være 10,5% og er typisk mellem 10,0 og 10,5%. Omrørerne kører ca. 1/3 af tiden. Opholdstiden er 70-80 dage.



Ausumgaard Biogas. Forest en uopvarmet 'slavetank', der er forbundet til en opvarmet reaktortank i baggrunden. Desuden ses tanke til glycerin eller anden flydende biomasse.

Fast biomasse indføres via et walking-floor påslag og mikses i to dissolver-enheder à 4½ m³ med gylle, opsamlet vand fra ensilagepladser m.m. samt recirkuleret biomasse fra reaktorerne. I hver af de to dissolvere sidder en stjernekniv, som sikrer opblanding samt findeler fast biomasse lidt. På pumpestrengene fra dissolverne sidder der en Börger grinder (knive med modskær), som neddeler biomassen yderligere. Recirkuleret biomasse køres også igennem disse grindere. Glycerin indføres separat, enten direkte i den store reaktor eller i pumpestrengen mellem de to mindre reaktorer og deres tilhørende 'slavetanke'.



Opfyldning af påslag med walking floor til fast biomasse.



To Envitec-dissolvere à 4,5 m³ til opblanding af fast biomasse i gylle og recirkulat. Til højre ses nye stjerneknive, der sikrer omrøring og delvis neddeling i dissolverne.



Börger-grindere på indpumpningsstrengene.

Anvendte biomassetyper

Der indføres ca. 200 tons biomasse pr. døgn. Heraf udgør fast biomasse ca. 90 tons, mens resten er flydende biomasser som gylle, vaskevand, vand fra ensilagepladser m.v. Den fast biomasse udgøres især af dybstrøelse fra kalve og malkekvæg, hønsemøg, ensileret frøgræshalm, slætgræs, havreskalmel, ærterestprodukt fra Norge samt halmpiller. Der har tidligere været anvendt olivenkvas, men dette er nu erstattet af halmpiller, da olivenkvaset gav for lidt gas og problemer med bundfældning. På nuværende tidspunkt anvendes der dagligt ca. 40 tons slætgræs+frøgræs, 21 tons dybstrøelse, 11 tons havreskaller, 6-7 tons halmpiller og 5-6 tons hønsemøg. Desuden anvendes glycerin.

En del dybstrøelse kommer fra besætninger, hvor halmen snittes eller oprives inden udstrøning i stalden, og denne dybstrøelse kan indføres i biogasanlægget uden yderligere neddeling. Dybstrøelse med usnittet halm køres derimod igennem en rodknuser, som lejes ind periodevis. Når dybstrøelsen er knust, skal den bruges ret hurtigt, da den komposterer hurtigt efter knusningen.

Frøgræshalm finsnittes så fugtig som mulig og lægges ind i plansilo. Hvis frøgræshalmen er for tør, sprinkles der vand på i plansiloen for at få gang i ensileringsprocessen. Stakken med frøgræshalm kan godt stå åben i nogle få uger over den periode, hvor frøgræsset høstes. Derefter dækkes den til. Slætgræs finsnittes og ensileres på traditionel vis. Aulumgaard har omlagt til økologisk produktion, og derfor opfattes slætgræs ikke som 1. generations-biomasse og tæller derfor ikke som energiafgrøde. Der er netop ved at blive etableret et anlæg til ekstraktion af græsprotein på gården, og det er planen, at brunvand fra proteinfældningen skal bruges i biogasanlægget.



Dybstrøelse af usnittet halm. Denne dybstrøelse skal knuses med rodknuser før indfødnig i biogasanlægget.



Til venstre halmpiller og til højre havreskalmel.



Ensileret frøgræshalm.

Erfaringer med anvendelse af dybstrøelse og frøgræshalm m.m.

Der er meget få problemer med flydelag i reaktorerne. Der bliver dagligt holdt øje med reaktorerne, og hvis der ses tendens til flydelag på overfladen, øges omrøringen eller højden på omrørerne justeres. Filosofien er, at det er bedre at røre lidt for meget, fremfor at risikere opbygning af flydelag. Der har været problemer med at få Börger-grinderne til at fungere, men de fungerer nu. Sammenlignet med flydende biomasse som glycerin giver den faste biomasse væsentligt mere slid, bl.a. på stjernekniven i dissolverne m.v.

Lynggaard Biogas

Anlæg: Lynggaard Biogas, Over Lyngen 4, 4720 Præstø

Dato for besøg: Torsdag den 16/7 2020

Interview med: Peder Andersen, tlf. 22 22 23 46

Anlægget besøgt af: Søren Ugilt Larsen, Teknologisk Institut

Biogasanlæggets opbygning

Biogasanlægget er et gårdbiogasanlæg bygget af Dansk Biogas i 2002 og senere udbygget af Lundsby, og anlægget producerer el og varme via en 900 kW motor. Varmen udnyttes fuldt ud på bedriften i vinterperioden og i perioden med korntørring, mens der er overskudsvarme i andre perioder af året. Anlægget er opbygget af tre serieforbundne reaktorer på hhv. 1.000, 3.000 og 2.700 m³, og temperaturen er hhv. 52,5, 42 og 42°C, dog er temperaturen i reaktor 2 og 3 lavere om vinteren (ned til 36-38°C). Der er omrørere i alle tre reaktorer. Der indføres dagligt ca. 70 m³ biomasse, hvorved opholdstiden er ca. 14 dage i reaktor 1, 43 dage i reaktor 2 og 39 dage i reaktor 3, dvs. i alt ca. 96 dage. Halm blandes afgasset gylle fra reaktor 2 eller 3, mens anden biomasse såsom majs blandes med rågylle i en fortank. Tørstofindholdet i reaktorerne kendes ikke men vurderes at være over 10%.



Lynggaard Biogas. Til højre ses reaktor 1 til venstre reaktor 2.



Påslag til indfødnings af majsensilage mm., der opblandes med rågylle.

Der er to systemer til indfødnings af halm, dels en linje til tør halm og dels en linje til våd halm. Linjen til tør halm har fungeret i nogle år og består af et Passat-opriversystem samt en hammermølle med 5 mm sold. Halmen blandes herefter med afgasset gylle fra reaktor 2 eller 3.

Linjen til våd halm er fra GO Trading og etableret indenfor det seneste år og er stadig under udvikling/optimering. Denne linje består af en Seko Samurai 7 foderblande vogn med to vandrette snegle med skær, og våd halm findeles en del i foderblande vognen og blandes evt. med anden våd biomasse såsom mask for at øge vandindholdet. Herefter køres halmen via en snegl igennem et stjernesold, der sorterer sten fra halmen, men pt. sorterer dette sold også en del halm fra, så der er brug for en forbedring af dette system. Efter sorteringen køres halmen i en buffertank med walking floor, og herefter snegles den op i en pillepresse (Kahl-mølle, 12 mm hulstørrelse i matricen), der yderligere neddelar halmen, hvorefter halmen opblandes med afgasset gylle. Pillepressen fungerer bedst, hvis vandindholdet i halmen er over 30%.



Halmlinje med opriversystem til tør halm.



Hamtermølle med 5 mm sold til neddeling af tør halm før opblanding med afgasset gylle i tank til højre i billedet.



Tør halm efter neddeling i hammermølle.

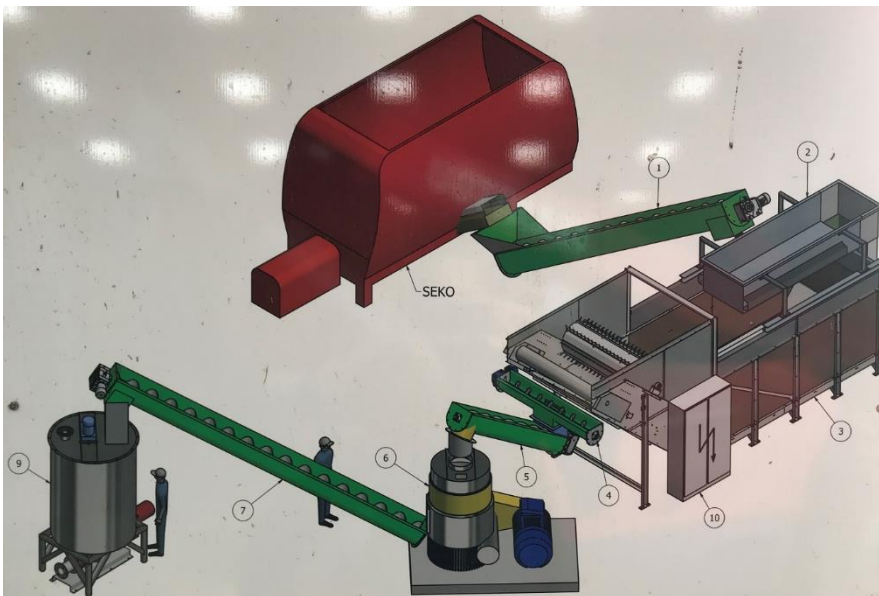


Diagram over anlæg til forbehandling og indfødnig af våd halm i biogasanlæg.



Indfødningslinje til våd halm.



Seko-foderblandevogn til opvanding og neddeling af våd halm.



De to snegle med skær i bunden af Seko-foderblande vogn til neddeling af våd halm.



Våd halm efter neddeling i Seko-foderblande vogn. Der var i dette tilfælde iblandet mask i foderblande vognen for at øge vandindholdet.



Buffertank til våd halm med stensortering vha. stjernesold og walking-floor til videre indføding til pillepresse.



Kahl-mølle/pillepresse til yderligere neddeling af våd halm.



Ruller og matrice i Kahl-mølle/pillepresse.



Våd halm efter yderligere neddeling i Kahl-mølle/pillepresse.



Tanke til opblanding af tør halm (t.v.) hhv. våd halm (t.h.) i afgasset gylle.

Anvendte biomassetyper

Den primære biomasse er tynd svinegylle, der pumpes fra gårdens egen svineproduktion på flere enheder. Derudover anvendes primært halm som biomasse, og der anvendes primært halm fra vårbygmarker med udlæg af rødsvingel samt frøgræshalm af rødsvingel. Halmen presses og køres i lade, og det der ikke er plads til i laden, stilles udenfor uden tildækning, hvorved det får noget vand. Udover halmen anvendes i mindre omfang majsensilage, affaldskartofler, mask, dybstrøelse og grønræteaffald. Der har periodevis været anvendt op til 10 tons halm pr. døgn af de i alt 70 tons biomasse pr. døgn, men for tiden anvendes formodentlig omkring 6 tons halm med 50-60% vand.

Erfaringer med anvendelse af halm

Anlægget har gode erfaringer med at bruge halm til biogasproduktionen, og der opnås en biogasproduktion (55% metan) på ca. 400 m³ pr. ton halm-VS svarende til ca. 220 m³ metan pr. ton halm-VS, hvilket svarer godt til 'tabelværdien' for halm. Biomassen i reaktor 1 er temmelig tyk pga. halmen, men der opleves ikke væsentlige problemer med flydelag i reaktorerne.

Lynggaard har tidligere haft et ribbebord til mejetærskeren med henblik på at ribbehøste kornet ved modenhed og lade strået stå til senere finsnitning og ensilering sammen med efterslæt. Det viste sig dog, at der var for stort spild af korn ved ribbehøst af modent korn (ca. 3-4 gange udsædsmængden blev spildt), og ribbebordet er derfor solgt igen.



Grønærteaffald, som giver relativt højt svovlindhold i biogassen.

Blåbjerg Biogas

Anlæg: Blåbjerg Biogas, Præstbølvej 11, 6830 Nørre Nebel, Danmark.

Dato for besøg: Tirsdag den 26/5 2020

Interview med: Bent Jespersen og Natalia Andersen, Telefon: 75 28 79 48

Anlægget besøgt af: Jens Bo Holm-Nielsen og Emil Agdal, Aalborg Universitet Esbjerg

Information om anlægget

Blåbjerg Biogas AmBA er et af de ældste biogasanlæg i Danmark, og blev taget i drift tilbage i 1996. Virksomheden er et andelsselskab med begrænset ansvar, og ejes af 35 andelshavere hvoraf lokale landmænd udgør størsteparten. Blåbjerg Biogas ledes af en bestyrelse, valgt af andelshaverne. Anlægget er i 2009, 2011 og 2014. blevet udvidet og moderniseret, så det i dag fremstår rentabelt og tidssvarende. Anlægget er til dagligt arbejdsplads for 4 medarbejdere som varetager drift og administration samt et team på 5 chauffører.

Blåbjerg Biogas udnytter ikke selv biogassen, men sælger den til tre kunder. En del af biogassen ledes til Nørre Nebel Fjernvarme, hvor gassen bliver brugt til produktion af el og varme. Elproduktionen, der er CO₂ neutral, bliver leveret til det offentlige el-net, og varmen bruges til fjernvarme i Nørre Nebel by. En anden del af biogassen ledes via en 9km gasledning til SeaWest Resort og Nymindegablejren, hvor biogassen ligeledes anvendes til produktion af el og varme.

Produktionsinformation

- Biogasproduktion: 7 mio. Nm³/år
- Biomasse behandlet: 220.000 ton/år
- Reaktorkapacitet: 20.000 m³
- Transportafstand: 5-10 km
- Procestemperatur: 52 °C (termofil)
- Energiproduktion: 45.5 GWh/år

Anlægget er karakteriseret ved at der er meget kort afstand til leverandørerne af gylle, og der findes fortsat et uudnyttet potentiale af gylle inden for korte transportafstande. Det er påvist at der er store klimafordele ved at behandle husdyrgødning i biogasanlæg. Både i forhold til nitrat udvaskning og emission af klimagasser. Derudover er gyllebaserede biogasanlæg også den bedste måde at sikre en recirkulering af del af de næringsstoffer der optages af fødevareproduktionen. - <https://www.blaabjergbiogas.dk/om/>

Selve Interviewet

Da der i længere tid har været kendskab til at Blåbjerg Biogas arbejder med en samarbejdsmodel i blandt deres leverandører om brugen af halmpiller i deres besætning imod en mindre godtgørelse fra Blåbjerg biogas, var dette interviewets hovedfokus. Sidst i referatet forefindes en illustration af ordningen.

Specifikke spørgsmål til samarbejdsmodellen mellem leverandører og biogasanlæg angående halmpiller

- **Hvor længe har der været etableret et samarbejde?**

Halmpillesamarbejdet startede som et forsøgsprojekt for 4-5 år siden. Det kørte på forsøgsbasis i 1-2 år. 500.000kr. blev der budgetteret med til en start svarende til et forventet forbrug hos leverandørerne på 1.000tons. Budgettet er efterhånden steget til det dobbelte 1 mio. kr. i 2019 svarende til en halmpilleanvendelse hos leverandørerne på 2.000 tons. Der er løbende kommet flere leverandører med i ordningen. Fra få landmænd i begyndelsen til nu ca. 33% af leverandørerne.

- **Hvordan opstod dette samarbejde? Hvem fik ideen og var primusmotor på etableringen?**

Det var bestyrelsen bag Blåbjerg Biogas der udklækkede ideen. I samarbejde med leverandører blev der udviklet en ordning vedrørende priser og leveringsbetingelser. Det endte med Sønderjysk Tørreindustri der skulle være eneste leverandør hvis man ønsker at få del i ordningen. Det bliver for bøvlet at skulle have flere leverandører af halmpilleprodukter. Samtidig ved man også at kvaliteten er i top hos Sønderjysk Tørreindustri, da de udelukkende producere af god kvalitet dansk hvedehalm. Der har været lidt diskussion i andelskredsen i forhold til produktleverandør, men man er enig om at ordningen kun vedr. en leverandør af halmpiller

- **Hvilken rolle spiller leverandørforeningen?**

Leverandører uden halm på bedriften bevirker at prisforskellen er forsvindende lille. 1,2kr. fratrullet 0,5kr som Blåbjerg giver i tilskud opnås en halmpris for landmanden meget lig med den almindelige halmpris.

Det er et emne der bliver diskuteret og snakket om i leverandørforeningen. Man handler hos sønderjysk tørreindustri hvis man vil have tilskud, det er et krav som Blåbjerg har stillet for nemheds skyld og for at sikre kvalitet i produktet.

Den øgede tilslutning til ordningen og derved skiftet i staldene fra andre strøelsesmidler skyldes primært at landmændene inspirerer hinanden. Blåbjerg Biogas gør intet for at presse folk til at være med i ordningen, de informerer blot om at den eksisterer.

Blåbjerg lever under varmeforsyningslovens "hvile i sig selv princip" - så der kan ikke leveres ret meget tilbage til landmændene, men halmpille tillægget er en måde der kan gives lidt tilbage til landmændene, samtidig med at der skabes et bedre råmateriale for biogasanlægget i staldene. På sigt skal anlægget kobles på gasnettet. Varde kommune er meget langsomme med at give de fornødne tilladelser.

- **Hvordan ser modellen ud på nuværende tidspunkt? Jeg husker Bent holdte oplæg til biogasbranchens seminar i 2017, hvor der udbetaltes 0,50 kr./kg halmpiller leverandørerne bestilte. Er der rykket på disse økonomiske parametre?**

Blåbjerg Stiller Sønderjysk Tørreindustri i udsigt hvilke mængder der forventes indkøbt fra leverandørerne. Dette er forhandlingsgrundlaget mellem Blåbjerg, og indirekte landmændene, og Sønderjysk Tørreindustri. Landmanden bestiller løbende over året selv den nødvendige mængde, og sender kopi af regning til Blåbjerg der så udbetaler 0,5 kr./kg indkøbt produkt.

Blåbjerg vil ikke stå som halmpille mellemmand

Modellen beror i vid udstrækning på gensidig tillid og forståelse. Det lader til at det virker fint. Blåbjerg stiller ingen krav om anvendelsesdokumentation, men stoler på leverandørerne om at de får halmpillerne i biogasanlægget med gyllen.

- **Hvad siger leverandørerne til at bruge halmpillerne? Og vil det være muligt at komme ud og besøge et par af leverandørerne der benytter sig af halmpiller? Aller bedst ville det være hvis der var nogen der havde omlagt fra sand til halmpiller.**

Der bliver snakket indbyrdes, men ikke noget Blåbjerg er inde over. Nye leverandører der ønsker at deltage blive skabt dynamisk gennem snak i leverandørforeningen. Blåbjerg hverver ikke tilslutninger.

Der er på nuværende tidspunkt en 11-12 leverandører ud af i alt 35 der er med i ordningen. Godt en fordobling fra samarbejdets begyndelse for 4-5 år siden. 1/3 af alle leverandørerne til anlægget.

Det forlyder at man skal lige lære produktet at kende, da vægtfylden er anderledes end med snittet halm. Dette kan resultere i at man anvender for meget til en start.

Generelle spørgsmål vedr. anvendelse af halm på biogasanlægget

Generelt vedr. anlægget:

- Biogasanlæggets alder, 'fabrikat', opbygning (antal reaktorer, serieforbundet), indfødningsanlæg til fast biomasse m.m.?

Det oprindelige anlæg er et BWSC anlæg. Snart bygget helt om. Deutche kvalitæt. Farmatica/Shuman.

- Biogasanlæggets størrelse (reaktorvolumen)?

Flow mængde 220.000 tons om året. Reaktorvolumen er på 20.600 m³

- Temperatur i reaktoren?

Termofil drift

- Gennemsnitlig opholdstid (reaktor hhv. efterlager)?

33 døgn i reaktor HRT, 2-3 dage i efterlager med køling. Ingen problemer med flydelag.

- Hvilken tørstofprocent køres der med i reaktoren?

Halmpiller har bevirket en stigning i tørstofprocenten på 0,5-1%. Nogle leverandører bruger mange halmpiller og ligger højt på tørstof 11-14% ved indlevering af gylle.

Der er eksempler på leverandører der har ligget lavt i tørstofindhold der er overgået til pillerne, og nu leverer gode tørstofprocenter. Det bevirker en form for dobbeltafregning som Bent sagde det, i og med at der så både udbetales tilskud til halmpillerne OG udbetales en tørstofpræmie ved indlevering af gylle med godt tørstofindhold. Men det er ikke noget man tager ilde op fra Blåbjerg side

Tørstofprocent i indfødt biomasse før halmpiller lå på godt 8%. efter halmpiller er kommet til leverandørerne er den steget med 0,5-1%. Ifølge Jens Bos beregning 0,7%

220.000t biomasse/gylle a 8% TS = 17.600 t TS

2000 t halmpiller a 82%TS = 1.640 t TS

I alt TS 19.240t TS / 222.000t Biomasse = 8,7% TS

Den samlede tørstof mængde er hermed steget fra 8,0% TS til 8,7% TS ved tilsætning af denne mængde halmpiller som strøelse i staldene.

- **Typisk biomassesammensætning (procentandele af hovedtyper, husdyrgødningstyper, energiafgrøder, diverse andre biomasser)?**

Primært tynd kvæggylle 85-90%, 7-8% svine, lidt høns, lidt frugt (æbler), minkgylle og madaffald.

Generelt vedr. brug af halm på anlægget:

- **Hvor længe er der brugt halm?**

Der er ikke tidligere specifikt forsøgt at få mere halm i reaktoren før halmpillesamarbejdet. Der har der været den halm der nu en gang blev bragt til anlægget fra landmændene.

- **Hvilken type halm anvendes (hvede, byg osv.)?**

Der anvendes udelukkende hvedehalm fra Sønderjysk tørreindustri.

- **Hvor stor andel af halm anvendes (gnsn., evt. maks.)?**

0,9% på nuværende tidspunkt (leverer næsten 10% af den samlede tørstof!!!)

- **Hvordan forbehandles halmen før indfødning (neddelingsmetode/-teknologi, partikelstørrelse m.m. – gerne fotos inkl. tommestok)?**

Der anvendes ikke dybstrøelse, og man bliver betænkelig når man hører historier fra andre anlæg.

Vogelsangs Premix ser lige nu ud til at være den mest aktuelle indfødningsmulighed for ubehandlet halm og dybstrøelse.

- **Hvordan indføres halmen?**

Almindelig indpumpning.

- **Erfaringer med anvendelse af halm?**

- Flydelagsdannelse?

- *Intet bøv! med halmflydelag da halmpiller ikke danner flydelag. "Du kan hælde 20 tons i blandetanken og røre det op uden problemer".*
- Omrøringsproblemer/elforbrug til omrøring?
- Energiproduktion (selvom det er svært at kvantificere effekten af halmen)?
-

- **Plan for fremtidig anvendelse af halm?**

Dybstrøelse kan på sigt blive aktuelt men ikke før virksom forbehandling og indfødning er bevist.

- **Anbefalinger til andre biogasanlæg vedr. brug af halm?**
- **Behov for undersøgelser vedr. halm til biogas?**