



Strategiudspil termisk forgasning

PARTNERSKABET FOR TERMISK FORGASNING

26-06-2018

Udarbejdet af:

Ea Energianalyse
Frederiksholms Kanal 4, 3. th.
1220 København K
T: 88 70 70 83
E-mail: info@eaea.dk
Web: www.eaea.dk

Foto: Torben Skøtt

Indhold

1	Sammenfatning	4
2	Formål og baggrund	5
2.1	Formål med rapporten	5
2.2	Partnerskabet for Termisk Forgasning	7
2.3	Hvad kan termisk forgasning?	7
2.4	Arbejdet i partnerskabet	10
3	Udviklingsbehov og strategiske perspektiver	14
3.1	Teknologiudvikling generelt	14
3.2	Forgasning til kraftvarmeanlæg	15
3.3	Forgasning forkoblet kraftværk	16
3.4	Forgasningsbaseret Bio-SNG	17
3.5	Forgasning til flydende brændstoffer	18
3.6	Forgasning i industrien	18
3.7	Gasrensning	19
3.8	Opskalering er vejen til billigere forgasningsanlæg	19
3.9	Forgasning og svære brændsler	20
3.10	Energisystemintegration og teknologisamspil	21
3.11	Sammenfatning	22
	Bilag 1 - Bidrag fra BioSynergi Proces ApS	25
	Bilag 2 - Bidrag fra Danish Fluid Bed Technology	36
	Bilag 3 - Bidrag fra Danmarks Tekniske Universitet og Teknologisk Institut	51
	Bilag 4 - Bidrag fra Dansk Gasteknisk Center	65
	Bilag 5 - Bidrag fra Energinet og DTU Management	87
	Bilag 6 - Bidrag fra Frichs	92
	Bilag 7 - Udsagn fra workshop	96

1 Sammenfatning

Termisk forgasning kan dels gøre det muligt at anvende biomasse og affald i mere fleksible kraft- og kraftvarmeværker og dels levere grøn gas til transportsektoren og til industrielle formål. Fleksible kraft- og kraftvarmeværker vurderes som et afgørende redskab til at føre Danmarks vision om et energisystem uden fossile brændsler ud i livet, når vind og sol udgør størstedelen af elproduktionen i Danmark og nabolande.

Fordele ved forgasningsteknologien er bl.a:

- bedre mulighed for recirkulering af aske og næringsstoffer
- energiudnyttelse af de omfattende, men ofte udfordrende biomasse-restprodukter i samfundet
- løsning af nogle af udfordringerne med medicinrester, mikroplast og tungmetaller i samfundets materialestrømme.

Danske forskningsmiljøer og danske virksomheder ligger på verdensplan langt fremme med forgasningsteknologien og processer, der kan spille ind i energisystemer verden over, og markedet for forgasningsteknologi er stort i både Danmark og udlandet.

Der er fortsat et tydeligt behov både for målrettet forskning, teknologiudvikling og demonstration samt for investering i anlæg i fuld skala, for at biomasseforgasning kan nå et kommercielt gennembrud.

Nærværende rapport sammenfatter arbejdet i Partnerskabet for Termisk Forgasning og særligt en række bidrag fra danske aktører inden for termisk forgasning, der peger på væsentlige udviklingsbehov.

Rapporten bygger på bidrag fra medlemmerne af bestyrelsen for Partnerskabet for Termisk Forgasning og indeholder et ekstrakt af disse. Bidragene findes som bilag og hovedpunkterne findes i afsnit 3.11.

Rapporten belyser, at fagfolk indenfor termisk forgasning har en opgave med at informere politikere og beslutningstagere om de særlige fordele og muligheder ved termisk forgasning og potentialet i et energisystem og en industri indenfor området.

2 Formål og baggrund

Denne rapport sammenfatter arbejdet i Partnerskabet for Termisk Forgasning og uddrager særligt strategiske perspektiver og udviklingsbehov for termisk forgasningsteknologi ud fra bidrag fra bestyrelsesmedlemmer i partnerskabet og andre danske aktører med interesse inden for termisk forgasning af biomasse og affald.

2.1 Formål med rapporten

Antallet af holdninger til, hvilken strategi, der bør følges, for at potentialet i termisk forgasning kan realiseres, er nok mindst lige så stort som antallet af medlemmer i Partnerskabet for Termisk Forgasning. Forslag til den fremtidige strategi for udvikling af termisk forgasning er derfor opstillet af en række aktører inden for branchen således, at de hver især har fået mulighed for at tilkendegive en mening om og ønsker til fokusområder og strategi.

Aktørerne er så vidt muligt samlet to og to ud fra deres baggrund, så deltagerne har nogenlunde sammenfaldende interesser. Inden for nogle emner har der ikke kunnet dannes grupper. Hver gruppe/aktør har haft til opgave at bidrage med et notat med forslag til strategi ud fra en skabelon.

Bidragene er blevet til på baggrund af arbejdet med arbejdspakkerne i partnerskabet samt aktørernes egne projekter og erfaringer.

Rapporten sammenfatter arbejdet i partnerskabet og sammenfatter strategibidragene i fælles konklusioner og anbefalinger så vidt det er muligt, og er ikke et udtryk for Ea Energianalyses konklusioner på arbejdet.

Bidrag

Bidragene er udarbejdet af:

- BioSynergi Proces ApS
- Danish Fluid Bed Technology
- Danmarks Tekniske Universitet
- Dansk Gasteknisk Center
- Energinet
- Frichs
- Teknologisk Institut

Følgende emneliste har været bragt i spil som oplæg til bidragyderne:

- Teknologier til og omkring forgasning
 - Direkte forgasning
 - Indirekte forgasning
 - Synergier med andre teknologier (fx biogas)
 - Kraftvarme (forbrændingsmotor hhv. forkoblet kedel/dampkreds)
 - Bio-SNG
 - FT-diesel, DME, metanol
 - Gasrensning
- Brændsler og ressourcer
 - Nemme brændsler - træflis og træpiller
 - Besværlige brændsler og affaldsstrømme
 - Hvor store ressourcer er der i DK?
 - Konkurrence med andre teknologier om ressourcer
 - Energiafgrøder/energiskov i Danmark eller biomasseimport?
- Produkter, biprodukter og restprodukter fra forgasning
 - Biochar
 - Aske
 - Tungmetaller
 - Gødning/næringsstoffer
- Indpasning i det danske energisystem
 - Energisystemer
 - Energiplaner
- Rammebetingelser for forgasning
 - Afgifter
 - Tilskud
 - Ligestilling biogas/bio-SNG
 - Definitioner for biogas og biomasse
- Markedet for forgasningsteknologier
 - Markedet lokalt i Danmark
 - Markedet i Europa
 - Markedet globalt

Samlet set berører bidragene de fleste af disse emner. Bidragene kan findes som bilag til rapporten.

2.2 Partnerskabet for Termisk Forgasning

Formålet med foreningen Partnerskab for Termisk Forgasning er at koordinere, styrke og målrette den danske indsats inden for forskning, udvikling og demonstration (FUD) således, at termisk forgasning kan udfylde sin rolle og sit potentiale i det forventede fremtidige danske energisystem.

En række vidensinstitutioner og virksomheder støtter op om projektet, og partnerskabet er åbent for alle interesserede aktører. Foreningen fik støtte af Energiteknologisk udvikling og demonstration (EUDP) ved ansøgningsrunden i marts 2014. Partnerskab for Termisk Forgasning afholdt stiftende generalforsamling 20. november 2014.

Rapporten omfatter arbejdsplan 3 (WP3) i EUDP-projektet, som løber i perioden august 2014 til januar 2018 og udgør hjertet i partnerskabets aktiviteter. EUDP-projektet har følgende arbejdsplaner:

- WP1 Status for termisk forgasning
- WP2 Termisk forgasning og det danske energisystem
- WP3 Strategi for termisk forgasning
- WP4 Rammebetingelser
- WP5 Implementering af strategien
- WP6 Organisering af opstart af partnerskabet

De forskellige arbejdsplaner i EUDP-projektet er gennemført af partnerskabets medlemmer og andre udvalgte aktører, som er blevet inddraget løbende gennem projektet. WP1, 2, 4, 5 og 6 er afsluttet, og rapporter kan findes på partnerskabets hjemmeside.

Partnerskabet for termisk forgasning har anmodet Ea Energianalyse om at bistå med WP3 i forbindelse med at sammenfatte en strategi for termisk forgasning. Nærværende rapport placeres også på partnerskabets hjemmeside.

WP5 skal ses som de individuelle projektansøgninger til FUD-puljer, der reflekterer til partnerskabets arbejde og strategi.

2.3 Hvad kan termisk forgasning?

Termisk forgasning af biomasse er et teknologiområde, der kan medvirke til at dække behovet for vedvarende energi i samspil med øvrige energiteknologier i energisystemet. Termisk forgasning er - sammenlignet med solenergi eller

vindenergi, hvor noget drejer rundt, og der kommer elektricitet ud - en mere kompleks teknologi med mange variable og mange variationsmuligheder.

Heldigvis har kloge mennesker i ind- og udland tænkt sig godt om og over de seneste år fået godt styr på mange forgasningsteknologier i både demonstrationsprojekter og kommerciel anvendelse. Det er glædeligt, for ud over at fremstille el og varme effektivt til energisystemet, har termisk forgasning stort potentiale for at bidrage til at dække en lang række øvrige behov for løsning af udfordringer med miljø og materialestrømme, som findes i samfundet.

På energisiden kan termisk forgasning supplere de fluktuerende energikilder og bidrage til at inddrage gasnettet til at løse lagringsproblematikkerne i fremtidens energisystem. Termisk forgasning kan ligeledes bidrage med forskellige brændsler til brug på transportområdet - både til vejtransport, søtransport og luftfart. Når termisk forgasning benyttes til fremstilling af transportbrændsler, er udviklingsvejen til biologiske plastmaterialer og andre produkter, der traditionelt kommer fra mineralisk olie, betydeligt kortere.

Samtidigt kan forgasningsteknologierne gøre det muligt at få nytte ud af besværlige/billige brændsler og restprodukter. De kan bl.a. tage hånd om restprodukter fra rensningsanlæg eller fra biogasanlæg, hvor kun omkring halvdelen af energiindholdet i biomassen udnyttes. Her kan forgasning spille en rolle ved at fjerne problemer med miljøfremmede stoffer, kim, medicinrester, mikroplast og tungmetaller.

Med termisk forgasning kan næringsstoffer i brændslet - såsom fosfor, der er en begrænset ressource - bedre recirkuleres til skov- og landbruget. Restprodukter fra forgasningsanlæg i form af aske og biokoks kan både anvendes som jordforbedringsmiddel, hvor de særligt på visse jorder kan have særdeles positive effekter på udbyttet af afgrøder og til kulstoflagring, idet koksen er langt mere stabil end fx nedmuldet halm eller restfibre fra biogasanlæg. Termisk forgasning kan således bidrage til at binde landbruget tættere sammen med energisektoren.

Hvis ikke nedmuldning af koksen bidrager tilstrækkeligt som kulstoflager, kan termiske forgasningsanlæg lettere end andre teknologier kombineres teknologier til teknologier til kulstofbinding og dermed bidrage til at fjerne kulstof fra atmosfæren eller opsamle kulstoffet til videre recirkulering.

Anlæg til termisk forgasning forekommer i alle størrelser - fra få kilowatt til mange megawatt - og i anlæg med meget forskelligartede formål. Det betyder, at anlæggene kan have mange placeringsmuligheder i hele landet. Forgasing kan bl.a. derved have en positiv indflydelse på beskæftigelse og jobskabelse i alle dele af landet, såvel ved fremstilling og anlæggelse som ved drift og brændselsfremskaffelse til anlæggene.

Men, ikke alle typer anlæg kan løse alle behov, og historien viser, at termiske forgasningsanlæg ikke kommer af sig selv. De kræver indsigt på alle niveauer, fra politikere, beslutningstagere og udviklere til leverandører og ejere/brugere. Og frem for alt kræver de et marked, hvor de energimæssige forhold og eventuelt de øvrige fordele/yardelser værdiansættes.

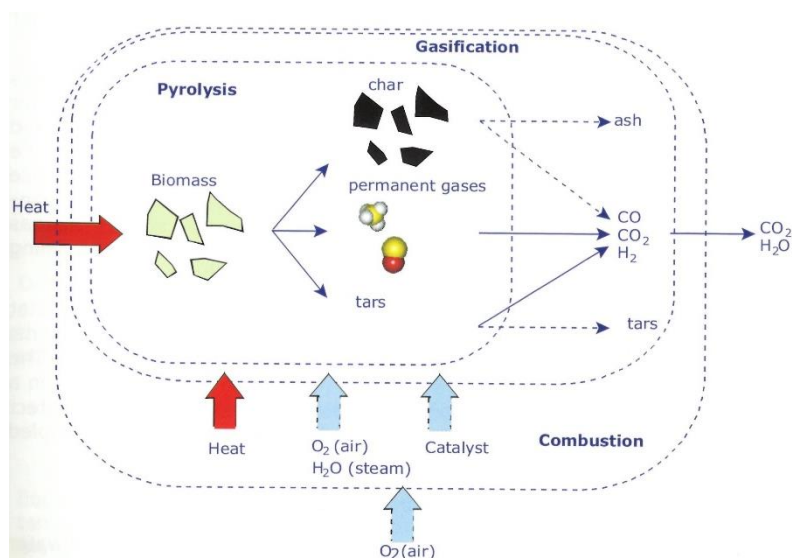
De dansk udviklede forgasningsteknologier befinder sig på et varierende stade af modenhed. De seneste år har flere koncepter oplevet en uheldig udvikling, hvorved flere har måttet indstille aktiviteterne. En enkelt teknologi til kraftvarme har mange driftstimer i logbogen, og leverandøren er nået frem til at kunne markedsføres kommercielt, mens andre danske teknologisor, der har været tæt på at kunne leveres, igen befinder sig på universiteter eller i virksomheder og har til gode at komme i drift i samfundet. Der findes også anlæg i kommerciel drift i Danmark, hvor leverandøren er udenlandsk.

Hvad er termisk forgasning?

Rent kemisk teknisk er termisk forgasning en proces, hvor et brændsel - for eksempel biomasse - opvarmes, men hvor man tilføjer så lidt luft, at der ikke kan ske en egentlig forbrænding. I stedet fordamper først vand, og dernæst frigives flygtige forbindelser fra brændslet - forgasningsgas, også kaldet produktgas. Produktgassen består typisk af brint (H_2), lettere kulbrinter såsom metan (CH_4), kulmonoxid (CO) og kuldioxid (CO_2). Desuden kan den indeholde andre kulbrinteforbindelser, hvoraf nogle kan være problematiske for den efterfølgende udnyttelse af produktgassen, medmindre der tages hånd om dem.

Produktgassen har en brændværdi og kan enten renses og indfyres i en motor, der kan producere el og varme, eller den kan indfyres i en kedel, der producerer damp til en dampturbine, som derefter kan producere el og varme. Produktgassen kan også renses og metaniseres og sendes i naturgasnettet, hvor den kan bruges på lige fod med naturgas. Endelig kan produktgassen renses og omformes til et flydende produkt, der videre kan opgraderes til et brændstof til brug i transportsektoren.

Der bruges forskellige typer forgasningsteknologi alt efter formålet med gassen, idet sammensætningen af gassen kan være mere eller mindre velegnet til det konkrete formål. I alle tilfælde er gasanalyse og gasrensning en nøgle til efterfølgende succesfuld anvendelse af gassen.



Figur 1. Princip over termisk forgasning fra Handbook Biomass Gasification.

Forgasningsteknologi kan styrke den fleksibilitet, der skal til at opretholde et fremtidigt energisystem med en stor andel vindkraft, og teknologien kan være hjertet i den balance, den fluktuerende vindkraft behøver. I det nuværende energisystem kan forgasningsteknologi være en effektiv måde at levere el og varme på til fjernvarmenettene og til industrien - også på basis af vanskelige biobrændsler eller affaldsstrømme.

2.4 Arbejdet i partnerskabet

Her følger en nærmere gennemgang af arbejdet i Partnerskabet for Termisk Forgasning. Rapporter over arbejdet forefindes på partnerskabets hjemmeside på www.forgasning.dk. Der er i alt 6 arbejdsplaner under EUDP-projektet.

I **arbejdsplan 1** er der gjort status for teknologier, der har relevans for danske forhold og danske anvendelser af teknologi til termisk forgasning. I Danmark er der udviklet koncepter indenfor hovedtyperne af forgasere:

- Fixed bed (modstrøms- og medstrøms typer)
- Cirkulerende fluid bed
- Entrained flow.

I **arbejdspakke 2** blev der gennemført en samfundsøkonomisk modellering af, hvorledes termisk forgasning kunne blive integreret i energisystemet i 2050. En samfundsøkonomisk analyse ekskluderer rammebetingelser såsom subsidier og afgifter, der gælder for teknologien. Modelleringen byggede på forgasningsteknologier, der er beskrevet i Energistyrelsens Teknologikatalog med de forudsætninger, der indgår heri om teknologisk udvikling, herunder optimering af virkningsgrader og reduktion af investerings- og driftsomkostninger. Analysen viste, at omkostningerne ved termisk forgasning af træ med de benyttede forudsætninger kun er marginalt dyrere end biogas fra gylle og gylle/halm. Omkostninger ved termisk forgasning af halm ville ligge under biogasprisen. Konklusionen er dermed, at termisk forgasning og biogas ligger på samme niveau og betydeligt under omkostningerne ved metan gennem elektrolyse. Blandt de særligt positive resultater lå fremstilling af bio-SNG på basis af affaldsfraktioner.

Arbejdspakke 3 omfatter nærværende arbejde med at udarbejde en strategi for fortsat forskning, udvikling og demonstration af termiske forgasningsteknologier.

I **arbejdspakke 4** er rammebetingelserne for termisk forgasning blevet undersøgt, og de fremtidige rammebetingelser vurderet. Dertil er selskabsøkonomien i investeringer i termiske forgasningsanlæg i Danmark modelleret og sammenlignet med alternativer i LCoE-beregninger (Levelised Cost of Energy), hvor alternative metoder til at levere samme energiservice sammenlignes. Der er undersøgt fire forskellige anvendelser af termisk forgasning og sammenlignet med andre, relevante måder at dække samme behov på. Anvendelserne er:

- Kraftvarmeproduktion med forbrændingsmotor (Fixed bed forgasser)
- Forgasser forkoblet kraftvarmeværk med kedel og dampturbine (Cirkulerende fluid bed forgasser)
- Bio-SNG (grøn naturgas) fra forgasning af biomasse og affald (Cirkulerende fluid bed forgasser)
- Fremstilling af biodiesel med Fischer-Tropsch-processen (Entrained flow forgasser).

Antagelser og konklusioner fra arbejdsapakken gengives kort herunder.

Kraftvarmeproduktion	På el-siden er der pres fra EU for, at el-tilskud ligestilles med øvrige VE-teknologier. Hvis det sker, vil varmeprisen for forgasningskraftvarme være væsentlig højere end varmeprisen for den billigste alternative teknologi. Hvis tilskudsordningerne skulle fortsætte som i dag, og forgasningskraftvarme dertil kan indpasses som grundlastanlæg med 8.000 fuldlasttimer, vil de kunne konkurrere selskabsøkonomisk. Denne situation vurderes imidlertid at være mindre sandsynlig. Med 5.000 fuldlasttimer, som vurderes mere realistisk, vil forgasningskraftvarme (og biogaskraftvarme) selv med høje tilskud ikke kunne konkurrere med alternative varmeproduktionsteknologier. Uden tilskud vil forgasningskraftvarme være 2-3 gange dyrere end alternative varmeteknologier; også ved 8.000 fuldlasttimer.
Forkoblede forgassere	Forkoblede forgassere kan blive rentable ved forgasning af både halm og affald, hvor gassen fyres ind til et større biomassekraftvarmeværk under de rette omstændigheder. Hvis tilskudsniveauet i dag opretholdes, vil forkoblet forgasning af halm være selskabsøkonomisk særdeles attraktivt, og forkoblet forgasning af affald på biomassefyrede værker ser ud til at give en selskabsøkonomisk gevinst selv uden tilskud
Bio-SNG fra forgasning af biomasse	Det er realistisk, at tilskud til bio-SNG sidestilles med opgraderet biogas, men det vurderes ikke sandsynligt, at tilskudsniveauet stiger frem mod 2030. Med tilskudsmæssig ligestilling med biogas, kan bio-SNG fra forgasning af biomasse blive konkurrencedygtigt i forhold til naturgas og opgraderet biogas, hvis omkostningerne reduceres til ca. det halve af niveauet i dag, hvilket svarer til teknologikatalogets fremskrivning. Uden teknologiforbedringer vil bio-SNG koste mere end det tredobbelte af naturgas i 2030. Der bør derfor lægges vægt på en styrket F&U-indsats for at hjælpe forgasning af biomasse til bio-SNG-produktion på vej og udnytte det potentiale, som bio-SNG fra biomasse udgør.
Bio-SNG fra forgasning af affald	Bio-SNG fra forgasning af visse affaldsfraktioner (fx RDF) kan konkurrere med forbrænding af affald i 2030. Faktisk viser beregningerne at forgasning af affald kan være den billigste måde at håndtere affald på, når det bruges til at producere bio-SNG, der afsættes på naturgasnettet. Ydermere viser beregningerne, at forgasning af RDF-affald kan være den billigste måde at producere bio-SNG på - selv uden tilskud. Resultatet forudsætter ligesom for bio-SNG-produktion fra biomasse dog en betydelig udvikling af forgasningsteknologien. Uden teknologiuudvikling vil forgasning af affald ikke kunne konkurrere med affaldsforbrændingsanlæg.

Flydende biobrændstoffer

Uden tilskud forventes Fischer-Tropsch syndiesel ikke at være konkurrencedygtigt med fossilt diesel i 2030. Med den forudsatte teknologiforbedring er meromkostningen ved F-T syndiesel dog nedbragt til kun 30% i 2030. Det svarer til en CO₂-reduktionspris på ca. 560 kr./ton, som ikke vurderes at være en høj pris for omstilling inden for transportsektoren. På transportområdet forventes mandater at blive styrende virkemidler, hvor F-T syndiesel skal konkurrere med alternative 2.g biobrændstoffer som FAME, HVO, bioethanol samt "grøn" gas. I dag prioriteres F-T syndiesel ikke til at opfylde mandater, men med en betydelig teknologiudvikling vil brændslet på lang sigt have et skabsøkonomisk potentiale.

Studiet i arbejds pakke 4 viser altså interessante privatøkonomiske perspektiver i 2030 for visse af de undersøgte forgasningsteknologier og brændsler. Som det fremgår, er en betydelig teknologiudvikling en forudsætning for, at disse perspektiver kan virkeliggøres.

Arbejds pakke 5 omhandler udmøntning af strategien. Arbejds pakken skal ses som de individuelle projektansøgninger til FUD-puljer, der reflekterer til partnerskabets arbejde og strategi. Denne arbejds pakke var tiltænkt finansiering via kontingenter fra medlemmer. Da medlemsskaren har været mindre end budgetteret, har der ikke været budget til organisering af fælles ansøgninger, men medlemmerne har hver især været aktive med projektforslag inden for området.

I **arbejds pakke 6** har projektet støttet driften af sekretariatet for partnerskabet hos DGC. Partnerskabet har i projektforløbet afholdt tre arrangementer, hvor den seneste workshop blev afholdt 27. april 2017 hos DTU Risø. Workshopen omfattede en kort drøftelse af en mulig strategi for termisk forgasning. Deltagerne, der alle var kompetente indenfor termisk forgasning og med hver sin faglige vinkel foreslog en række punkter til en strategi. En liste over disse punkter kan ses i bilag 7.

3 Udviklingsbehov og strategiske perspektiver

I det følgende søges de identificerede udviklingsbehov og strategiske perspektiver fra de ovennævnte bidrag uddraget indenfor 10 hovedpunkter. Målet er at beskrive udviklingsbehovet og hvem, der tænkes at foretage sig hvad og hvornår, for at behovet kan blive adresseret.

3.1 Teknologiu udvikling generelt

De dansk udviklede forgasningsteknologier befinder sig på et varierende stade af modenhed. Enkelte teknologier til kraftvarme har mange driftstimer i log-bogen og er nået frem til at kunne markedsføres som kommercielle anlæg, mens andre teknologier er helt nye og befinder sig på konceptniveau på universiteter eller i virksomhederne. Midt imellem befinder sig teknologier - både målrettet lille og stor skala - der har eller har haft laboratorie, demonstrations- eller pilotanlæg i større eller mindre skala i drift.

Samlet set, repræsenterer dansk udviklede teknologier et godt teknisk udgangspunkt for fremtidige, internationale markedsandele. I 2010 forventede danske leverandørvirksomheder i 2020 at have over 2.000 anlæg i drift over hele verden. Denne forventning ser ikke ud til at blive opfyldt. Gennem de seneste 5-8 år er antallet af anlæg i drift eller forsøgsdrift i Danmark derimod gået tilbage, således at der blot findes anlæg i drift i Harbøre og i Skive.

En række udviklere og leverandører har af en vifte af årsager måttet standse videre aktiviteter og nogle demontere anlæggene. I mellemtiden er udenlandske leverandører blevet styrket, og særligt inden for små og mellemstore kraftvarmeanlæg har de nu teknologierne til salg på hylderne og op mod 1.000 anlæg i drift. Det er således lykkedes udenlandske aktører at opnå en egentlig industriel produktion af forgasningsanlæg til kraftvarme.

Fælles for alle teknologierne - både danske og udenlandske, både de nye og de næsten kommercielle - er et fortsat behov for udvikling. Der er både behov for at styrke den grundlæggende forståelse af forgasningsprocesser og for at vise, at teknologierne kan præstere den lovede ydelse og samtidig præstere en god driftssikkerhed til en konkurrencedygtig samlet omkostning. Den grundlæggende forståelse er essentiel for at kunne forstå hvad der går godt og - ikke mindst - hvis noget går galt i udviklingsforløbet eller under opskalering og dermed for hurtigt kunne finde en løsning og komme videre. Hvis teknologierne ikke er tilstrækkeligt driftssikre, risikerer investor at stå med et an-

læg, der ikke kan køre i tilstrækkeligt mange timer til at forrente investeringen. Produktionsomkostningerne, dvs. omkostninger til investeringer og drift skal reduceres for at forgasningsteknologien kan finde plads i et energisystem med øget konkurrencepræg.

Der er samtidig behov for at se forgasning i synergi med andre teknologier som fx biogasanlæg. Et biogasanlæg udnytter kun halvdelen af energien i biomassen. Denne del kunne forgasning udnytte. I et forgasningsanlæg er der varme tilovers, som biogasanlægget kunne udnytte i sin proces. Begge kunne have fælles metanisering og opgradering til naturgaskvalitet. Ovenikøbet ville restprodukterne i form af gødning blive forbedret.

Sådanne og andre synergier bør udforskes og udvikles, og forgasning bør ligeledes udvikles i sammenhæng og i samspil med øvrige fremtidige energiteknologier.

3.2 Forgasning til kraftvarmeanlæg

Forgasningsteknologien gør det muligt at udnytte et brændsel mere effektivt til fremstilling af elektricitet i mindre anlæg end andre teknologier. Det betyder, at den samlede udnyttelsesgrad af et brændsel i et fjernvarmesystem i en lille by kan blive høj og CO₂-fortrængningen dermed stor.

Teknologien gør det muligt og logisk at udnytte lokale brændsler, skabe nationale og lokale arbejdspladser og bidrage med energiproduktion, når andre VE-teknologier ikke kan. Der er talrige eksempler på, at løsninger findes og implementeres i landene omkring Danmark.

Det vurderes, at de tilbageværende teknologiske udfordringer, på de hidtil udviklede danske teknologisor kan løses, og at der ikke er behov for nye teknologier. Udfordringerne er mere af økonomisk karakter, hvor der dels er behov for investering i konkrete anlæg, hvor udfordringerne kan opstå og løses, dels for stabile og langsigtede rammebetingelser, der kan ansprende til disse investeringer.

Særligt EU's statsstøtteregele, hvor statsstøttegodkendelse kun kan gives for 10-årige perioder, er en uovervindelig "show-stopper" for etablering af forgasningsanlæg til kraftvarmeproduktion. Denne primære barriere overskygger andre barrierer, herunder, at FUD-programmerne fokuserer på udvikling af nye koncepter fremfor at få allerede udviklede teknologier demonstreret og endelig idriftsat.

Selvom partnerskabets studier med de benyttede forudsætninger har indikeret, at betingelserne for forgasningsbaseret kraftvarmeproduktion ser ugunstige ud i det danske energisystem, betyder det ikke nødvendigvis, at der ikke skal opføres anlæg. Danske aktører har opbygget unik viden, der har stor bevågenhed i andre lande/energisystemer. Demonstrationsanlæg på hjemmemarkedet er essentielle ift. at forløse eksportpotentialer for teknologierne.

Muligheden for at udnytte teknologier, der kan benytte restprodukter og levere nogle af de synergier, der beskrives i næste afsnit, i mindre kraftvarmeanlæg bør også undersøges.

Partnerskabet for Termisk Forgasning har en rolle i at informere politikerne om potentialer i termisk forgasning og barriererne.

Danske aktører har demonstreret, at mindre forgasningsanlæg kan håndtere afgasset slam fra rensningsanlæg og bidrage til en bedre miljøprofil. Der savnes midler til at udvikle og optimere konceptet, så det kunne blive en integreret del af teknikken på alle rensningsanlæg i Danmark og verden.

3.3 Forgasning forkoblet kraftværk

Når en forgasser kobles på et kraftvarmewærk og produktgassen fyres ind i nye brændere i den eksisterende kedel, har det traditionelt været for at øge andelen af biomasse, der praktisk kan samfyres med kul til over 20-25%. Denne mulighed findes stadig enkelte steder i Danmark, nemlig i Esbjerg, Aalborg og Odense, hvor der stadig fyres med kul. Nu, hvor mange andre store værker er omstillet helt til biomasseforbrænding er bevæggrunden i lige så høj grad at kunne supplere brugen af de sædvanlige, nemme og dyre bio-brændsler såsom træpiller og træflis i disse værker med en forgasser, der omsætter specielle, besværlige og eller billigere brændsler og restprodukter, herunder indenlandske/lokalt genererede brændsler.

Fleksibilitet ift. brug af billigere brændsler har alt andet lige effekt på driftsomkostningerne for de store anlæg og dermed på deres konkurrenceevne og driftsmuligheder i varme- og elnet. Når brændslerne er restprodukter, kan kraftvarmewærker og særlige typer forkoblede forgasningsanlæg medvirke til at løse miljøproblemer fra de pågældende restprodukter og forbedre afsætningsmuligheder for restprodukterne og dermed knyttes energiproduktionen tættere ind til samfundets øvrige sektorer, herunder industri og landbrug. Der kan også peges på en positiv klimagevinst ved at omsætte kulstoffet fremfor at lade restprodukterne forgå på mark og i skov under udsendelse af stærke klimagasser.

For eksempel kan en forgasningsløsning energiudnytte kulstoffet i restfraktionen fra biogasanlæg og halm fra landbruget med god effektivitet og lave emissioner og tilbagelevere koksholdig aske med tilgængelige næringsstoffer, men reduceret indhold af miljøfremmede stoffer, såsom medicinrester og tungmetaller.

Ved at bibeholde termiske anlæg og forsyne dem med forkoblede forgassere, vil de kunne spille ind i balanceringen af et energisystem med stigende andel fluktuerende produktionsteknologier som supplement til øvrige balancerings-teknologier som energilagring og netforbindelser til udlandet/andre markeder.

Partnerskabets studier af rammebetingelser og energiproduktionsomkostninger har vist meget attraktive scenarier med forkoblede forgassere, hvilket betyder, at der er god grund til, at Danmark og danske aktører bør satse på at demonstrere disse beskrevne muligheder og kvantificere værdien af de miljømæssige ydelser, sådanne anlæg kan levere.

3.4 Forgasningsbaseret Bio-SNG

Det danske naturgasnet er et aktiv i forhold til omstilling til 100% forsyning med vedvarende energi. Nettet kan benyttes til at distribuere grøn gas fremstillet centralt eller decentralt og indeholder desuden en lagerkapacitet, der kan balancere en fluktuerende produktion fra andre kilder.

Dette skal udnyttes i det fremtidige, danske energisystem. Her skal gassen være omdrejningspunktet for balancering af de fluktuerende forsyningsformer og ved hjælp af relativt billig kraftvarmekapacitet sikre elforsyningen, når udenlandsforbindelserne ikke kan levere eller prisen på elektricitet herfra er høj. I dette system benyttes kraftvarme på grøn gas efter behov - ikke som primær forsyning i el- og varmenet.

Skal gasnettet være fossilfrit, er der med Danmarks struktur behov for grøn naturgas fra mange kilder og teknologier, herunder både fra opgraderet biogas og metaniseret forgasningsgas. Brændselsmæssigt er der god sammenhæng mellem sporene, idet de termiske anlæg vil kunne tage sig af den del af kulstofbindingerne, der ikke omsættes i biogasanlæggene - fiberresten samt en række andre brændsler og restprodukter.

For at biogas og termisk forgasning kan få en afgørende rolle i det fremtidige danske energisystem, er det nødvendigt at lære af erfaringerne fra andre

lande og demonstrere bio-SNG-anlæg baseret på termisk forgasning med henblik på at opføre enkelte større anlæg i Danmark samt fortsætte den igangværende udbygning med biogasanlæg til fremstilling af opgraderet biogas. Med andre ord - der skal arbejdes for at opføre anlæg i Danmark.

Et medvirkende incitament til at opføre anlæg er, at der kan komme økonomi i beslutningen. Her har rammebetingelserne stor betydning. Aktuelt er der dansk statsstøtte til biogas, når det opgraderes og sendes på gasnettet. Der er ingen støtte til bio-SNG fra termisk forgasning, selvom brændslet er det samme og gassen har samme kvalitet og leveres samme sted. Forskellen bør snarest muligt fjernes.

3.5 Forgasning til flydende brændstoffer

Termisk forgasning er sammen med bl.a. biogas en nøgleteknologi til at sikre kulstof til VE-brændstoffer, som kan benyttes til den grønne omstilling af transportsektoren. Analyser af energisystemet i Danmark viser, at en stor del af energiforbruget til let vej-transport omkostnings-effektivt kan elektrificeres inden for de kommende årtier. Men selv med en meget kraftig elektrificering, vil der med stor sandsynlighed stadig være behov for brændstoffer til tung vej-transport, fly og skibstransport over lange afstande.

Selvom termisk forgasning i sig selv er udviklet til et relativt højt niveau, er der behov for en målrettet FUD-indsats for at gøre hele teknologiområdet modent til at realisere potentialet på mellemlangt sigt - efter 2030. Det gælder særligt forskning og udvikling indenfor rensning af produktgasser, så de bliver rene nok til at kunne benyttes i de efterfølgende brændstofprocesser, der fordrer rene input.

Også forgasningskoncepternes evne til at håndtere og omsætte restprodukter og affald skal videreudvikles således, at disse affaldsstrømme, der i dag forbrændes, kan indgå i fremstillingen af gas, brændstoffer eller elektricitet med høj virkningsgrad og muliggøre udnyttelse af lokale og regionale brændsler.

3.6 Forgasning i industrien

Med en stigende andel vind og sol i energisystemet forudses der udfordringer i forhold til omstillingen af højtemperatur-industriprocesser, som kræver en afbrænding af energitætte brændstoffer. Her kan termisk forgasning spille en afgørende rolle.

Der findes erfaringer i danske virksomheder, ligesom der er fokus på overgang fra fossile brændsler til biomasse og affald i virksomheder og hos myndigheder i udlandet - bl.a. i Sverige, der indfører kuldioxidafgift i industrien. Her har et stålværk og en leverandør af forgasningsanlæg indgået en aftale om levering af forgasningsanlæg til at levere gas til fremstillingsprocesserne, så stålet kan få et bedre miljømæssigt aftryk. Også i IEA Bioenergy er der fokus på, hvordan biomasse kan bidrage til omstilling af produktionserhverv.

Danske aktører bør følge udlandet tæt og selv demonstrere, hvordan biomasse kan afløse fossile brændsler i industrien.

3.7 Gasrensning

Som nævnt ovenfor er rensning af produktgassen alfa og omega for en efterfølgende avanceret udnyttelse af gassen til syntetisk naturgas, benzin, methanol, olier eller kemikalier. Danske virksomheder og universiteter har høstet gode erfaringer fra projekter og samarbejder i ind- og udland både med hensyn til fremstilling af benzin og methanol.

Der er fortsat behov for yderligere udvikling af gasrensningsteknologier, der er tilpasset biomasse-forgasningsgas. Særligt svovlbrinte er en udfordring, og metoder, hvor høje koncentrationer af svovlbrinten kan fjernes fra gassen ved høj temperatur, vil være meget fordelagtige for energibalancen i et samlet anlæg, hvor produktgassen skal bruges til katalytisk syntese af syntetiske brændsler.

3.8 Opskalering er vejen til billigere forgasningsanlæg

Der er mange anvendelser for forgasningsanlæg i mindre skala i Verden, men til de avancerede anvendelser som bio-SNG og flydende brændstoffer er der behov for så stor en mængde avanceret teknologi, at små anlæg ville blive alt for dyre. Et eksempel herpå er GoBiGas-anlægget i Göteborg. Det er derfor nødvendigt at bygge større anlæg, hvilket kræver, at forgasningsteknologien opskales.

I Danmark vurderes det, at anlæg med en indfyret effekt på 100-200 MW vil være en passende størrelse i forhold til indpasning i fjernvarmenet, tilvejebringelse af brændsler mv. De tre klassiske typer forgasningsteknologi - fixed bed, cirkulerende fluid bed og entrained flow forgasning byder forskellige fordele og begrænsninger. Hvor fixed bed byder på ren gas med begrænset rensningsbehov, er typen begrænset skalerbar. CFB skaleres nemt og er tolerant overfor variationer i brændslet, men har behov for avanceret gasrensning. En-

trained flow-typen er beregnet til store effekter, men kræver avanceret forbehandling af brændslet og sætter begrænsninger i hvorledes asken kan recirkuleres.

Danske aktører arbejder på koncepter, hvor der tænkes nyt, og hvor de bedste sider af de kendte teknologier kombineres således, at der kan udvikles tolerante anlæg, der har stor kapacitet uden at kræve avanceret forbehandling eller avanceret gasrensning. Denne lovende FUD-indsats er der al mulig grund til at fremme. Det bør indgå i overvejelserne, om kaskadekobling af flere, mindre enheder kan reducere behovet for opskalering.

Alle forgasningsanlæg har en kobling til et fjernvarmenet. Nogle af typerne har som hovedformål at levere elektricitet og varme ind til fjernvarme. For de store forgasnings- og procesanlæg til avancerede anvendelser af gassen er en kobling til fjernvarmenet for at nyttiggøre anlæggenes varmestrømme en unik dansk mulighed, der kan bidrage afgørende til økonomien. Men der er ikke så mange store fjernvarmenet i landet, så det er afgørende at være opmærksom på de tidsvinduer, hvor eksisterende anlæg, der leverer ind til fjernvarmeforsyningen er ved enden af deres levetid og nyinvestering dermed er mulig.

3.9 Forgasning og svære brændsler

Mange forgasningsanlæg er fokuseret på træbrændsler, der typisk fås ensartede og med forudsigelige og ukomplicerede fysiske og kemiske egenskaber.

Termisk forgasning af restprodukter fra landbrugsafgrøder eller sekundære ressourcer kan være mere udfordrende, men har store perspektiver både økonomisk, miljømæssigt og ressourcepolitisk og kan blandt andet føre til:

- et øget potentiale for energiproduktion fra termiske forgasningsanlæg
- reduceret udledning af drivhusgasser
- opsamling af værdifulde/miljøfarlige metaller og mineraler
- kulstofsekvistrering og jordforbedring
- reduceret jordforurening
- øget forsyningssikkerhed og
- reducerede risici i dansk jordbrug.

I dag udnyttes mange sekundære ressourcer, herunder spildevandsslam og husholdningsaffald, som forefindes i store mængder i det meste af verden, ikke optimalt med forurening, ressourcepild og dårlig økonomi til følge. Der kan derfor ligge en god forretning i denne branche.

Der findes positive danske anlægserfaringer med forgasning af fx halm, afgasset spildevandsslam, gyllefibre mv. i små og større forgasningsanlæg, og forskning indikerer, at der er et stort potentiale for, at området kan blive en både økonomisk, miljømæssig og politisk/strategisk gevinst i Danmark og i Verden på trods af, at der er behov for en omfattende indsats inden for forskning og udvikling for at nå i mål.

Der er behov for en tværfaglig indsats inden for forskning, udvikling og demonstration af termisk forgasning af sekundære ressourcer for at alle perspektiver i de forskelligartede brancher kan blive afdækket og koblet sammen på rette måde.

Eksempler på praktiske spor omfatter fortsat udbygning med fortrinsvis naturgasnet-tilsluttede biogasanlæg, men med fokus på "eksport" af separerede og termisk tørrede restfibre til termisk forgasning. Dette vil medføre:

- billigere biogasanlæg (og reduceret støttebehov)
- supplerende energiudnyttelse af brændslet
- billigere udbringning af biogasrestvæske
- billigere askebaseret regional omfordeling af fosfor og kalium
- reduceret udspredding af miljøbelastende indholdsstoffer og
- reduceret emission af lugt og stærke klimagasser fra markerne.

Et andet eksempel er forgasning af afgasset spildevandsslam, hvor energiindholdet udvindes og der fremstilles koks til jordforbedring og kapaciteten på eksisterende rådnetanke øges uden yderligere investering. Teknologien burde blive en integreret del af et spildevandsrensningsanlæg.

3.10 Energisystemintegration og teknologisamspil

Fordi termisk forgasning - fx i sammenkobling med biobrændstofanlæg hvor brint fra elektrolyse udnyttes - forbinder el-, fjernvarme-, og gassystemet, kan de potentielle gevinster, set fra et systemperspektiv, blive udnyttet effektivt. For eksempel kan fleksibel produktion af brint hjælpe til at balancere el-systemet mens overskudsvarme fra termisk forgasning kan udnyttes i fjernvarmenet.

Termisk forgasning er en nøgleteknologi til at realisere det danske potentiale for at konvertere en del af Nordsø-regionens elproduktion til højværdi brændstoffer. Desuden kan produktionen af brint i denne forbindelse fungere som en demand-side/forbrugsside fleksibilitets mulighed, som betyder at brint bliver produceret når elprisen er lav (pga. stor produktion fra vindkraft og sol),

og brintproduktionen stopper i situationer hvor elprisen er høj (når elnettet er presset, pga. lav produktion af vindkraft og sol)

En anden vinkel på samspillet med det danske energisystem kommer med såkaldte polygenerationsanlæg, hvor et forgasningsanlæg har mulighed for at levere flere forskellige produkter alt afhængigt af hvad energisystemet efterspørger. Produkterne kunne fx være effektiv kraftvarme når elprisen er høj og biobrændstoffer eller biokemikalier, når det blæser, og elprisen er lav. Gevinsten kommer fordi nøglekomponenter i et sådant anlæg kan få mange driftstimer dermed minimere omkostningerne.

Der findes mange muligheder for at kombinere teknologier og produkter, og FUD-midler bør dirigeres hen mod lovende koncepter.

3.11 Sammenfatning

Nedenstående figur sammenfatter de beskrevne handlingsbehov, der skal bruge termisk forgasning frem til at kunne bidrage bedst muligt til et fossilfrit energisystem i Danmark og være attraktive eksportteknologier til mange lande i verden.

Område	Handlingsbehov	Rolleliste
Teknologiudvikling generelt	Øge driftssikkerhed Reducere omkostninger Demonstrere synergier	Universiteter, udviklere, leverandører
Forgasning til kraftvarmeanlæg	Løse tilbageværende, tekniske udfordringer på eksisterende teknologi Rammebetingelser skal skabe tryghed i lang tid Fremme eksisterende teknologi fremfor nye koncepter Informere politikere bedre	Universiteter, udviklere, leverandører Myndigheder Støtteprogrammer Partnerskaber, brancheforeninger
Forgasning forkoblet kraftværk	Undersøge markedet i DK og udlandet Demonstrere synergier og værdisætte miljødelser	Rådgivere, udviklere, leverandører
Forgasningsbaseret bio-SNG	Demonstrationsanlæg i Danmark Undersøge pladser og tidsperspektiver for biobrændstoffabrikker Ligestille støtte til bio-SNG uanset teknologi og brændsel	Udviklere, leverandører Rådgivere Myndigheder
Forgasning til flydende brændstoffer	Forskning, udvikling og demonstration af gasrensning Demonstrere forgasning af restprodukter	Universiteter, udviklere, leverandører
Forgasning i industrien	Demonstrere forgasningsanlæg i industri Overveje incitamenter til at erstatte fossiler med VE i industriprocesser	Leverandører, industrivirksomheder Myndigheder
Gasrensning	Videreudvikling af gasrensningsteknologi - fokus på svovlforbindelser	Universiteter, udviklere, leverandører
Opskalering er vejen til billigere forgasningsanlæg	Undersøge pladser og tidsperspektiver for store forgasningsanlæg Forskning, udvikling og demonstration indenfor opskalering af kendte koncepter	Rådgivere Universiteter, udviklere, leverandører
Forgasning og svære brændsler	Tværfaglig forskning, udvikling og demonstration af termisk forgasning af sekundære ressourcer	Universiteter, udviklere, leverandører
Energisystemintegration og teknologisamspil	Udvikling og demonstration af teknologisamspil og polygeneration Modellering og planlægning af energisystemet med termisk forgasning	Universiteter, udviklere, leverandører Myndigheder og rådgivere

Bilag

Bilag indeholder strategibidrag fra aktørerne:

1. BioSynergi Proces ApS
2. Danish Fluid Bed Technology
3. Danmarks Tekniske Universitet - CHEC og MEK og Teknologisk Institut
4. Dansk Gasteknisk Center
5. Energinet og DTU Management
6. Frichs

Hertil en liste over strategikommentarer fra deltagerne i workshop 27. april 2017:

7. Udsagn fra workshop

Bilag 1 - Bidrag fra BioSynergi Proces ApS

	Dato: 14/12 2017
Notat	Projekt nr.: 1003 Henrik Houmann Jakobsen
Emne: Strateginotat – Forgasning til kraftvarme	

Indholdsfortegnelse

1. Forgasning som teknologi til kraftvarme.....	26
2. Biomasse som ressource	27
3. Biomasse skal bruges til kraftvarme	28
4. Vision og mission	31
5. Potentialer og barrierer	32
5.1 Potentialer	32
5.2 Barrierer.....	32
6. Referencer.	35

Forgasning som teknologi til kraftvarme

Der har i Danmark været forsket og udviklet i forgasning af biomasse til kraftvarmeproduktion i 30 år. Den langvarige indsats har kun resulteret i at to anlæg er kommet i drift mens fire fuldt etablerede anlæg, der teknisk set kunne have været i drift, er enten blevet taget ned igen eller lagt i mølpose.

Kraftvarmeanlæg med termisk forgasning i drift	Kraftvarmeanlæg med termisk forgasning opgivet af økonomiske årsager i fasen mellem opførelse og optimering til kommerciel drift	Kraftvarmeanlæg med termisk forgasning opgivet af forskelligartede årsager*)
Harboøre Varmeværk Skive Fjernvarme	TK Energis anlæg i Gjøl Weiss/Cowis anlæg i Hillerød BioSynergis anlæg i Hillerød	DONG Energys (Ørstedes) anlæg i Kalundborg

Tabel 1: Oversigt på anlæg med termisk forgasning i Danmark. Overordnede tekniske specifikationer på anlæggene kan findes i /7./.

*) Da DONG NBS indsnævrede sine aktiviteter forud for DONGs børsintroduktion /8/.

Det er et helt utilfredsstillende resultat for en relativ simpel teknologi, der har været kendt og anvendt for første gang i Danmark i starten af 1900-tallet /1./. Allerede dengang fandtes stationære anlæg, hvor gassen fra forgasning af træaffald blev udnyttet i gasmotorer på savværker.

Forgasning er endda en delproces i enhver forbrændingsproces i halm-og flisfyrede kedelanlæg. Af den årsag blev forfyr til forbrænding af træflis ofte kaldt for forgassere. Især svenske firmaer yndede den betegnelse. Forfyr blev især i 1970-80'erne installeret med en direkte tilkobling til enten nye eller eksisterende kedler. Slutforbrændingen af røggasserne foregår i kedlen, og slutproduktet fra forbrændingen i kedlen er varmt vand eller damp, så de samlede anlæg bliver rimeligt nok dog kaldt for flisfyringsanlæg.

I dette notat er begrebet forgasning reserveret som betegnelse for de typer forgasningsanlæg, som er i stand til at producere en brændbar produktgas med et så højt energiindhold, at den er direkte egnet til forbrænding i gasmotoranlæg. Dette kræver i praksis mindst en nedre brændværdi på ca. 4 MJ pr. normal kubikmeter produktgas.

Notatet pointerer at udfordringerne med at få forgasningsanlæg i drift i høj grad skyldes mangel på økonomiske muligheder samt tab af incitament (qua

rammebetingelser) hos aktørerne til at afslutte igangsatte udviklingsforløb. Det er ikke barrierer, som kan overvindes ved at udvikle helt nye forgasningsteknologier. Der er i stedet behov for at få skabt forudsætninger og energipolitisk vedholdende motivation og vilje til at videreudvikle og færdiggøre eksisterende forgasningsteknologier til kraftvarmeproduktion.

Biomasse som ressource

Biomasse er ligesom sol og vind indenlandske, vedvarende energiresourcer.

Der er mange former for fast biomasse som træaffald og affald fra landbrugsproduktion. Men hvad er affald og hvad kan udnyttes som biomasse?

Bilag 1 til *Bekendtgørelse om biomasseaffald* /2./ indsnævrer typerne af biomasse med en opstilling af 16 typer, der ikke kategoriseres som affald. Hvis en type af fast biomasse ikke optræder på listen skal den behandles som affald og bl.a. belastes med affaldsafgift ved bortskaffelse.

Blandt de nævnte typer på listen er rent træaffald fra f.eks. skovbruget og savværker samt halm fra landbruget med hensyn til mængde og tilgængelighed de mest betydningsfulde.

Fiskeri, skovbrug og landbrug tilhører gruppen af primære erhverv, som indfanger, dyrker, høster og forædler produkter fra den natur som omgiver os alle og som vi alle er del af.

Bortset fra relativt små tilplantede arealer med pilebevoksninger dyrker hverken skovbrug eller landbrug deres afgrøder med primært sigte på produktion af energi. Halm og træ er derimod biprodukter- restprodukter- som opstår ved dyrkning af skov- og landbrugets primære afgrøder.

Landbrugets kornproduktion medfører halm som restprodukt. Halmen skal bortskaffes fra arealerne før det er muligt at dyrke den næste afgrøde. Hvis halmen ikke afsættes til energi skal den nedmuldes eller bortskaffes på anden vis¹.

Samme problematik gør sig gældende ved skovdrift. Hovedprodukterne herfra er bl.a. træ til celluloseproduktion, bygningstømmer, møbelproduktion og

¹ Et generelt forbud mod halmafbrænding på markerne blev indført i slutningen af 1980'erne.

pyntegrønt samt en række andre gavntræ sortimenter. Effektiv skovdrift kræver skovpleje med bl.a. udrensning af ammetræer og tyndingstræ fra unge bevoksninger, samt bortskaffelse af hugstaffald ved gavntræ produktion. Det er ikke en mulighed blot at efterlade affaldstræet uberørt i skoven fordi det bl.a. vil blokere adgangen til at skove hovedprodukterne og forhindre gentilplantning af arealerne. Kvaset skal ryddes af vejen og eventuelt afbrændes på stedet. Afbrænding var en anvendt praksis før produktionen af brændselsflis i løbet af 1980'erne startede i skovbruget /3/.

For både skovbrugs- og landbrugserhvervet gælder således, at hvis ikke det er muligt at sælge restprodukterne, der fremkommer ved dyrkning af primære afgrøder, vil det medføre en omkostning eller en produktionsforringelse.

Den omkostning rammer især den enkelte jordejer eller producent, men mangel på afsætning af halm og træ rammer resulterer også en samfundsøkonomisk omkostning fordi det mindsker effektiviteten og udbyttet fra dyrkningen af nationens skov-og landbrugsarealer.

Fra et energiperspektiv tegnes hermed en interessant og ofte overset skillelinje mellem energi fra sol og vind sat overfor energi fra halm og træ:

Brug af sol og vind til energiproduktion har vi som samfund en mulighed for at udnytte. Men undlader vi at bruge sol og vind medfører det ikke nogen direkte omkostninger, som skal afholdes af hverken producenter eller samfund.

Brug af halm og træ til energiproduktion er en mulighed vi som samfund skal udnytte. Det er en forudsætning for et effektivt drevet dansk skov- og landbrug, at der findes afsætningsmuligheder for halm og brændselsflis. Manglende afsætningsmuligheder medfører omkostninger for både producenter og samfund.

Biomasse skal bruges til kraftvarme

Biomasse er en vedvarende, men samtidig begrænset ressource. Biomassen er vedvarende så længe der gennem ansvarlig drift sikres, at gentilplantning og vækst sker i mindst samme takt som biomassen udnyttes. Tilvækst og gentilplantning definerer samtidig grænsen for ressourcens størrelse.

Biomasse er tillige et effektivt brændsel til at fortrænge fossilt produceret energi og dermed levere en CO₂ besparelse.

Det helt centrale spørgsmål er derfor:

Hvordan kan biomasse udnyttes til at opnå den størst mulige CO₂ reduktion?

Til besvarelse af det spørgsmål benyttes to eksempler, et med og et uden forgasningsteknologi. For sammenligningens skyld er formålet i begge tilfælde kun at producere varme.

Produktion af produktgas fra forgasningsanlægget gør det muligt at bruge produktgassen i et energieffektivt gasmotoranlæg, der foruden varme også leverer mekanisk energi i form af en roterende aksel. Det åbner mulighed for blandt at producere elektricitet ved at tilkoble en elgenerator eller drive en anden mekanisk maskine.

Værdien af få omdannet noget af flisens energi til mekanisk energi i stedet for kun producere varme med et kedelanlæg illustreres ved sammenligning af følgende to eksempler. Der opnås større energieffektivitet ved at lade forbrændingen af biomasse starte i et forgasningsanlæg.

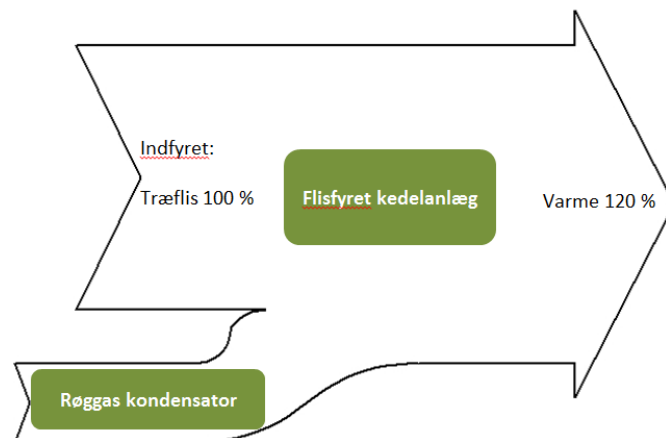
Eksempel 1. Flisfyret kedelanlæg med røggaskondensering.

Flisfyrede kedelanlæg med kondenserende røggaskøling til varmeproduktion er velkendte og udbredte som energianlæg på blandt andet mange fjernvarmewærker. På grund af energigevinsten fra røggaskondenseringen kan anlæggene opnå en årsvirkningsgrad på ca. 104-105 % målt i forhold til den nedre brændværdi for den anvendte, normalt våde, træflis.

Den teoretiske maksimale virkningsgrad – som omfatter den hypotetiske forudsætning at der overhovedet ikke optræder noget energitab fra anlægget² – kan defineres som forholdet mellem øvre og nedre brændværdi for træflisen.

For en typisk brændselsflis med 45 % vandindhold, våd basis, kan beregnes at forholdet mellem øvre og nedre brændværdi er ca. 1,20 / 5./. Det vil sige, at den teoretiske grænse for energiudnyttelse ved traditionel forbrænding af træflis er 120 % af energiindholdet i træet (bestemt ud fra nedre brændværdi).

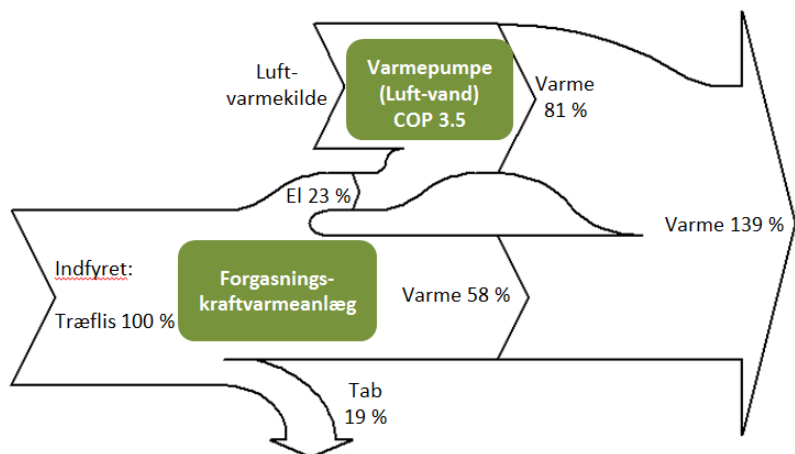
² Dette vil i praksis ikke være opnåeligt blandt andet fordi der altid vil være varmetab og energitab fra kedel, aske og ikke mindst med den vanddamp i røggassen, som ikke når at blive kondenseret.



Eksempel 1: Ved forbrænding af flis med 45 % vand i et flisfyringsanlæg med røg-gaskondensering er den teoretisk maksimale energiuudnyttelse ca. 120 %.

Eksempel 2. Flisfyret forgasningsanlæg til varmeproduktion via kraftvarmeproduktion og varmepumpe.

Hvis der til varmeproduktion med den våde træflis i stedet benyttes et forgasnings-kraftvarmeanlæg som producerer el til en varmepumpe, kan der opnås en betydelig bedre energiuudnyttelse end de ca. 104-106 % som konventionelle flisfyrede varmekilder i drift tilbyder. Endda væsentligt højere end den teoretisk mulige for et flisfyringsanlæg alene.



Til eksempel 2 er benyttet oplysninger fra /4./ og /6./.

Eksempel 2: Ved først at forgasse træflis til elproduktion med et gasmotoranlæg og derefter bruge elproduktionen i en luft-vand-varmepumpe bliver den samlede energiuudnyttelse 139 %.

Da eksemplet kun er tænkt som en illustration af den umiddelbare forøgede energieffektivitet ved at producere mekanisk energi, er ikke taget hensyn til de mulige ekstra udbytte ved at optimere systemløsningen. Eksempelvis er der med den viste løsning et dobbelt tab ved først at benytte en elgenerator til produktion og derefter en elmotor til forbrug af el. Det kan undgås ved i stedet at benytte mekanisk sammenkobling af gasmotoren og varmepumpens kompressor.

Med de to eksempler er illustreret, at energipotentialet i biomasse kan udnyttes langt mere effektivt end ved almindelig forbrænding når biomassen først forgasses og derefter udnyttes til drift af et gasmotoranlæg- eller med andre ord:

Biomasse skal anvendes til forgasning for at opnå den størst mulige CO₂ reduktion

4 Vision og mission

Vision

- Al omsætning af halm og træ i Danmark skal ske i forgasningsanlæg for at udnytte biomassens fulde potentiale til CO₂ reduktion.
- Etablering og drift af mange referenceanlæg med komplette dansk udviklede kraftvarmesystemer skal sikre global udbredelse og sikre vedvarende dansk vækst og industribeskæftigelse.

Mission:

- Det fremtidige energisystem skal indeholde mange energieffektive termiske forgasningsanlæg til kraftvarmeproduktion tilkoblet fjernvarmesystemet.
- Lokal kraftvarmeproduktion ved forgasning af biomasse er garant for lokale afsætningsmuligheder for indenlandske producerede biomasse-ressourcer og bidrager til:
 - * Lokal beskæftigelse.
 - * Mindre energiforbrug til brændselstransport.
 - * Mindre tab fra varmetransmissionsnet.
 - * Mindre tab fra eldistributionsnettet ved lokal elproduktion.
 - * Lokal udnyttelse af restprodukter.
- Forgasningsanlæg til kraftvarmeproduktion er den billigste og mest enkle anvendelse af produktgas fra forgasningsanlæg.
- Erfaringer fra praktisk drift af forgasningsanlæg til kraftvarmeproduktion skal afsnøre og afløse myter og teoretiske stereotype antagelser om forgasning med faktiske, veldokumenterede, valide driftserfaringer. Den heraf afledte videnopbygning hos myndigheder, planlæggere, forskningsinstitutioner mv. er en nødvendig trædesten til på

længere sigt at kunne benytte produktgas fra forgasningsanlæg til mere udfordrende og avancerede anvendelsesformer i f.eks. transportsektoren.

- I lighed med andre teknologier som ønskes fremmet på markedet- eksempelvis varmepumper- skal der ydes støtte til anlægsetablering og overvindelse af indkøringsvanskeligheder for forgasningsanlæg til kraftvarmeproduktion. Midler til forskning og teoretiske udredninger om mere avancerede anvendelser af forgasningsteknologien kan til gengæld nedprioriteres indtil et antal anlæg er kommet i drift og et større erfaringsgrundlag med drift af forgasningsanlæg foreligger.

5 Potentialer og barrierer

5.1 Potentialer

Der er intet der intet behov for at starte på udvikling af helt nye kraftvarmeknologier med forgasning. Det kan begrundes med at der jf. tabel 1 allerede eksisterer fire teknologisk forskellige kraftvarmesystemer, som alle har fungeret i mindre størrelse og derefter har lidt den tort at blive opgivet af økonomiske årsager efter at være opført i fuld størrelse.

Der er ingen teknologiske hindringer for at alle fire typer kan bringes til at fungere med kraftvarmeproduktion. Det har været mangel på økonomisk støtte til de første års ekstraordinære omkostninger til idriftsættelse og overvindelse af indkøringsvanskeligheder i samspil med tvivl om markedsmulighederne som har udgjort en fælles barriere for de fire projekter.

Udvikling af nye prisbillige forgasningskoncepter anses således ikke for en farbar vej til at opnå et gennembrud for kraftvarme med forgasningsteknologi. Eksempelvis kan nævnes, at omkostningerne til Biosynergi Proces' første fungerende forgasser til demonstration af konceptet var mindre end kr. 15.000 + frivilligt aftenarbejde over 3 måneder. Men selv det prisleje var ikke tilstrækkeligt til at sikre det samlede kraftvarmesystems økonomiske overlevelse.

Men heldigvis er der nok danske teknologier til rådighed at vælge imellem. De venter blot på politisk vilje til at blive fulgt helt til dørs.

5.2 Barrierer

Med opdateringen af EU's statsstøttere regler i 2014 jf. /7./ så statsstøttegodkendelser kun gives for 10-årige perioder, er der de facto sat en uovervindelig "show-stopper" for etablering af forgasningsanlæg til kraftvarmeproduktion.

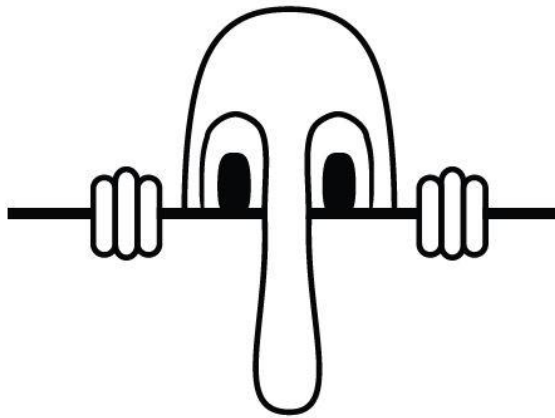
Argumentet for den påstand er, at en 10-årig horisont er så kort i forhold den tid det tager at myndighedsbehandle, etablere og tilbagebetale et anlæg. Selv hvis der træffes beslutning om anlægsetablering i det første år efter indførelse af en støtteregel, vil der reelt kun være udsigt til ca. 8 år drift med den tildelte støtte. Det er langt under en normal tilbagebetalingstid for et kraftvarmesystem, der har mindst 20 års levetid.

Den usikkerhed, som ligger i at statsstøttere reglerne skal genanmeldes til EU med risiko for ændringer udgør derfor en særdeles effektiv forhindring for købsbeslutninger hos private kunder til anlæg.

Der eksisterer dog også flere sekundære barrierer, men det er egentligt uden relevans at gå i dybden med dem, med mindre der findes en politisk modus vivendi til at eliminere skadevirkningen af den indførte ændrede praksis af EU's statsstøttere regler.

Af sekundære barrierer skal derfor kun kort opremses:

- Bortset fra få undtagelser mangler der specifikke regler og vejledninger for myndighedsbehandling af forgasningsanlæg. Beslutning om regler og krav til bygningsindretning, brandsikkerhed mv. er dermed lagt ud til den enkelte kommunale forvaltning, der ikke er bekendte med termiske forgasningsanlæg.
- Gastekniske projektgodkendelser foregår efter regler i Gasreglementet. Det tager udgangspunkt i ren tør metangas, der har et betydeligt højere energiindhold og andre forbrændingsegenskaber end forgasningsgas. Opfyldelse af gasreglementets regler fører til overdimensionering og uhensigtsmæssig indretning af anlægskomponenter til forgasningsanlæg. Specifikke regler for forgasningsgas vil øge sikkerheden og kunne reducere anlægsomkostninger.
- FUD indsatsen i danske energiprogrammer fokuserer meget på støtte til opstart af nye forsknings- og udviklingsaktiviteter, men fejler når det kommer til demonstration af de udviklede teknologier. Dette er fatalt når nye energisystemer skal i drift på markedet. Det lille, nu nedlagte ForskVE program hos Energinet.dk var det eneste programområde som reelt støttede til idriftsættelse af nye energiteknologier.



"Strandet på kanten op fra dødens dal" er desværre blevet mantraet for danske forgasningsprojekter til kraftvarme.

Det mantra kan kun begraves med politisk vilje og en vedholdende indsats, der skal sikre, at allerede igangsatte udviklingsprojekter faktisk kommer i drift.

6 Referencer.

1. Gasgeneratorer : Elektricitet : Supplement til Automobilets Haandbog. Redigeret af P.A.F. Norup. 1942.
2. BEK. nr. 84 af 26/01/2016 (Biomassebekendtgørelsen) Bekendtgørelse af biomasseaffald. Miljø-og Fødevareministeriet.
3. Skovteknik'80. Dansk Skovforening. København 1979
4. Fjernvarmen nr. 7/2017. Data fra artikel: Sig går foran med luft til vand-varmepumpe. (Dansk Fjernvarmes magasin).
5. Typisk forbrændingsberegning for træ med 45 % vandindhold, Gengas Consult ApS.
6. ForskEl pr. nr. 1-0025. Energinet.dk Delrapport til projektet: *"Forberedelse af fuldskala demonstration af trinopdelt forgasningsanlæg"*. Udarbejdet af BioSynergi Proces ApS, 2011.
7. Rammebetingelser for termisk forgasning. Udarbejdet for Partnerskab for Termisk Forgasning. EA Energianalyse. 2017.
8. Mailkorrespondance med Peder Stoholm, DFBT, april 2018.

Bilag 2 - Bidrag fra Danish Fluid Bed Technology

d. 20/2 2018

Bidrag fra DFBT til strategi for termisk forgasning (WP3)

Afklarende spørgsmål og svar med fokus på anvendelse af fortrinsvis indenlandske fyringsteknisk vanskelige og/eller næringsstofholdige organiske restproduktstrømme til "on-demand" –regulerbar og (exergetisk) effektiv kraftvarme i økonomisk rationel større skala.

Der fokuseres her på elforsyningen, der antages at være det vigtigste og sværeste for opnåelse 100 % VE, idet; a) el effektivt kan distribueres og konverteres til andre energiformer, b) varmebehovet i betydelig grad vil kunne dækkes af div. typer restvarme (herunder regulerbart fra termiske kraftvarmeværker!) og vha. varmepumper/elvarme, og c) bio-brændstoffer til bl.a. den vanskeligt elektrificerbare transport kan fremstilles på flere måder, som - formentlig med fordel - vil kunne suppleres med import.

Nærmere bestemt søges følgende vigtige spørgsmål besvaret:

1. Er der behov for elproduktion baseret på biomasse og affald?
2. Er adgang til egnet biomasse og affald væsentlig?
3. Bør biomasse og affald ikke i høj grad reserveres til vigtigere formål end termisk kraftvarme?
4. Er det muligt at opnå en stor elproduktion pr kg biomasse i både central og decentral skala?
5. Kan el-produktionen effektivt reguleres efter behovet?
6. Bør og kan brændslernes indhold af næringsstoffer recirkuleres som jordforbedringsmiddel?
7. Er den forkoblede forgasser interessant for opnåelse af en stor klimaeffekt pr kg biomasse?
8. Er større forkoblede forgassere et økonomisk koncept?

1. Er der behov for elproduktion baseret på biomasse og affald? (Er det bedre end at nøjes med brændselsfri men rigeligt fluktuerende el fra vind og sol, for så i stedet fuldt ud at etablere forsynings sikkerheden vha. el-udveksling med udlandet, intelligent/fleksibelt forbrug og energilagring)? Svar: **Ja, fordi:**
 - a. En stor og formentlig dominerende andel el fra fluktuerende vind og sol er utvivlsomt nødvendig, idet biomasse og affald langt fra rækker til 100 % VE. Der kan endda med økonomisk

fordel etableres en fluktuerende (peak-)overkapacitet set i forhold til det gennemsnitlige el-effektforbrug for således at kunne: dække hele el-forbruget en større del af tiden, producere til (det mest fornuftige) fleksible forbrug og lagring samt tjene på el-eksport når muligt. En for stor fluktuerende kapacitet vil dog let blive uøkonomisk grundet hyppig dårlig udnyttelse (inkl. stoppede anlæg, unødigt store lagringstab og eksport til for lave priser).

- b. Vi kan formentlig komme langt med fleksibelt forbrug, der dog vil være begrænset af div. ulemper. F.eks. er det vanskeligt at flytte på det store el-forbrug til madlavning, ligesom hyppige og/eller langvarige "brown-outs" vil være forbundet med store ulemper for de berørte el-forbrugere.
- c. Alle kendte indenlandske former for el-til-el lagring - og især langtidslagring - er meget dyre og/eller tabsbehæftede. Mest økonomisk er det, hvis effektive el-lagre fyldes og tømmes med høj frekvens (f.eks. dagligt) og når lageret også tjener andre formål (f.eks. batterier i net-tilsluttede elbiler og delvist udtjente el-bilbatterier anvendt til afstivning af svage grene af el-nettet). Lagring over længere tid, - herunder især sæsonlagring - er langt dyrere og behæftet med store tab.
- d. Naturgasnettet byder på meget stor kapacitet til langtidslagring, hvilket bør nyttiggøres, men metan frembragt ved både biologisk forgasning, termisk forgasning og som elektrofuel vil være dyr og bør derfor i høj grad reserveres til de mest "ædle" formål, så som tidsmæssig snæver spidslast/back-up, procesindustri og ikke-elektrificerbar transport.
- e. Udveksling af el med udlandet er vigtig for udnyttelsen af især fluktuerende produktion, men transmissionslinier (inkl. bag grænserne i vore nabolande) er dyre, ligesom der i store tidsrum vil være sammenfald af mangel/rigelighed landene imellem. Denne begrænsning vil vokse efterhånden som også udlandet etablerer større fluktuerende produktion. Endelig har udbygningen af det internationale transmissionsnet også den (for os i DK) negative konsekvens, at vi i voksende grad vil skulle "dele" adgangen til den nordiske vand- og pumpekraft med andre nordeuropæiske lande.
- f. Hvis vi ønsker en fortsat høj el-forsyningssikkerhed er vi derfor nødt til at etablere en regulerbar indenlandsk produktionskapacitet, der - til en hver tid - kan dække en stor del af forbruget, - dvs. ekskl. tidsmæssig snæver spidslast baseret på lagring og et på forhånd overvejet og accepteret omfang af "brown-outs".
- g. Især når back-up kapacitet i form af on-demand producerende kraftvarmeværker således "alligevel" behøves, er det

samlet set mest fornuftigt, at sådanne værker ikke blot står stand-by, men gives en fornuftigt driftstid (f.eks. 5000 timer/år), idet en betydelig del af den mindst økonomiske fluktuerende kapacitet + relateret lagring og noget dyr og ineffektiv spidslastproduktion derved kan spares.

- h. Når en væsentlig del af især de større byområders varmebehov således fortsat dækkes med restvarme fra kraftvarmeværker, kan der ikke blot opnås en meget mere sikker flerstrengt varmeforsyning, men også spares på udgifterne til "afstivning" af el-nettet.
- i. I stedet for dyr og tabsbehæftet langtids el-til-el -lagring kan tør/tørret biomasse og affald billigt og næsten tabsfrit langtidslagres og anvendes på termiske kraftvarmeværker, der kan køre op til ca. 110 % last i mangelsituationer og herunder både i nogle få daglige timer og "24/7" .
- j. Den marginale el-produktionsomkostning på et (i fremtiden) eksisterende biomassefyret kraftvarmeværk vil være langt lavere end for især langtids-"lagret" el. Dette skyldes ikke blot, at el-lagringskoncepterne er investeringskrævende, men også at den fluktuerende kapacitet også vil skulle dimensioneres for dækning af lagringstab.
- k. Ellers overskydende produktion opfattes ofte som nær gratis, men etableringen af den mest hyppigt overskydende kapacitet kunne jo også fravælges, ligesom der næppe vil være nogen kommercielle producenter, der vil levere energi til lagring til en pris, der er lavere end hverken markedsprisen eller produktionsomkostningerne. Hvis der leveres alligevel vil det være pga. af subsidier som jo er en udgift for samfundet.
- l. Som yderligere berørt i det følgende, er termisk udnyttelse af organiske restproduktstrømme også interessant på grund af perspektiver i retning af; a) recirkulation af termisk oprensede næringsstoffer, b) billigere (ligeledes askebaseret) regional omfordeling af lokalt overskydende næringsstoffer, c) undgåelse af emission af (også) stærke klimagasser fra bakteriel nedbrydning af organisk materiale "under åben himmel", d) varig og selvforstærkende jordbundsforbedring baseret på "biokoks", e) tilsvarende varig og selvforstærkende "bioCCS", f) minimering af "klimagæld" ved anvendelse af restprodukter hydrørende fra fortrins unge afgrøder og g) indtægter til brændselsleverandører i bl.a. økonomiske yderområder og tilsvarende reducerede udgifter til brændselsimport. Især samlet set kan værdien af ovennævnte "sidegevinster" vise sig meget betydelige set i forhold til værdien af det opnåede VE-forsyningsbidrag

- m. - som - også grundet "on-demand" regulerbarhed – vil være langt mere værdifuldt end et tilsvarende (back-up-/lagring-skrævende) fluktuerende bidrag, - og hvorfor det er stærkt misvisende, når kWh-produktionspriser alligevel ofte sammenlignes "direkte"
- n. – og derfor vil det også være en stor misforståelse at lave teknologineutrale udbud, der ikke tager hensyn til, hvorvidt det tilbudte behøver eller yder back-up.

-

2. Er adgangen til egnet biomasse og affald væsentlig? Ja, fordi:

- a. De indenlandske brændselsressourcer omfatter bl.a. træaffald, overskudshalm, organisk husholdningsaffald, spildevandsslam, husdyrgødning, presserest fra produktion af plan-teolier, samt div faste restprodukter fra bl.a. fødevare- og medicinalindustrien.
- b. Sådanne restprodukter kan – efter evt. fornøden afvanding og tørring – udnyttes direkte eller i form af ufuldstændigt omsatte restfibre fra forudgående biologiske processer og herunder biologisk forgasning
- c. Der kan suppleres med et bæredygtigt/fornuftigt omfang af div. dyrkede energiafgrøder,
- d. Flere undersøgelser har vurderet, at den samlede bæredygtigt og med fornuft opnåelige indenlandske bio-brændsels- og affaldsressource er i omegnen af 250 PJ/år.
- e. Især hvis anvendelsen tænkes koncentreret på mangelsituationer indenfor tidsrum svarende til f.eks. halvdelen af årets timer, kan der i et sådant afgrænset tidsrum blive tale om et dominerende forsyningsbidrag, herunder i form af en elproduktion svarende til mere end 200 PJ (= det dobbelte 100 PJ fordelt over hele året).
- f. Der kan formentlig suppleres med oprenset, sediment fra søer og vandløb samt med div. andre organiske restprodukter fra søer, fjorde og havområder,
- g. Både træ-brændsler og andre bio-brændsler som de ovennævnte kan supplerende importeres.

3. Bør biomasse og affald ikke i høj grad reserveres til vigtigere formål end termisk kraftvarme? Nej, fordi:

- a. En stor kontrollerbar elproduktion er meget vigtig som ryg-stød til et mindst ligeså stort fluktuerende bidrag (jf. pkt. 1), ligesom termiske kraftvarmeværker byder på såvel ligeledes regulerbar varmeproduktion som en række andre vigtige "sidegevinster" (jf pkt 1.l og senere)
- b. Der er ikke udsigt til, at store mængder el - teknisk og politisk sikkert samt økonomisk fordelagtigt vil kunne hentes til DK fra

f.eks. solrige egne nær ækvator og især ikke med tids-mæssig snæver fokus på mangelsituationer.

- c. Brændstoffer til vanskelig transport, snæver spidslast/back-up, procesindustri, mv. vil - i formentlig i tilstrækkelig omfang og til fornuftige priser - ikke blot kunne opnås fra termisk forgasning/pyrolyse af dansk biomasse/organiske restprodukter), men også fra/i form af:
- Biologisk forgasning af dertil mest velegnede produkter som gylle/husdyrgødning og div. våde/flydende fedt- og sukkerholdige restprodukter
 - Mere eller mindre færdigfremstillede biobrændstoffer fra store udenlandske skovområder (hvor store mængder proces-restvarme kan anvendes til tørring mv.), som på langt mere energitæt form end især træflis kan transporteres og oplagres på forsyningssikkerhedsskabende tankanlæg i DK.
 - Elektrofuels baseret på ellers overskydende el fra "vind og sol" i DK
 - Elektrofuels baseret på meget billig solcellestrøm nær ækvator
- d. Anvendelse af biomasse til andre primære formål end kraftvarme, - så som biologiske processer, presning, ekstraktion, ... vil typisk "levne" nogle - stadig energiholdige - restprodukter, der så - "serielt" - kan udnyttes til kraftvarme.

4. Er det muligt at opnå en stor elproduktion pr kg biomasse i både central og decentral skala? Ja, idet:

- a. El-virkningsgrader på op til ca. 50 % vil fremadrettet kunne opnås ved direkte indfyring af - (typisk) fyringsteknisk uproblematisk og næringsstoffattig - træpiller i større (>200 MW el) kraftvarmeværker med overkritiske dampdata.
- b. Imod accept af en blot 10 - 15 % reduceret elproduktion kan der fleksibelt opnås en samtidig produktion af fjernvarme på mindst samme niveau som den således reducerede elproduktion.
- c. De største af de eksisterende (oprindeligt kulfyrede) kraftværksblokke kan - trods en del år på bagen - allerede nu nyttiggøre træpiller næsten lige så effektivt.
- d. Træpiller er et relativt dyrt og i høj grad importeret brændsel, men hvis ovennævnte fremtidige og eksisterende større træpillefyrede kraftvarmeværker "forkobles" én eller flere parallelle brændselsfleksible og askeseparerende lavtemperaturforgassere, kan en væsentlig del af forbruget af træpiller fortrænges af brændbar gas produceret ved termisk forgasning af fyringsteknisk vanskelige og/eller næringsstoffrige organiske

indenlandske restprodukter som halm, biogasrestfibre og spildevandsslam, - der således kan nyttiggøres næsten ligeså effektivt som de fortrængte træpiller.

- e. Knap så høje men stadig attraktive el-virkningsgrader kan opnås i mere moderat (mellemstor) skala, idet ovennævnte direkte og indirekte indfyring af hhv. træbrændsler og vanskelige/mere næringsstofholdige restprodukter foretages i kraftvarmeværker med underkritisk og/eller på anden måde simple dampkredse.
- f. På basis af forbrændingsmotorer (og evt. brændselsceller) kan tilsvarende el-virkningsgrader og restvarmeudnyttelse også opnås i markant mindre decentral skala. Dette via dertil egnede termiske forgasserere med mere effektiv og tjærekrakende gasrensning. Især til sådanne mindre anlæg er træbrændsler generelt bedst egnede pga. simple brændselsmodtagelse og askehåndtering, samt adgang til relativt simple træ-forgassere, der mere økonomisk kan udføres i mindre skala.
- g. Især på tørre/tørrede biologisk tungt omsættelige biobrændsler som træ og halm opnås typisk markant højere el- og varmeproduktion ved anvendelse i termiske frem for biologiske anlæg. Dog er positive synergieffekter påvist ved tilførsel af en mindre andel halm til gyllebaserede biogasanlæg, men der til synes det oplagt fortrinsvis at benytte halm, der (uheldigvis) er blevet vådt, ligeledes fugtig dybstrøelse o.l.
- h. For bl.a. at reducere behovet for dyr forbehandling og reaktorpholdstid på biogasanlæg og for at øge den samlede energieffektivitet, kan der foretages separation og termisk tørring af biogasrestfibre, der sendes videre til termisk forgasning på effektive og næringsstofrecirkulerende kraftvarmeværker.

5. Kan el-produktionen effektivt reguleres efter behovet? Ja, fordi:

- a. Store træfyrede kraftvarmeanlæg kan hurtigt reguleres indenfor et bredt lastområde, medes en evt. forkoblet lavtemperaturforgasser også hurtigt kan reguleres, men dog kun indenfor et mere begrænset område (over 70-80 % last), hvilket dog er uproblematisk i de tilfælde, hvor forgaserens indfyrede effekt er lille i forhold til kedlens indfyrede effekt.
- b. Hvis der ønskes en relativ stor forgasningsbaseret indfyret effekt kan denne opdeles på to eller flere parallelle forgassere, der startes og stoppes én af gangen.
- c. Både kedlen/dampkredsen og den evt. forkoblede forgasser vil – når fornødent – kunne køre over 100 % last og især vil forgasseren kunne køre kraftig overlast, såfremt et forhøjet

indhold af uomsat kulstof ("biokoks") i asken ønskes eller kan accepteres.

- d. Der vil være mulighed for hurtige start og stop i perioder med behov for f.eks. blot én eller to gange daglig drift a blot 2-3-4 timer. Dette ved varmholdelse af såvel dampkredsen som den forkoblede lavtemperaturforgasser. Til varmholdelse af dampkredsen kan benyttes (ellers) overskydende fluktuerende el-produktion, medens (den velisolerede og internt ukølede) forgasser – selv efter stilstand i flere dage – kan genstartes efter få minutters passivering (med f.eks. N₂) og derefter blot ved tilførsel af først luft, så brændsel og så (evt. fornøden temperaturmodererende og yderligere koksomsættende) vand/vanddamp
- e. Når behovet er forskudt imod el kan produktion af fjernvarme enten helt undlades og/eller en reduceret mængde restvarme kan akkumuleres i dertil egnede varmelagre
- f. Når behovet er forskudt imod levering af fjernvarme kan dampudtag fra turbinen øges til det maksimale niveau, ligesom yderligere (og stadig exergetisk effektiv) forskydning i mod levering af fjernvarme kan opnås ved tilføjelse af store ("centrale") varmepumper på/nær kraftvarmeværket.
- g. I sær i årets varmeste måneder kan kraftvarmeværkerne helt stoppes og afkøles, idet hele el- og varmebehovet typisk vil kunne være dækket af "vind og sol".

6. Bør og kan brændslernes indhold af næringsstoffer recirkuleres som jordforbedringsmiddel? Ja, fordi:

- a. Organiske restproduktstrømme indeholder værdifulde næringsstoffer, - herunder kalium og særligt ressource-kritisk fosfor - der bør recirkuleres til fortrinsvis områder med mangel på og tolerance overfor disse næringsstoffer. (Se vedr. kvælstof til sidst i dette afsnit).
- b. Regional omfordeling af især – ofte lokalt overskydende – fosfor kan billigt foretages, når på kompakt og hygiejnisk askeform. Derved elimineres også lugtgener og risikoen for spredning af sygdomsskim.
- c. Næringsstofrige brændsler vil kunne indfyres via en lavtemperaturforgasser, hvorfra der separeres aske fra (typisk primært) en varm gasrensende cyklon og (typisk sekundært) i form af evt. udtaget bundaske.
- d. Askens gødningsværdi vil kunne forbedres ved termisk samforgasning af f.eks. kaliumholdigt halm med mere fosforholdige biogasrestfibre og/eller spildevandsslam

- e. Ved foraskning ved lav og velkontrolleret temperatur undgås en sintring af asken, der ville gøre næringsstofferne væsentligt mindre plantetilgængelige
- f. En række miljømæssigt problematiske indholdsstoffer så som medicinrester, hormonlignende stoffer og mikroplast nedbrydes effektivt og ved passende varm separation af asken, kan det undgås, at bl.a. (forholdsvis flygtigt) cadmium og tunge tjærestoffer (inkl. giftige polyaromater) separeres sammen med asken. Også lettere tjærestoffer føres videre til kedlens fyrrum som en brændbar del af produktgassen, medens cadmium opkoncentreres i en mindre askestrøm separeret efter kedlen
- g. Efter sekundær cyklonen kan der evt. tilbageholdes yderligere aske, og især hvis filtertemperaturen ønskes begrænset, er det i så fald en fordel, at dannelsen af tunge tjærestoffer (med højt dugpunkt) begrænses af lavtemperaturforgasserens hurtige pyrolyse ved lav og velkontrolleret temperatur
- h. Der arbejdes også med metoder, der kan tænkes benyttet til separation af tungmetaller fra kedlens filteraske, eller til ekstraktion af næringsstoffer, hvorved også næringsstoffer indeholdt i direkte indfyrede træbrændsler vil kunne nyttiggøres.
- i. Endelig kan termisk processering indrettes på at give asken et væsentligt indhold af (stort set ikke biologisk nedbrydeligt) "biokoks", hvorved kulstof fra atmosfæren effektivt kan deponeres i dyrkningslaget, samtidig med at især grovsandede jorde opnår en varig strukturforbedring, der gør jorden bedre til at holde på vand og næringsstoffer. Dette endda selvforstærkende, idet rodmaterialer, der - "af sig selv" - trænger dybt ned i jorden – bidrager til dannelse af (bl.a.) humus og således et endnu mere kulstofholdigt og frugtbart dyrkningsslag. Mere om bl.a. biokoksens virkning fremgår her: http://orbit.dtu.dk/files/123702160/Biokul_og_jordens_frugtbarhed.pdf , hvor et særdeles tydeligt og visuelt resultat i retning af øget såvel top- som rodvækst fremgår af dias nr. 13.
- j. Dertil kommer perspektiverne i retning af undgåelse af emission af (også) stærke klimagasser samt (ligeledes) selvforstærkende kulstofdeponering ("bioCCS"), som omtales i det følgende afsnit.
- k. Især våde/væskeformige restprodukter som gylle/husdyrgødning indeholder også store mængder kvælstof i form af -dels effektivt plantetilgængeligt ammonium-kvælstof og dels organisk bundet kvælstof. Sidstnævnte udnyttes væsentlig mindre effektivt af planterne, og er i højere grad anledning til emission af lattergas samt genstand for problematisk udvaskning, hvorfor det er interessant, at der ved biologisk forgasning kan

opnås en omdannelse (også kaldet "mineralisering") af organisk bundet kvælstof til ammonium kvælstof. Dette er én af flere årsager til, at det - især for "allerede våde" produkter - kan være interessant at fortage en - idet mindste kortvarig - biologisk forgasning, hvorefter hovedparten af også organisk bundet kvælstof vil optræde som ammonium-kvælstof og derfor blive forskudt imod restvæsken ved efterfølgende separation og tørring af (P- og K-rige) restfibre til supplerende termisk energiudnyttelse. Evt. tab af gødningsegnet kvælstof er dog ikke et problem på niveau med tab af især fosfor, idet den ved termisk udnyttelse "tabte" kvælstof, - forholdsvist billigt og ikke-ressource-begrænset - kan genskabes industrielt.

7. Er den forkoblede forgasser interessant for opnåelse af en stor klimaeffekt pr kg biomasse? Ja, idet:

- a. Kraftvarmeværkets høje (exergetiske) effektivitet medfører stor fossil fortrængning pr kg anvendt biomasse
- b. Ved foraskning af forekommende organiske restproduktstrømme undgås emission af (også) stærke klimagasser som følge af bakteriel nedbrydning på marker, i skove og i deponier. (Selv uudnyttede skove bliver med tiden klimabelastende, idet ved-tilvæksten går i stå og dødt materiale nedbrydes af først svampe og så bakterielt.)
- c. Asken fra den forkoblede forgasser vil typisk indeholde en væsentlig mængde uomsat kulstof, også kaldet "biokoks". Da biokoksen stort set ikke er biologisk omsættelig (f.eks. finder arkæologer trækul fra slukkede bål tusinde år senere), kan den benyttes til effektivt at deponere kulstof i landmændenes dyrkningslag, dvs. til såkaldt "bioCCS".
- d. Især for grovsandede jorde er det således påvist, at selv blot en mindre tilførsel af biokoks vil kunne gøre jorden markant mere frugtbar, hvilket formentlig primært skyldes, at tilførslen af relativt fine kokspartikler gør jorden bedre til at holde på vand og næringsstoffer. Konsekvensen medfører således ikke kun et øget potentiale for produktion af fødevarer (og f.eks. endnu mere halm til kraftvarme), men også at afgrøderne danner et større og dyberegående rodnet, som - sammen med en evt. efterladt stub - bidrager til dannelse af (bl.a.) yderligere jordforbedrende og kulstofbindende humus.
- e. Metoden og således opnået selvforstærkende "bioCCS" harmonerer godt med tendenserne i landbruget til (bl.a. dieselbesparende og kulstofbevarende) reduceret jordbehandling, idet kulstofdannende materiale (og mad til regnormene) således i stedet finder dybt ned i jorden "af sig selv" og uden forbrug af dieselolie og uden unødigt iltning af dyrkningslaget.

(Adderingen af biokoks kan foretages med mange års mellemrum og endda nok også blot én gang for alle.)

- f. Askens indhold af biokoks kan let og regulerbart øges, for prioritering af sådan selvforstærkende "bioCCS" samt opnåelse af mere frugtbar landbugsjord. For energianlæggets ejer betyder produktionen af biokoks dog, at der – for en given energiproduktion – skal indkøbes mere brændsel, hvorfor levering af biokoksrig aske næppe vil blive prioriteret, med mindre landbruget gives tilstrækkelige økonomiske motiver til at betale (ekstra) for biokoksholdig aske.
- g. Udslip af den stærke drivhusgas metan forekommer stort set ikke fra kraftvarmeværket.
- h. Summen af det ovennævnte betyder, at fyring med f.eks. 1 ton tør overskudshalm på de tilsigtede exotergetiske effektive og biokoksproducerende termiske kraftværker vil medføre i omegnen af tre gange større klimaeffekt set i forhold til tilførsel af halmen til et typisk biogasanlæg. Heraf skyldes en faktor to en effektivitetsbetinget ca. dobbelt stor fossil fortrængning. Hvis der regnes med fortrængning af kul i stedet for naturgas vil klimaeffekten snarere være omkring 4 gange større.
- i. I forhold til kun biologisk forgasning af våde produkter, vil der – af de ovennævnte årsager - også kunne opnås en markant forøget klimaeffekt ved ("seriel") termisk forgasning af separerede og tørrede biogasrestfibre. Dette ikke mindst hvis biogasanlægget supplerende tilføres tungere omsættelige produkter og/eller der spares på forbehandlingen og/eller reaktorpholdstiden.

8. Er større forkoblede forgassere økonomiske?: Ja, idet:

-

- a. Tilføjelse én eller flere forkoblede forgassere til større træfyrede kraftvarmeværker medfører en række økonomiske fordele og herunder:
 - Fordele af stor skala og herunder mulighed for højeffektiv dampkreds
 - Mulighed for substituering af forholdsvis dyre træbrændsler med halm og endnu billigere lokale restprodukter
 - Mulighed for at vælge importerede brændsler i tilfælde af år med reduceret adgang til overskudshalm og hvis prisen på lokale brændsler bliver for høj, når store mængder efterspørges
 - Mulighed for indtægter ved salg af næringsstof- og koksrig aske

- b. Tilføjelse af en 64 MW (indfyret) forkoblet lavtemperaturforgasser til en af de tilbageværende store kraftværksblokke blev af DONG Energy vurderet som værende en positiv business case, hvilket bl.a. fremgår af den første artikel i: <http://www.biopress.dk/PDF/fib-nr.-50-december-2014>
- c. På det givne tidspunkt kunne der - til sådan termisk forgasning - forudsættes en støtte på 43 øre pr/kWh, hvilket svarer til kun ca. 1/3 af den nu opnåelige støtte til biologisk forgasning.
- d. Ovennævnte positive vurdering var på trods af en anlægsstørrelse i den nedre ende af det med forgasseren tilsigtede størrelsesområde og på trods af, at det ville være det første kommercielle anlæg af sin art.
- e. Desværre betød den positive vurdering, at det måtte forventes at være nyttesløst at søge et demonstrationsprojekt fremmet vha. af EU-støtte (NER-300), idet et evt. støttetilsagn kun ville komme til udbetaling i tilfælde af, at der - imod forventning - ville kunne dokumenteres et underskud.
- f. I 2017 fremkom EA-Energianalyse med denne rapport: http://www.forgasning.dk/sites/default/files/pdf/Rammebetingelser_termisk_forgasning_WP4_17.pdf, hvori der - sidst i kapitel 7 - vises resultater af LCOE-beregninger for tilføjelse af en ca. 100 MW forkoblet forgasser til et større (bl.a. i år 2030) eksisterende kraftvarmeværk. Kraftvarmeværket forudsættes som udgangspunkt (100 %) fyret med enten fugtig træflis eller træpiller på hhv. et varmeprioriterende og et (exergetisk) høj-effektivt værk. Forudsætningerne for den 3. søjle i figur 16 svarer til sidstnævnte tilfælde, der bedst afspejler det primære sigte med lavtemperaturforgasseren, nemlig samfyring med halm på højeffektive værker, - hvor den meget varme overheder i høj grad friholdes for halmens indhold af (forud separerede) - korrosive stoffer. Den lille mørke cirkel, - der opsummerer de i søjlen viste indtægter og udgifter ekskl. (viste) tilskud - viser, at der beregnes en negativ LCOE, dvs. at tilføjelsen af forgasserende til det eksisterende anlæg er en positiv forretning selv uden tilskud! (Flere yderligere forudsætninger og forbehold fremgår af rapporten).
- g. Hvis der konservativt og forenkende ses bort fra afvigelsen fra det beregnede overskud, bliver "forretningen" lig med kWh-støtten. Hvis denne f.eks. sættes til 1 kr/kWh el, er det simpelt at beregne, at et anlæg, der - med f.eks. en gennemsnitlig el-virkningsgrad på 0,4 - kører de i beregningerne forudsatte 5000 timer/år vil indtjene: 1 kr/kWh x 5000 timer/år x 0,4 - x 100.000 kW = 200 mio. DKK/år, eller det halve, hvis støtten reduceres til 0,50 kr/kWh. (Sættes støtten derimod op

til den aktuelle for el-producerende biogasanlæg opnås væsentligt mere end de anførte 200 mio.kr/år.)

- h. Når selv en så overbevisende økonomi åbenbart ikke virker tilstrækkeligt tillokkende, kan det bl.a. skyldes at de aktuelle – desværre kun midlertidige - støtteregler ikke giver en investor fornøden sikkerhed for, at støtten vil blive opretholdt ud over den tid, det vil tage at beslutte og bygge anlægget. Blandt investorerne i ydelsesmæssigt mindre enhedsstørrelser svarende til kun få MW (som f.eks. biogasanlæg) er der formentlig en berettiget tro på, at politikerne vil "holde hånden under" især allerede realiserede anlæg, medens samme optimisme har sværere kår i en (kraftvarme-)branche, der pt nyder mindre folkelig og politisk opbakning og hvor meget større enhedsstørrelser ville medføre tilsvarende store og derfor mere "synlige" støtteudbetalinger pr anlæg. Der er med andre ord brug for en initierende støtte, der kan være på et afdæmpet niveau, men så til gengæld noget investorerne kan stole på
- i. I ingen af de to ovennævnte økonomiberegninger, er der regnet med indtægter fra salg af næringsstof- og/eller biokoksholdig aske. Sandsynligheden for opnåelse af sådanne mærkbare indtægter må formodes at vokse i takt med, at landbruget ser behov for eller fordele af; 1) at undvige (forventeligt) voksende priser på importeret P-K-gødning, 2) askebaseret regional omfordeling af lokalt overskydende næringsstoffer for beskyttelse af vandmiljøet, 3) forbedring af dyrkningslaget baseret på tilførsel af biokoks, 4) undgåelse af emission af stærke klimagasser fra efterladt/udspredt organisk materiale, 5) "bioCCS" baseret på biokoks
- j. Der findes desværre ingen samlet økonomisk vurdering af et større fremtidigt (nybygget) træfyret kraftvarmewærk med forkoblet lavtemperaturforgasser
- k. Specielt er det et problem, at scenarieanalytikerne overser denne mulighed, fordi den ikke har været omfattet af Energi styrelsens "Teknologikatalog". Lavtemperaturforgasseren og to – primært størrelsesmæssigt afvigende – træ-støv fyrede kraftværksblokke findes hver for sig i kataloget, men ikke kombineret, hvorfor den forkoblede forgasser desværre ikke kommer i betragtning ved Balmorel-systemmodellering.
- l. Bedømt ud fra, at "bio-scenariet" var det billigste af de fire VE-scenarier, der blev gennemregnet som led i Energistyrelsens scenarieanalyser fra 2013, er der grund til at formode, at der ville have kunnet beregnes et endnu billigere "bio-" scenarie, hvis den forkoblede lavtemperaturforgasser havde været en valgbar option. Dette ikke mindst, hvis inkluderende en

værdisætning af ikke blot el- og varmeproduktionen, men også de store sidegevinster i retning af recirkulation af næringsstoffer, dyrkingslagsforbedringer baseret på biokoks og særlig stor CO₂-reduktion som følge af såvel reduceret emission af stærke klimagasser og "bioCCS"

- m. Hvis man (i højere grad end scenarieanalytikerne) tillader sig at betragte samfundsøkonomien nationalt, gør det også en stor forskel, at lavtemperaturforgasseren vil tillade en storstilet anvendelse af pt. dårligt udnyttede indenlandske organiske restprodukter, som f.eks. halm, fremfor importerede træbrændsler.
- n. Specielt ville der være økonomiske fordele i brændselsleverende økonomiske yderområder.

Anbefalinger til udviklingsstrategi på forgasningsområdet (WP3 -partsindlæg fra DFBT):

- Bevarelse af en stor andel (exergetisk) effektiv og "on-demand"-regulerbar termisk kraftvarme i især de større fjernvarmenet, og dertil:
- - nyttiggørelse af lokale bortskaffelseskrævende biobrændsler og organiske restprodukter, -også for; a) undgåelse af udvikling stærke klimagasser fra bakteriel nedbrydning, b) nedbringelse af behovet for import af typisk dyrere træbrændsler, og c) tilførsel af indtægter til brændselsleverandører i bl.a. Danmarks økonomisk trængte yderområder - og dertil:
- - videreudvikling, demonstration og videre opskalering af den aktuelle forholdsvis simple, men meget økonomiske, brændselsfleksibilitetsgivende, næringsstofoprensende og potentielt biokoksproducerende version af den termiske lavtemperaturforgasser, - samt:
- - udbygget samspil med såvel planteavlere som jordbrugsforskere om at målrette, optimere og dokumenterer lavtemperaturforgasserens bio-koksholdige aske anvendt som effektivt kulstofdeponerende jordforbedringsmiddel.
- Videreudvikling af den termiske lavtemperaturforgasser i retning af mere krævende anvendelser, - f.eks. forudsættende højeffektiv partikelseparation, produktion af pyrolyseolie og transportbrændstoffer, - som supplement (men ikke alternativ!) til fortsættelse af ovennævnte indsats.
- Videreudvikling af mindre men ligeledes effektive og "on-demand" – regulerbare motorbaserede kraftvarmeanlæg også til restprodukter fra skovbrug, -som typisk forudsætter mindre brændselsfleksibilitet, billigere brændsels- og askehåndtering, reducerede hensyn vedr. (beskedent) indehold af næringsstoffer og enklere automatisering.

- Fortsat udbygning med fortrinsvis naturgasnet-tilsluttede biogasanlæg, men med fokus på "eksport" af separerede og termisk tørrede restfibre til termisk lavtemperaturforgasning. Dette for billiggørelse af biogasanlæg (inkl. reduceret støttebehov), supplerende energiudnyttelse, billigere udbringning af biogasrestvæske, billigere askebaseret regional omfordeling af P og K, reduceret udspredding af miljøbelastende indholdsstoffer og reduceret emission af lugt og stærke klimagasser fra markerne.
- Såvel termisk som biologisk forgasning bør målrettes det, teknologierne er de bedste til, og hvor biologisk forgasning er bedst til kvælstofudnyttende decentral udnyttelse (/indledende processering) af meget våde/væskeformige restprodukter (inkl. tilsvarende decentral logistik) samt til produktion af CH₄ til naturgasnettet, medens forkoblet termisk forgasning på især de større kraftvarmeværker effektivt kan nyttiggøre separerede og termisk tørrede biogasrestfibre og er langt den mest energi- og klimateffektive samt økonomiske løsning til (i det mindste hovedparten af) den store tørre halmressource.
- Mulighederne for opnåelse af en hurtig (evt. forceret) og økonomisk overgang til højere VE-andel bør ikke hæmmes af krav om en samlet mindre hensigtsmæssig disponering af de til rådighed værende danske bio- og affaldsbrændsler til produktion af flydende transportbrændstoffer o.l. Det er formentlig mere hensigtsmæssigt at satse på øget elektrificering af transporten, og at afvente muligheder for, fremstilling af elektro-brændstoffer på (ellers) overskydende el fra "vind og sol", import af færdigfremstillede træbaserede biobrændstoffer og/eller brændstoffer baseret på billig solcelle-el nær ækvator. (Det udelukker ikke, at danske virksomheder, udvikler og leverer noget af den dertil nødvendige teknologi.)
- Det er en verserende misforståelse at sammenligne prisen på el fra "on-demand" –regulerbar kraftvarme med billig men fluktuerende el fra "vind og sol", idet førstnævnte snarere bør sammenlignes med prisen på lagret "vind og sol" (inkl. udgifter til energitabskompenserende ekstra "vind og sol").
- Det bør nyttiggøres at tørre/tørrede og således lagerfaste organiske restprodukter billigt og næsten tabsfrit kan langtids- og endda sæsonlagres for bl.a. således om nødvendigt at kunne holde termiske kraftvarmeværker i gang 24/7 (og på 110 %?) last i perioder med utilstrækkelig "vind og sol". Dette er langt mere effektivt og formentlig også billigere end et tilsvarende omfang af især langtids- "el-til-el" lagring.
- Der bør planlægges i forventning om voksende elpriser i tidsrum med stort elforbrug og/eller lav produktion fra vind og sol. Dette pga. voksende fluktuerende forsyningsandel, udestående fossil og nuklear ud-fasning, udsigt til markant voksende elforbrug og øget "klimabekymring".

- Udviklingen af el- og varmeforsyningen bør gives øget sigte på at skabe et forbedret grundlag for forøgede fluktuerende forsyningsbidrag fra "vind og sol", herunder for begrænsning af behovet for dyr og tabsbehæftet "el-til-el" –lagring. Dertil er der ikke kun behov for effektiv og regulerbar kraftvarme og bio-naturgas, der kan lagres i naturgasnettet, men også øget fleksibelt elforbrug til bl.a. varmepumper og el-baseret transport
 - Politikerne bør gøres opmærksomme på, at det ellers er samfundsøkonomisk og forsyningssikkerhedsmæssigt problematisk, yderligere at substituere regulerbar fossil forsyning med fluktuerende forsyning. – Og på, at termisk processering – også uanset energibehovet! - er nødvendig for en miljøbeskyttende og næringsstofrecirkulerende disponering af forekommende organiske restproduktstrømme.
-

- Partnerskabet bør fortsættes, men fremadrettet være mindst ligeså fokuseret på kraftvarme, recirkulation af næringsstoffer og reduceret klimabelastning, som på mere avancerede gas-anvendelser og herunder produktion af gas til naturgasnettet.

Bilag 3 - Bidrag fra Danmarks Tekniske Universitet og Teknologisk Institut

Potentialer og videreudvikling af biomasseforgasning

Indholdsfortegnelse

Termisk forgasning af sekundære ressourcer	51
Stor-skala forgasning af biomasse: status og muligheder	54
Indpasning i det danske energisystem	58
Synergier med andre teknologier	60
Status på termisk forgasning –katalytisk gasrensning:.....	63

Termisk forgasning af sekundære ressourcer

Af Biomasseforgasningsgruppen på DTU Kemiteknik og DTU Mekanik

Termisk forgasning af sekundære ressourcer har store perspektiver både økonomisk, miljømæssigt og ressourcepolitisk og kan blandt andet føre til et i) forøget potentiale for energiproduktion fra termiske forgasningsanlæg, ii) reduceret udledningen af drivhusgasser, iii) kulstofsekvistrering og jordforbedring, iv) reduceret jordforurening, v) øget forsyningssikkerhed og vi) reducere risici i dansk jordbrug.

Sekundære ressourcer omfatter restprodukter og diverse affaldsfraktioner og i dansk sammenhæng vil det for eksempel inkludere kornafrens, gyllefibre, biogasfibre, spildevandsslam, kød- og benmel, fiskeslam, KOD (kildesorteret organisk dagrenovation) og RDF (refused derived fuels). Udvalg, mængder og kvalitet af sekundære ressourcer varierer med geografi og demografi, og mens der er visse danske sekundære ressourcer som stort set ikke findes andre steder, er der andre – heriblandt både spildevandsslam og husholdningsaffald, som kan findes i store mængder i det meste af verden.

Mange sekundære ressourcer udnyttes i dag suboptimalt med forurening, resourcespild og dårlig økonomi til følge, og prisen på blandt andet slam og af-

fald er derfor oftest lav, nul eller endda negativ. Dette kan være et fremragende udgangspunkt for en god business case, og samtidig indeholder disse ressourcer ofte en betydelig mængde økonomisk og/eller politisk værdifulde mineraler og metaller som i optimerede systemer kan gavne både den miljømæssige, økonomiske og ressourcemæssige bundlinje.

Forskning i termisk forgasning af sekundære ressourcer har givet mange indikationer af at der er så store potentialer og så mange muligheder indenfor dette område at det med stor sandsynlighed kan blive en både økonomisk, miljømæssig og politisk/strategisk gevinst på trods af den omfattende forskning og udvikling der er påkrævet for at nå i mål hermed.

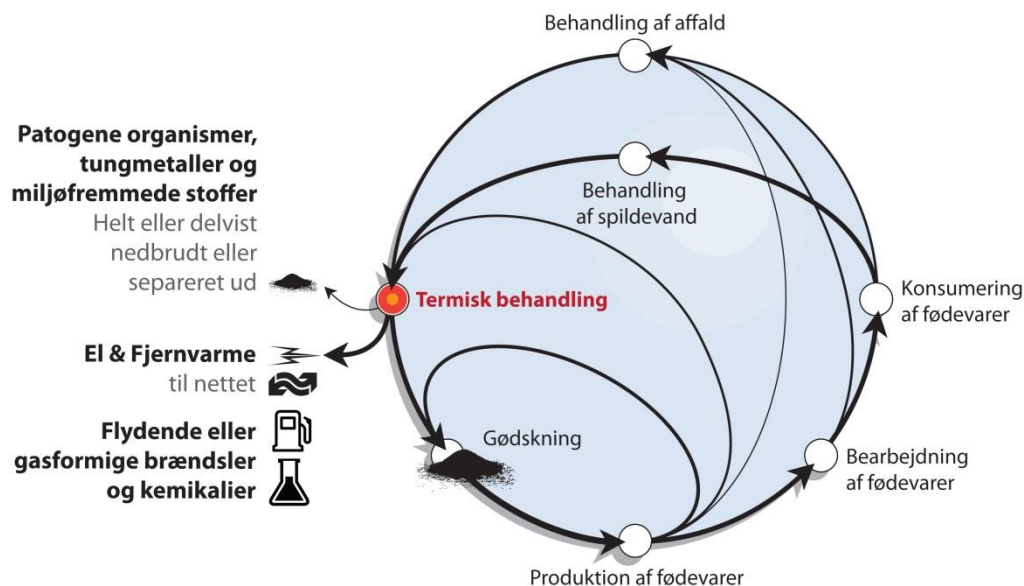
En del af disse gevinster kan direkte opgøres i en øget ikke-fossil energiproduktion. Det samlede energipotential i sekundære ressourcer i Danmark er ikke gjort op, men i spildevandsslam, biogasfibre og gyllefibre alene vurderes det at der er et potentiale på op imod 50 PJ. I systemer med fjernvarmeproduktion vil denne energi kunne udnyttes med meget høj virkningsgrad til samproduktion af brændstoffer, el og varme på trods af det høje vandindhold. I dag bringes meget af dette materiale direkte ud på landbrugsjord da disse ressourcer også indeholder vigtige næringsstoffer. Udover tabet af energipotential medfører denne praksis lugtgener, lokale emissioner af CO₂, metan og lattergas, dyr og besværlig opbevaring og transport, samt risiko for jordforurening og utilsigtede cocktaileffekter som følge af et højt indhold af tungmetaller og/eller organiske miljøfremmede stoffer (f.eks. medicinrester, mikroplast, flammehæmmere, ftalater og UV-filtre). Udvikling og implementering af termisk forgasning skal i denne sammenhæng målrettes imod drift-stabilitet og robusthed, udnyttelse af energien, sikring af høj gødningskvalitet i aske/koksprodukter og oprensning af tungmetaller og organiske miljøfremmede stoffer. Design af optimerede systemer til dette formål er derfor en balancegang mellem de nævnte effekter og vil kræve et indgående kendskab til hele processen.

Der vil også være eksisterende systemer hvor termisk forgasning kan være et reelt alternativ til nuværende praksis hvor energien i de sekundære ressourcer måske udnyttes men væsentlige og værdifulde elementer går tabt. Dette er tilfældet når f.eks. spildevandsslam eller kød- og benmel brændes i cementproduktion. Det vigtigste enkelt-næringsstof at sikre i denne sammenhæng er fosfor (P). Fosfor er uerstattelig og uundværlig i alle dyrkningssystemer og der er et enormt flow af fosfor igennem Danmark på grund af vores overskudsproduktion af fødevarer, og specielt animalske fødevarer. Dette flow gør dansk

økonomi sårbar overfor fluktuationer og stigninger i fosforprisen og gør dansk miljø sårbar overfor forringelser i kommerciel fosforgødningskvalitet. Der er udbredt enighed om at mens prisen på fosforgødning i fremtiden vil stige og stige vil kvaliteten gøre det modsatte. Dette skyldes en eksplosion i det globale fosforforbrug, begrænsede kendte fosforressourcer og store geopolitiske udfordringer i fordelingen af de globale fosforressourcer. Dette har blandt andet ført til at fosfor har været på EU's liste over kritiske ressourcer siden 2014 og der bliver taget stadig større og dyrere initiativer til at reducere importen af fosfor.

En sammenfatning af hvordan termisk forgasning af sekundære ressourcer kan spille en stor rolle i samtidig energiodnyttelse og sikring af fosfor er givet i Figur 1.

Termisk forgasning af sekundære ressourcer understøtter teknologiens generelle berettigelse i en cirkulær økonomi. Udover det kritiske fosfor og andre værdifulde mikro- og makronæringsstoffer er der også potentiale i at sikre genindvinding og genanvendelse af andre værdifulde metaller – heriblandt forskellige tungmetaller, som med den rette behandling kan koncentreres i forskellige aske-, filter- eller kondensatprodukter fra den termiske forgasningsproces.



Figur 1 - En illustration af hvordan termisk forgasning af sekundære ressourcer kan bruges til både at øge produktionen af ikke-fossil energi og samtidig reducere forureningen og øge sikkerheden ved recirkulation af værdifulde næringsstoffer, heriblandt fosfor.

For at nå i mål med effektiv termisk forgasning af sekundære ressourcer kræves der en massiv forsknings- og udviklingsindsats. Dette arbejde spænder

bredt over mange fagligheder og succes vil kræve et indgående og tværfagligt kendskab til brændselskarakteristika, termisk procesdesign, produktoptimering og slutanvendelsen af både aske og energiprodukter. Succes vil kræve fokuseret forskning i brændselsdesign og i sammenhænge mellem brændselsdesign, termisk procesdesign, efterbehandling af aske og gas produkter og endelig slutanvendelsen af både aske og energiprodukter. Det er både en mulighed og en udfordring at der findes så mange forskellige sekundære ressourcer som kan blandes og forbehandles til en myriade af forskellige brændsler og at dette kan kombineres med mange forskellige anlægsdesigns, drift-indstillinger samt efterbehandlings- og anvendelsesmuligheder. Det vil kræve både anvendt- og grundlæggende teoretisk forskning at undersøge hvordan brændsler dannet af sekundære ressourcer bedst designes og omsættes for at optimere både den termiske proces og slutprodukternes kvalitet og kvantitet.

Potentialet for både økonomisk- og miljømæssig gevinst ved termisk forgasning af sekundære ressourcer er stort i Danmark, men endnu større i mange andre dele af verden hvor mængden og diversiteten i de sekundære ressourcer er større. Intensiveret forskning og udvikling indenfor dette område kan derfor både give nationale fordele og gode muligheder for at eksportere både teknologi og viden og bidrage til den globale grønne omstilling og cirkulære økonomi.

Stor-skala forgasning af biomasse: status og muligheder

Af Biomasseforgasningsgruppen på DTU Kemiteknik og DTU Mekanik

Det ønskes generelt at bygge stor-skala forgasningsanlæg, da der herved kan muliggøres en række fordele, der vil resultere i bedre driftsøkonomi. Den primære fordel er, at den specifikke pris generelt falder for komponenter og processer, hvilket direkte forbedrer økonomien og/eller muliggør mere effektivt og fleksibelt udstyr der indirekte fører til en forbedring. Stor-skala anlæg har derfor typisk både højere virkningsgrader og brændselsfleksibilitet.

Som udgangspunkt, bør forgasningsanlæg skaleres op til 100-200MW_{th}, set som et kompromis i mellem fjernvarmemarkeder, logistiske hensyn for biomasse og prisreduktion ifbm. skalering. Erfaringer fra biomassekraftværker har f.eks. vist at elvirkningsgrader er steget med 50-100% ved opskalering fra <10MW_{th} til >100MW_{th} og at specifikke håndterings og forbehandlingsomkostninger falder med ≈50% for skalering fra 50MW_{th} til 100MW_{th}. Potentialet for stor-skala anlæg er derfor essentielt for at opnå optimal udbredelse af teknologien, specielt med henblik på produktion af biofuels (bio-metanol og bio-SNG).

Status for forgasningsanlæg

Den dominerende type forgassere er simple og relativt effektive fixed bed-anlæg, som primært er medstrømsanlæg med $<1\text{MW}_{\text{th}}$ (indfyret LHV) kapaciteter. Disse bruger næsten udelukkende træflis eller –piller. Denne teknologi er dog meget begrænset inden for disse skala- og brændselsrammer pga. de grundlæggende betingelser for geometri og proces, der kræver meget høje temperaturer, snæver geometri og veldefineret brændsel. Medstrømsanlæg er blevet videreudviklet via trindeling af processen (adskillelse af pyrolyse og forgasning), hvilket har muliggjort kapaciteter op til $\approx 10\text{MW}_{\text{th}}$, yderligere mindsket behovet for gasrensning og muliggjort meget høje virkningsgrader. Fixed-bed anlæg kan dog skaleres yderligere hvis der anvendes modstrømsanlæg, der forventes at kunne skaleres til mellem $25\text{--}100\text{MW}_{\text{th}}$ baseret på erfaringer med kul. Udfordringen med modstrømsanlæg er rensning af meget tjæreholdig gas, der typisk kræver flere trins rensning og potentielt efterlader et spildevandsproblem.

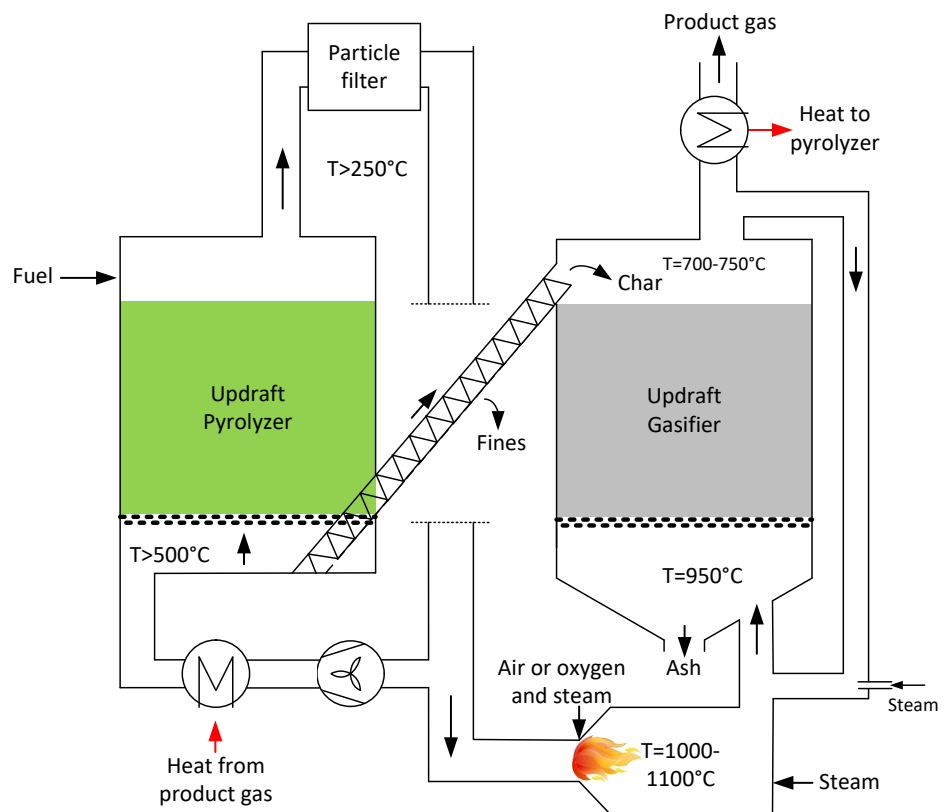
Et større antal fluid bed-forgassere er i drift i den ønskede $100\text{--}200\text{MW}_{\text{th}}$ -størrelse. Disse anlæg er særligt eftertragtede for biomasseapplikationer, da de med deres høje processtyring og grundlæggende fysiske virkemåde har stor brændselsfleksibilitet - både ift. partikler og askesammensætninger. Koldgas-virkningsgraden er typisk sammenlignelig med effektive fixed bed-anlæg. Skaleringspotentialet er ligeledes fordelagtigt og projekteres typisk til adskillige hundreder af MW_{th} , grænsende til GW_{th} -størrelse ved tryksætning og høj mixing. Udfordringen med fluid beds er primært gasrensning, der typisk er meget kompleks og kræver typisk 1-2 trin med katalysatorer og derefter scrubbere, samt en række hensyn der besværliggør konvertering. Dette gør anlæggene relativt komplekse og typisk begrænser brugen til brændsler med højt askesmeltepunkt som træ.

Entrained flow forgasning er demonstreret i GW_{th} -skala og er en relativt velkendt teknologi. Disse anlæg anvender design i stil med suspensionsfyrede kraftværker, der via meget høje temperaturer muliggør total tjærekonvertering og brug af brændsler med lave askesmeltepunkter. Virkningsgraderne er i stil med nuværende fluid bed data, men er stærkt begrænset af de høje driftstemperaturer og kompleks forbehandling af brændslet, der kun kan anvendes i pulverstørrelse. En anden og meget essentiel slagside er, at brændselsasken tages ud som slagge, der umuliggør recirkulering af næringsstoffer og udvinning af mineraler/stoffer.

Muligheder og videre forskning

Herunder følger en række forskningsbaserede forslag til løsninger på ovenstående identificerede problemer. Entrained flow forgasning vurderes som havende begrænset udviklings- og bæredygtighedspotentiale og er derfor ikke taget i betragtning. Fælles for løsninger herunder er, at det vurderes at anvendt proof-of-concept forskning i pilotstørrelsesanlæg bør være fokusområde videre frem.

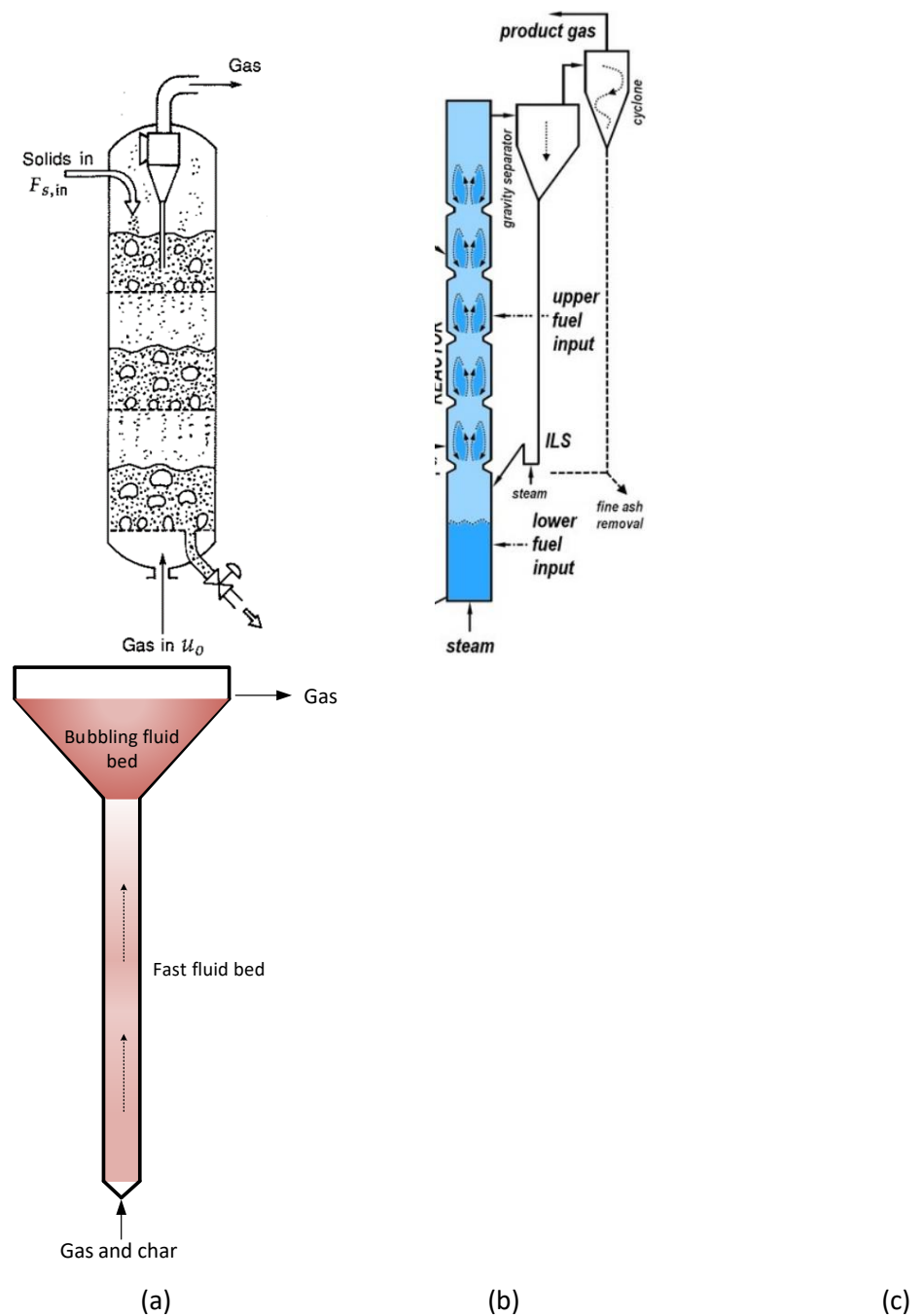
Fixed bed-forgassere bør kunne kombinere modstrømsreaktorens skaleringspotentiale med den trindelte modstrømsreaktors effektivitet og tjærekonvertering. Herved kan der anvendes modstrømsreaktorer med en partiel oxidation ind i mellem, hvilket vil muliggøre skaling op til $25\text{--}100\text{MW}_{\text{th}}$, næsten komplet tjærekonvertering og meget høj virkningsgrad. Nylig forskning fra DTU har påvist at et sådan koncept kan opnå koldgasvirkningsgrader op til 93% i et relativt simpelt design som vist på Figur 1. Konceptet er udviklet med henblik på at producere en høj kvalitets syn-gas der kan anvendes til katalytisk syntese af bio-fuels.



Figur 1 – Flow diagram og design temperaturer for trindelst modstrømsforgasning udviklet på DTU.

Fluid bed-teknologi er meget attraktiv og der kan fremadrettet tænkes i to spor ift. udvikling af tjærerens: Ny-tænkning af proceskoblinger eller videre udvikling af katalysatorsporet. Koblinger til fluid beds kan tænkes at anvende løsninger lignende dem fra fixed bed-anlæg, med simplificering af gasrens i øje. Herved kunne de adskillige trindelte fluid beds (LT-CFB, FICFB, MILENA etc.) f.eks. omkonfigureres således, at pyrolysegasserne udsættes for partiel oxidation og koksreaktoren fluidiseres med denne. Ved at anvende varmen i den oxiderede gas kan virkningsgraden fortsat være høj eller blive endnu højere, samtidig med at tjæren konverteres og katalysatorer potentielt helt kan afskaffes. Modeller fra DTU har vist at en sådan type anlæg vil kunne opnå koldgasvirkningsgrader op til 87%, kan designes så både træ og halm kan anvendes og opnå meget høj tjærekonvertering ved partiel oxidationstemperaturer som er $\geq 1200^{\circ}\text{C}$. Denne løsning bygger på relativt simple principper og design, men skal gennemtænkes ift. at undgå agglomering og samtidig opnå høj tjærekonvertering og effektivitet.

Fastholdes ønsket om at bruge katalysatorer og at arbejde videre med de nuværende teknikker, kan fluid bed-forgassere også undersøge mulighederne for at øge gas-partikelkontakten i reaktorerne. Den relativt høje tjærekoncentration fra fluid beds skyldes nemlig i høj grad en ringere kontakt sammenlignet med fixed beds. Kan kontakten mellem katalysator og tjære øges, kan anlæggene formentlig simplificeres eller billiggøres. Eksempler på diverse reaktordesigns fra forskningen og industrien kan ses på Figur 2. Herved kunne man tvinge tjærefyldt gas igennem en række boblende beds (a), opblande fribordet med en høj partikelkoncentration (b) eller kombinerer fluidiseringsregimer således, at den høje grad af mixing fra hurtig fluidisering kombineres med den høje kontakt fra langsom fluidisering (c).



Figur 2 – Fluid bed reaktordesign: (a) Tridelt boblende fluid beds, (b) Boblende fluid bed med øget opblanding af gas- og partikelfase i fribordet (c) Hurtig-til-boblende fluid bed.

Indpasning i det danske energisystem

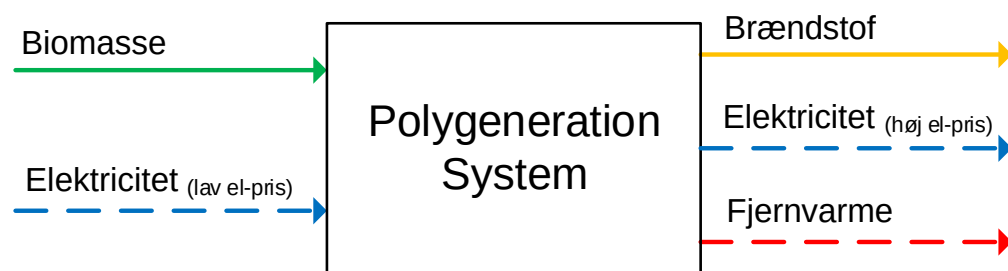
Af Biomasseforgasningsgruppen på DTU Kemiteknik og DTU Mekanik

Termisk forgasning kan spille en vigtig rolle i det danske energisystem, idet termisk forgasning tilbyder en fleksibel og effektiv platform som kan opfylde

en række behov – både nutidige og fremtidige. En forgasser kan således bygges i dag med det formål at producere høj-effektiv kraftvarme, men vil senere kunne tilpasses således at forgasningsgassen i nogle perioder eller permanent bruges til produktion af biobrændstoffer eller biokemikalier. Denne fleksibilitet er yderst relevant for et energisystem som det danske, der har en grøn målsætning som inkluderer en udbygning af specielt vindkraft. Når vinden blæser kan gassen fra forgasseren bruges til produktion af biobrændstoffer til transportsektoren, men når vinden ikke blæser og der er en høj elpris, så kan gassen bruges til høj-effektiv kraftvarmeproduktion. Sådanne fleksible anlæg kaldes også for polygeneration anlæg, idet de kan producere flere forskellige produkter alt afhængig af markedets behov.

Polygeneration og ellagring

Ved kombination af termisk forgasning af biomasse med fastoxid celler som både kan fungere som brændselsceller (SOFC) eller elektrolyseceller (SOEC) kan der etableres et ekstremt fleksibelt og højeffektivt energisystem. Hvis el-prisen er høj kan fastoxid cellerne operere som en SOFC og omsætte forgasningsgassen til el og varme, hvis el-prisen er lav kan fastoxid cellerne operere som en SOEC og omsætte grøn strøm fra vindmøller til brint som kan iblandes forgasningsgassen og omsættes til brændstof til transportsektoren – se Figur 3. Anlægget kan dermed udføre el-lagring efter behov hvilket kan sikre den fortsatte udbygning med vindkraft samt udføre en indirekte elektrificering af transportsektoren som er relevant for den tunge transport samt fly og skibstrafikken, idet disse dele af transportsektoren er vanskelige at elektrificere direkte.



Figur 3 – Polygeneration koncept

Et sådant anlæg vil have en række interessante karakteristika:

- Høj-effektiv kraftvarmeproduktion der meget hurtigt kan rampes op og ned for at følge el- og varmebehovskurver
- Høj-effektiv el-lagring i form af brændstofproduktion til transportsektoren
- Flexibilitet. Både i relation til valg af output (elektricitet eller brændstof) og input (biomasse og elektricitet).

- Maksimal udnyttelse af biomasseressourcen, idet næsten alt kulstof i biomassen kan omsættes til brændstof hvis anlægget er i el-lagringsdrift.
- Høj udnyttelse af de anvendte anlægskomponenter. Forgasseren og fast oxid-cellerne vil være i konstant drift. Det er kun omsætningen af gas til brændstof som skal starte og stoppe efter behov.

For at polygenerationsanlæg baseret på termisk forgasning med eller uden elektrolyse kan realiseres er der behov for yderligere forskning og udvikling inden for termisk forgasning med fokus på brug af gassen til forskellige formål inkl. demonstration af polygenerationsanlæg. Denne forskning, udvikling og demonstration af teknologien kombineres med fordel med systemstudier på både nationalt og anlægsniveau for at sikre at udviklingen går imod høj-effektive og fleksible anlæg som matcher behovet for det fremtidige danske energisystem.

Synergier med andre teknologier

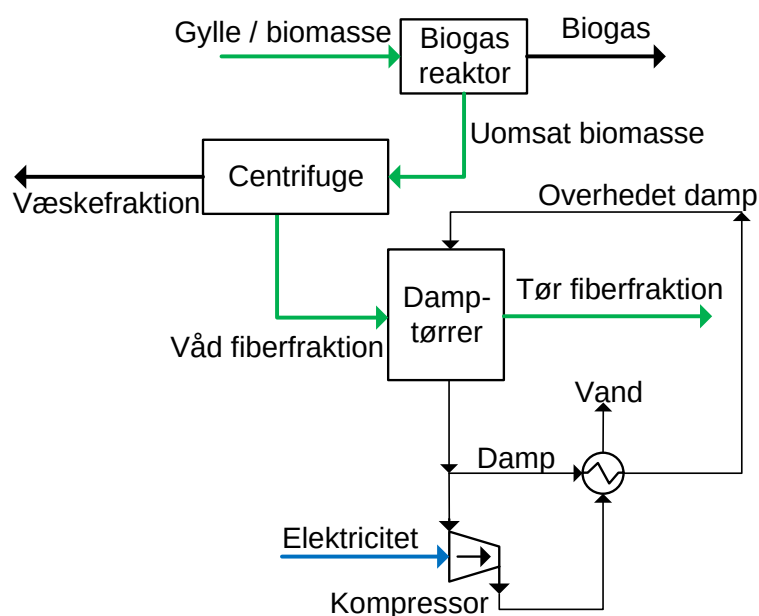
Af Biomasseforgasningsgruppen på DTU Kemiteknik og DTU Mekanik

Termisk forgasning kan med fordel integreres med andre biomasse-konverteringsteknologier såsom biogas eller bioethanol. I disse biokemiske konverteringsteknologier er omsætningen af lignin ikke særligt udpræget og der vil derfor oftest være en signifikant uomsat biomasserest. Dette restprodukt kan med fordel omsættes i en termisk forgasser for at øge energiudnyttelsen af biomassen, men også for at oprense og opkoncentrere næringsstoffer så de efterfølgende kan transporteres og genanvendes uden store risici og omkostninger som bioaske eller biochar. Integrationen med biogas er ekstra fordelagtig, både fordi vi i Danmark allerede har bygget mange biogasanlæg, men også fordi at en termisk omsætning af biogasfibre mindsker vægt, volumen, og fjerner lugtgener og metanafdampning fra biogasfibre. Desuden kan biogasfibre indeholde uønskede organiske og uorganiske stoffer (medicinrester, blødgørere, mikroplastik, tungmetaller osv.) som den termiske proces kan destruere eller dampe ud og derved øge kvaliteten og værdien af den resterende koks eller askefraktion hvis denne søges anvendt til jordforbedrings eller gødningsformål. Idet biogasfibre i mange tilfælde har et højt fosforindhold og også indeholder kalium og mange mikronæringsstoffer så bør den resulterende bioaske/biochar overvejes anvendt som gødning, og næringsstofferne kan nu transporteres til de marker som har et behov for fosforgødning uden store omkostninger. Det muliggør dermed eksport af fosfor fra Jylland hvor majoriteten af danske husdyr forefindes til Sjælland hvor der er primært plan-teafgrøder hvilket er praktisk talt umuligt med de våde biogasfibre. Endelig er

der indholdet af svært nedbrydeligt kulstof i biokoksen eller bioasken. Denne kulstof vil være praktisk talt uomsættelig i jorden i mange hundrede (eller tusinde) år hvor kulstof i ubehandlede biogasfibre omsættes i løbet af en kort årrække. Nedmuldning af biokoks og bioaske fra termisk forgasning af biogasfibre vil derved kraftigt forbedre kulstofbalancen for den samlede proces fra gylle over biogasanlæg og forgasser til jordforbedrings- og gødningssubstrat.

Integration med biogas

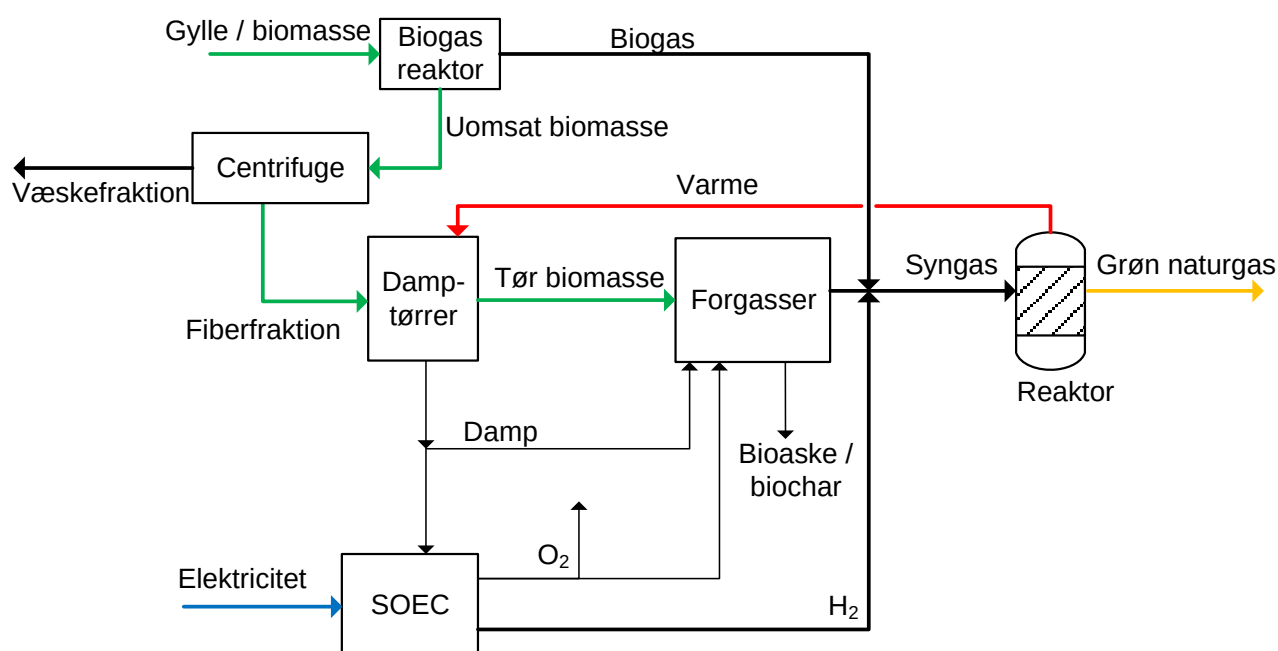
Ved udnyttelse af biogasfibre i en termisk forgasser er det afgørende at tørringen af biogasfibre gøres på en fornuftig måde, for ellers bruger tørringsprocessen nemt mere energi end man genererer ved konverteringen af biogasfibre. Typisk vil den mest optimale tørringsproces være en mekanisk tørring med en centrifuge efterfulgt af en damptørring. En damptørring er en meget kompakt tørringsproces, som kan udnytte spildvarmen ved en efterfølgende termisk eller termokemisk konvertering. En damptørrer kan dog også stå alene og udnytte elektricitet i en energieffektiv varmepumpeproces (vapor re-compression) for at generere et tørt biomasseprodukt som nu kan transporteres til central konvertering (Figur 4).



Figur 4. Produktion af tør fiberfraktion vha. varmepumpedrevet damptørring. Den tørre fiberfraktion transporteres til central konvertering

På store biogasanlæg som producerer bio-metan (grøn naturgas) til naturgasnettet kunne det give mening at udføre den termiske konvertering ved biogasanlægget. Haldor Topsøe arbejder hen imod at kunne tilbyde opgraderingsanlæg til biogas baseret på fast oxid dampelektrolyse (SOEC), hvor brinten fra

elektrolysen blandes med den rensede biogas, hvorefter CO_2 'en og brinten i gassen metaniseres i en katalytisk reaktor. Processen omsætter dermed CO_2 i biogassen til metan, i modsætning til de nuværende opgraderingsanlæg som indfanger CO_2 'en og udleder den til atmosfæren. Denne dampelektrolyse og metanisering kunne med fordel integreres med dampptørring og termisk forgasning som vist på Figur 5. Da fiberfraktionen fra et biogasanlæg kan indeholde omkring halvdelen af kulstoffet i forhold til den tilførte kulstofmængde i form af gylle (og andet biomasse), så kan udbyttet af grøn naturgas potentielt fordobles ved at tilføje den termiske konvertering af fiberfraktionen. Som vist på Figur 5, så vil spildvarmen fra metaniseringen dække dampptørrerens varmebehov, og den overskydende damp fra dampptørreren kan udnyttes i dampelektrolysen og den termiske forgasning. Herudover kan ilten fra elektrolysen benyttes i forgasningsprocessen i stedet for luft, for at undgå nitrogen i forgasningsgassen og dermed i den producerede grønne naturgas.



Figur 5. Produktion af grøn naturgas ud fra biogas og termisk forgasning af den tørre fiberfraktion ved integration af dampelektrolyse (SOEC) og metaniseringsreaktor.

Succesfuld omsætning af biogasfibre i en termisk forgasser er demonstreret flere gange med blandt andet LT-CFB forgasseren (Pyroneer). Andre anlægsdesigns vil også kunne bruges, dog skal de kunne tolerere meget høje askeindhold og processen skal være designet til at sikre at næringsstofferne i bioasken er plantetilgængelige. For at igangsætte udnyttelsen af fiberfraktionen fra biogasanlæg er der behov for forskning, udvikling og demonstration som forfølger begge de spor som er angivet ovenfor. Dvs. 1) en effektiv decentral

tørring af biogasfibre til central konvertering i en termisk forgasser, 2) en decentral konvertering af biogasfibre vha. termisk forgasning, specielt egnet til store biogasanlæg som vil producere grøn naturgas.

Status på termisk forgasning – katalytisk gasrensning

Af Teknologisk Institut

Teknologisk Institut og Haldor Topsøe har siden 2010 samarbejdet igennem flere EUDP-støttede projekter om katalytisk fjernelse af tjærekomponenter i forgasningsgas, med fokus på forgasningsgassen fra Skive Fjernvarmes bubbling bed gasifier (BBG) fra Carbona. Skive Fjernvarme anvender forgasningsgassen til kraft- og varmeformål. Dette arbejde resulterede i ombygningen af hoved-tjærereformer på Skive Fjernvarme, hvilket skete i 2014-2015. Resultatet af ombygningen og samarbejdet mellem TI, Haldor Topsøe og Skive Fjernvarme har været, at Skive Fjernvarmes forgasser fra 2010 til 2015 har forøget den årlige antal driftstimer hvilket har resulteret i en forøget el-produktion fra gas-motorerne, fra 10.000 MWh/år i 2010 til over 30.000 MWh/år i 2015. Haldor Topsøe har tidligere kørt projekter med Gas Technology Institute (GTI) i Chicago med Carbonas forgasser (BBG) og har med succes demonstreret at forgasningsgassen kan omdanne træ til syntetisk benzin.

Teknikken som anvendes på Skive Fjernvarmes forgasser er den såkaldte "dirty" tar reforming, hvor den støvholdige forgasningsgas passerer igennem en monolitiske katalysator som tillader passage af støv og partikler og samtidig har et lav tryktab. Katalysatoren nedbryder tjæren til kulmonoxid og brint, og støv og partikler fjernes efterfølgende i et støvfilter. Dirty tar reforming er velegnet hvis forgasningen sker ved atmosfærisk tryk eller let overtryk, 1-2 barg.

Hvis gassen skal anvendes til produktion af syntetisk brændstof, f.eks. syntetisk naturgas, benzin eller methanol, vil gassen udover at skulle renses for tjære skulle renses yderligere, idet forgasningsgas fra træ f.eks. har et højt indhold af svovlholdige stoffer, hydrogensulfid, H_2S , som vil kontaminere de katalysatorer der skal omdanne forgasningsgassen til fx benzin. Der eksisterer i dag løsninger der kan fjerne fx H_2S fra naturgas, men disse er tilpasset meget høje volumener og en lav koncentration af H_2S i gassen og absorptionen sker ved lav temperatur. Dette gøres bl.a. vha. metal-oxid-absorbenter der absorberer H_2S 'en, og når absorbenten er mættet kasseres den og udskiftes med en frisk absorbent.

Det vurderes derfor, at der fortsat er behov for yderligere udvikling af gasrensningsteknologier der er tilpasset biomasse-forgasningsgas, hvor fx høje

koncentrationer af H_2S 'en kan absorberes ved høj temperatur, hvis forgasningsgassen skal bruges til katalytisk syntese af syntetisk brændsler, som fx methanol, benzin eller syntetisk naturgas, men også andre kemikalier som fx ammoniak.

Bilag 4 - Bidrag fra Dansk Gasteknisk Center

Strategi for termisk forgasning

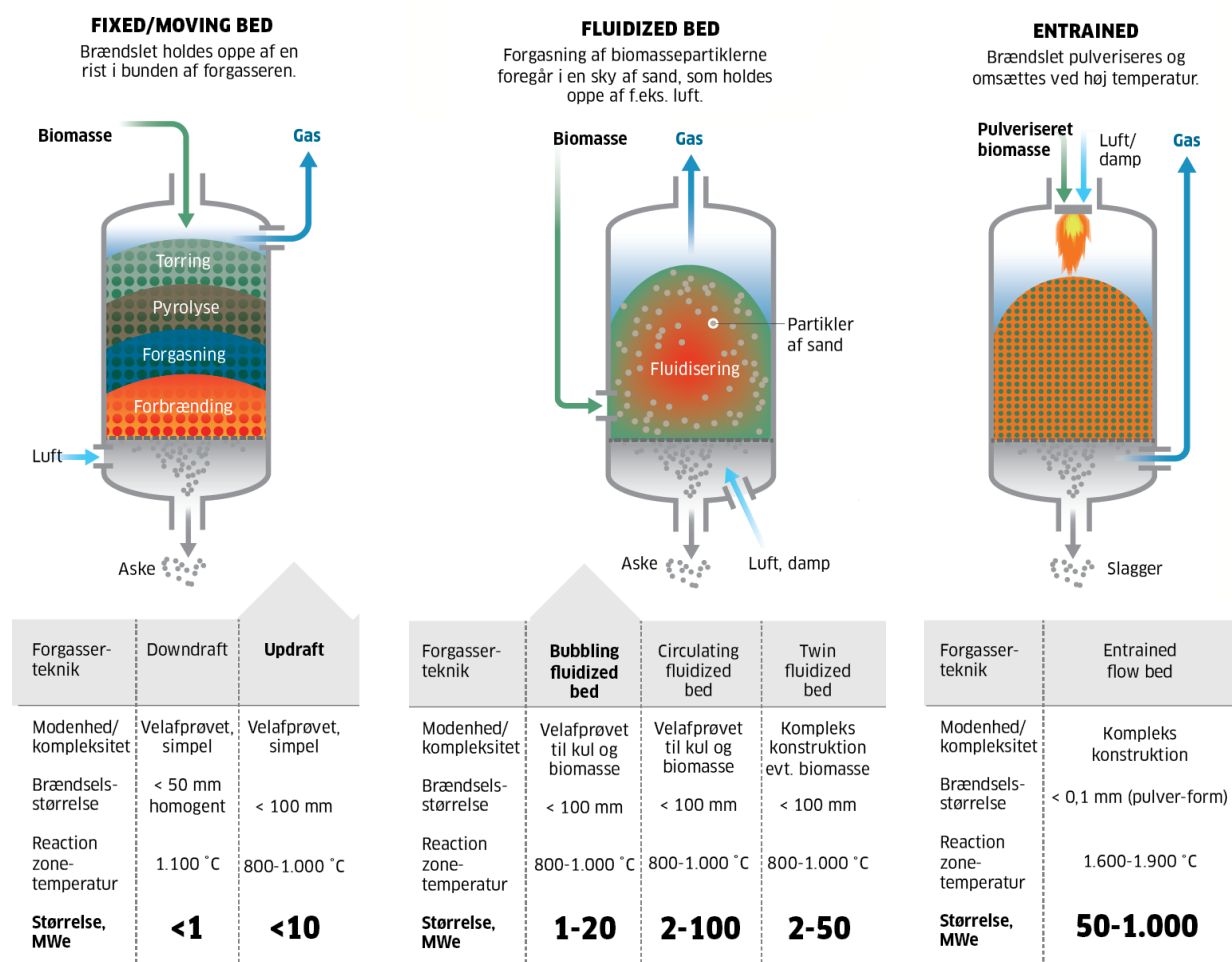
Dette notat er et bud på den fremtidige strategi for termisk forgasning set ud fra synspunktet, at naturgasnettet i fremtiden skal spille en vigtig rolle i det danske energisystem, og at energigasser på naturgasnettet skal udgøre et energilager, som kan bidrage til at udjævne det øvrige energisystems uregulerbare egenskaber i energiproduktionen.

Indholdsfortegnelse

Teknologier for forgasning af biomasse	66
Downdraft anlæg.....	66
Updraft anlæg.....	67
Fluid-bed anlæg.....	68
Entrained flow anlæg	68
To forgasningsteknologier i Danmark.....	68
Bio-SNG.....	69
Biomasse ressourcer	70
Potentialet. Har vi biomasse nok?	70
Værdifulde biprodukter fra forgasning	72
Indpasning i det danske energisystem	73
Et bud på Danmarks energifremtid	74
Konklusion på fremtidens energisystem	78
Danmark som foregangsland.....	78
Rammebetingelser for forgasning.....	80
Stop diskrimineringen	80
Markedet for VE-gasser på det danske naturgasnet.....	82
Økonomiske beregninger for VE-gasser til naturgasnettet	82
CO ₂ -emissionsfaktorer	84

Teknologier for forgasning af biomasse

Når man gennemgår litteraturen og ser på data fra arbejdsopgave 1 (WP1) i dette projekt, er det klart, at forskellige teknologier vil være relevant for forskellige effektstørrelser af en forgasser. I det følgende er beskrevet enkelte forgasningsteknologier og deres relevans for danske forhold. Figur 1 viser illustrationer af forgasningsteknologier.



Figur 1. Forskellige forgasningsteknologier. Illustrationer fra Ingeniøren.

Downdraft anlæg

I den mindste størrelse - forgasning mindre end ca. 500 kW - vil "downdraft" anlæg være den mest hensigtsmæssige. Denne teknologi kan anvendes for små anlæg med luft som forgasningsmedie. Teknologien gør det muligt at rense gassen for tjære til et meget lavt niveau uden at anvende ekstern rensning.

Dette gøres ved at gassen føres nedad i forgasseren, mens nyt materiale kommer ind i toppen og også bevæger sig nedad. Herved opnås, at det nederste materiale i forgasseren er trækul. Dette virker som et aktivt kulfilter for syngassen, som trækkes ned gennem kullet, og gassen renses derved - ofte meget effektivt - for tjære. Derfor kan gassen anvendes direkte efter filtrering til motorer som producerer el med en effektivitet i størrelsesordenen 20-25%, hvilket er langt det største anvendelsesområde.

Downdraft-anlæg findes op til ca. 2 MW størrelse (termisk). Men de kommercielle anlæg, som sælges i stort tal er anlæg under 200 kW termisk input. (Spanner Re2 (Tyskland), Entrade Energiesysteme (Tyskland)). På grund af forgasserens opbygning skal brændslet være ret ensartet for at give en stabil proces.

Updraft anlæg

I mellemstørrelsen fra ca. 500 kW til ca. 20 MW vil "updraft"-forgassere være de mest hensigtsmæssige. I disse anlæg tilføres biomassen i toppen af anlægget, og forgasningsmediet tilføres nedefra og bevæger sig op gennem biomassen. Der anvendes ofte luft som forgasningsmedie, men også damp og CO₂ kan anvendes sammen med luft. Denne forgasningsteknologi er den ældste og mest veludviklede, idet denne teknologi også har været anvendt ved forgasning af kul til bygas gennem århundreder.

I denne teknologi er asken i bunden næsten 100% udbrændt, idet der foregår ren forbrænding nederst i forgasseren, men gassen, som kommer ud øverst i forgasseren, har et stort indhold af tjære. I Harboøre-forgasseren (B&W Vølund) anvender man denne tjære positivt som ekstra brændsel i en kedel. Den tunge tjære separeres ud ved tyngdekraften, og den lette tjære krakkes termisk, før gassen føres til en motor for elfremstilling. Der findes også andre metoder til rensning for tjære. Harboøre-forgasseren har kørt i snart 200.000 timer og er det mest velafprøvede forgasningsanlæg i Danmark.

Der er konstrueret updraft-anlæg op til 50 MW, men en praktisk grænse er ca. 20 MW, som fx for Vølund-forgasseren er fundet som den øvre grænse.

Fluid-bed anlæg

På et lidt højere effektniveau findes fluid-bed reaktoren i området 10 til ca. 100 MW. Her forgasses biomassen i boblende sand ved temperaturer omkring 750-950°C. Fluidiseringsgassen, som får sandet til at boble, kan være luft eller en blanding af luft, damp og CO₂. Tjæremængden fra denne forgassertype er typisk i mellemområdet mellem downdraft og updraft. Tjærerensning er nødvendig, hvorefter gassen kan anvendes til motorer for elfremstilling. Et sådant anlæg er i drift ved Skive Fjernvarme.

En cirkulerende fluid-bed ligger i den høje ende effektmæssigt og med en højere omsætning pr volumenenhed i forgasseren.

En speciel udgave af cirkulerende fluid bed har dobbelt fluid bed, hvor den ene bed anvendes til forgasning, og den anden til forbrænding, og hvor bedmaterialet cirkulerer fra den ene bed til den anden og afgiver varme til forgasningen. Herved kan der fremstilles en gas med højere brændværdi og uden kvælstof i forgasningsgassen, idet det er en indirekte forgasning uden tilførsel af luft ved forgasningen. Gassen kan så anvendes til fremstilling af andre brændsler, fx bio-SNG (kunstig naturgas), som kan føres til naturgasnettet ligesom opgraderet biogas. GoBiGas-anlægget i Göteborg er et sådant anlæg.

Entrained flow anlæg

Ved endnu højere effektniveau findes entrained flow forgasseren. Denne skal bruge pulveriseret brændsel, og forgasningen sker ved meget høje temperaturer - op til 1600°C eller i visse tilfælde endnu højere. Forgasningen er meget effektiv og uden tjæredannelse p.gr. af de høje temperaturer. Den samlede effektivitet er imidlertid lavere, idet der er et stort varmetab. En anden meget stor ulempe er, at asken bliver til slagge. Derved er de næringsstoffer, som kunne være i asken, blevet forvandlet til slagge og glas og dermed ikke tilgængelige for planter. Dette diskvalificerer denne forgasningsteknologi, idet fremtiden vil kræve en cirkulation af næringsstoffer fra biomassen tilbage til naturen.

To forgasningsteknologier i Danmark

Der er to forgasningsteknologier, som i fremtidens Danmark formodentlig vil være aktuelle.

Den ene er updraft-forgasseren. Denne er særdeles velafprøvet, den er simpel, og den kan konstrueres med høj effektivitet.

Den anden teknologi er fluid-bed forgasseren, som ligeledes er velafprøvet, og som kan konstrueres i en passende størrelse for danske forhold.

For begge teknologier gælder, at der med en anvendelse af luft som forgasningsmedie produceres en gas velegnet for motorer, og dermed til elfremstilling. Omvendt kan disse anlæg ved at anvende en blanding af ilt, CO₂ og damp desuden producere gasser, som kan omdannes til bio-SNG og dermed forsyne naturgasnettet. Den sidste anvendelse er yderst interessant i kombination med biogasanlæg. Herved kan opnås en synergi, hvor restprodukter fra den ene teknologi udnyttes i den anden og omvendt. Sådanne kombinerede anlæg er endnu ikke opstillet, men den samlede effektivitet kunne forøges væsentligt, og produktionsapparatet kunne udnyttes langt bedre til produktion af bio-SNG.

Bio-SNG

Produktionen af bio-SNG vil i fremtiden være den mest interessante udnyttelse af forgasningsteknologierne. I GoBiGas-anlægget i Sverige har man benyttet sig af en teknologi beregnet for store anlæg over 200 MW, selv om anlægget kun er på 20 MW bio-SNG. Det betyder, at anlægsomkostningerne er uforholdsmæssigt store. Med en sådan teknologi skal man over 200 MW før ”economy of scale” kan få den specifikke pris ned. Et forholdsvis lille antal bio-SNG anlæg i størrelsen ca. 200 MW kunne sammen med biogasanlæggene dække behovet for naturgas i Danmark. Det er imidlertid tvivlsomt, om der ville være basis for sådanne anlæg, bl.a. p.gr. af logistikken for biobrændslet.

Et andet bud på den fremtidige forgasningsteknologi er et stort antal små anlæg, som i synergi med biogasanlæg producerer bio-SNG til naturgassystemet. Dette vil give ”economy of number”, som vi nu ser det med biogasanlæggene, der bliver billigere og billigere med bedre og bedre teknologier.

Vi har derfor en stor udfordring med en fremtidig udvikling af forgasning og metanisering i stor eller lille skala, simpelt og billigt, men effektivt og driftssikkert. Det kræver såvel gode rammebetingelser som investering i forskning og udvikling af teknologierne hen imod bio-SNG.

Biomasseressourcer

Potentialet. Har vi biomasse nok?



+ 10 MIO. TONS PLANEN

muligheder for en øget dansk produktion
af bæredygtig biomasse til bioraffinaderier



MEN !

Har vi biomasse nok ??

Københavns univ.
Århus univ. 2012

Figur 2. Forside af ”+10 MIO. TONS PLANEN”

Et spørgsmål som melder sig er, om vi i Danmark kan skaffe nok biomasse til produktion af tilstrækkeligt brændsel (bio-SNG, bio-olie, etc.) til også at dække elforsyning i de få vindstille perioder. Der er meget, der tyder på, at det godt kan lade sig gøre. I 2012 kom der en rapport i fællesskab fra Københavns Universitet og Århus Universitet med titlen ”+ 10 MIO. TONS PLANEN”. Det fremgår heraf, at hvis alle ressourcer tages i anvendelse, vil det være praktisk muligt årligt at producere op til 10 mio. tons ekstra biomasse (tørstof) oven i det nuværende forbrug på ca. 5 mio. tons uden at reducere muligheden for produktion af afgrøder som foder og føde.

Potentiale for grønne gasser

- +10 mio tons tørstof/år $\sim$ 190 PJ/år (nedre brændværdi)
Dvs. i alt 15 mio tons $\sim$ 280 PJ (inkl. nuvæ. 5 mio tons, 2014)
- Naturgas slutforbrug i DK 2015: 96 PJ
- El slutforbrug i DK 2015: 117 PJ
- Årligt energiforbrug i DK 2015: 720 PJ/år
(forventet 600 PJ i 2050)

Figur 3. Potentiale for grønne gasser samt årligt forbrug af naturgas og el.

Med ekstra 10 mio. tons biomasse ses her, hvordan det relaterer sig til det nuværende forbrug af elektricitet og naturgas i Danmark. Slutforbruget af gas er (2015) lidt under 100 PJ pr. år, mens slutforbruget af el er lidt over 100 PJ. De i alt 15 mio. tons tør biomasse svarer til i alt 280 PJ. Det ses, at selv med konverteringstab kan biomassen nemt dække det fremtidige behov for gas. Det gælder også, selv om en del af biomassen skal anvendes til fremstilling af flydende brændsler for fly og eventuelt skibe. Hertil kommer, at biogas fra gylle og bioaffald kan dække 25-50 PJ som opgraderet biogas til naturgasnettet. Men det forudsætter, at der ændres strategi, så den direkte afbrænding af biomasse til varme stoppes, hvorefter biomassen fortrinsvis anvendes til produktion af gasformige og flydende brændsler. Direkte afbrænding af biomasse til varme er spild af gode molekyler.

Værdifulde biprodukter fra forgasning

Ved forgasning af biomasse er asken derfra et restprodukt, som i første omgang kan synes som et problem. Adskillige rapporter og artikler bl.a. fra DTU og fra KU fremhæver imidlertid, at med den rette forgasningsteknologi kan restproduktet i form af aske og såkaldt biokoks - som er kulstof i asken - indeholde en stor gødningsværdi og kan bidrage væsentligt til jordforbedringer. Det betyder, at næringsstoffer og gødning på denne måde kommer tilbage til jorden. Samtidig viser det sig, at biokoks i jorden har en halveringstid på flere tusinde år. Man kan derfor kalde tilbageførslen af biokoks til jorden for "low cost CCS" (Carbon Capture and Storage).

Ved visse forgasningsteknologier, hvor asken udskilles i flere trin/fraktioner, kan der ske en opkoncentration af tungmetaller i den ene fraktion. Hvis denne fraktion, som sædvanligvis er en lille andel af asken, bortskaffes og ikke vender tilbage til jorden, har man på denne måde opnået en metode til gradvis oprensning af jorden for tungmetaller (specielt cadmium). Dette kræver en forholdsvis lav forgasningstemperatur, hvilket kan opnås med de forventede forgasningsteknologier.

Indpasning i det danske energisystem

Herunder beskrives nogle systembetragtninger for el/gas-systemerne i Danmark. Forgasning i relation til hele det danske energisystem vurderes.

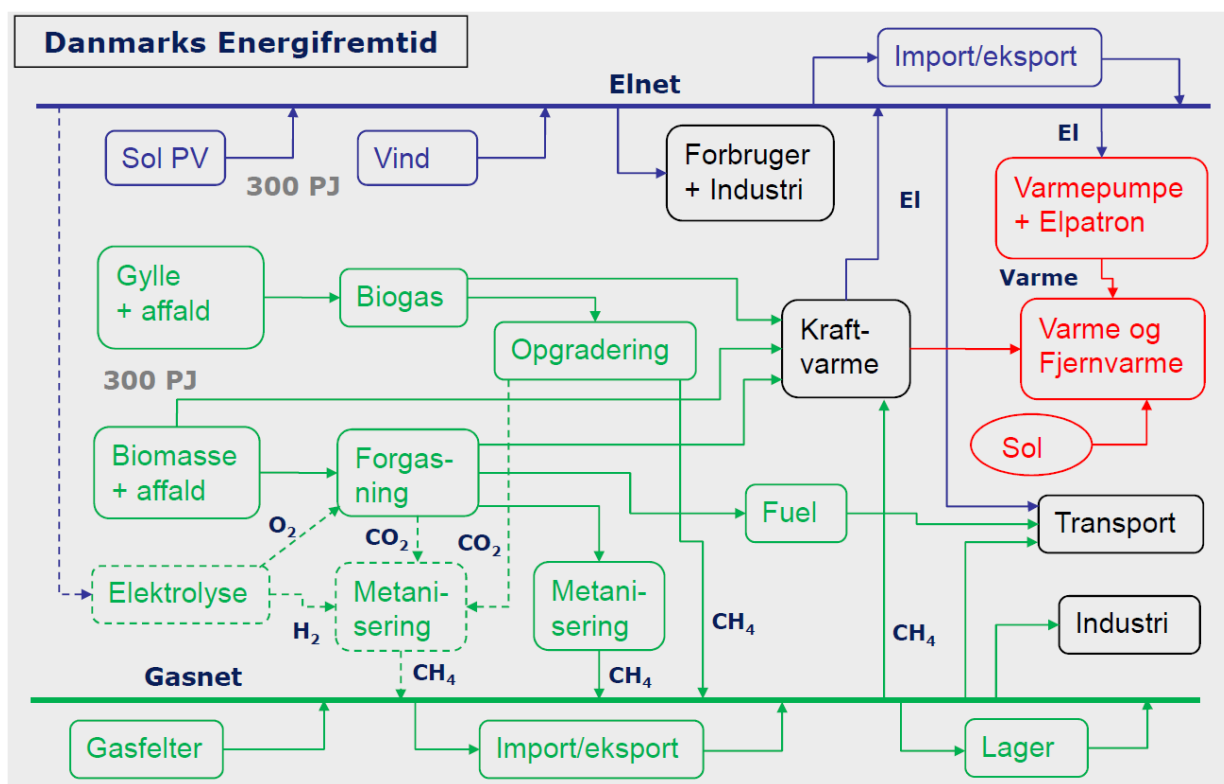
I fremtidens elsystem vil der være en stor mængde vindenergi, og denne skal på den ene eller den anden måde udlignes med forbruget af el, idet man ikke automatisk har den samme produktion som forbrug. Når der er for meget vindenergi, skal den overskydende el anvendes på den fornuftigste måde, og når der er for lidt el, skal den manglende el anskaffes bedst (billigst) muligt.

Det forudsættes her, at der sigtes på et fossilfrit samfund i år 2050. Der kan altså ikke blot satses på at dække elunderskud med fossilt brændsel. Oplagte muligheder for i fremtiden at dække behovet for gas med naturgaskvalitet i det danske naturgasnet er opgraderet biogas og efterhånden også metaniseret syn-gas fra forgasning af biomasser, dvs. bio-SNG. Det ressourcemæssige potentiale for bio-SNG er større end potentialet for opgraderet biogas, og det samlede potentiale er større end det nuværende naturgasforbrug.

Der anføres ofte muligheden for at bruge elektrolyse til at producere brændsel (brint) og dermed bruge af overskydende elektricitet. Brinten kan så enten lagres direkte eller - sammen med CO₂ fra en eller anden kilde - metaniseres og gemmes i gasnettet.

Når man taler om elektrolyse til at producere brint for at binde CO₂ ved produktion af metan (fx til opgradering af biogas), skal man gøre sig det klart, at det i princippet er ligegyldigt, hvor CO₂'en kommer fra. Uanset kilden er det den samme mængde CO₂, som forhindres i at komme ud i atmosfæren for hvert metanmolekyle, der produceres. Det vigtige er, hvor brinten kommer fra, og hvilken CO₂-emission produktionen af denne har medført.

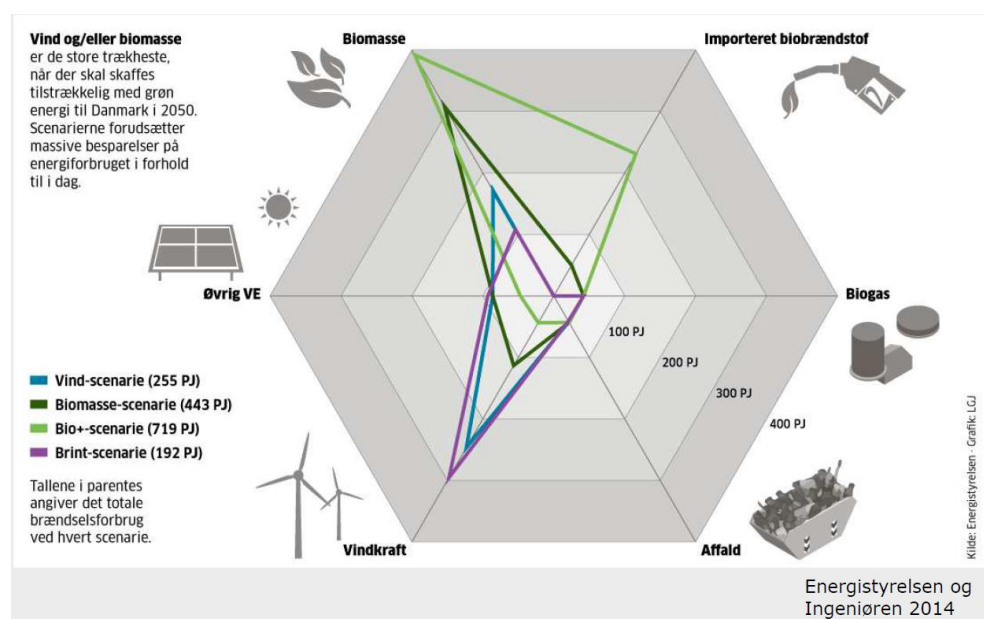
Et bud på Danmarks energifremtid



Figur 4. Et bud på Danmarks energifremtid

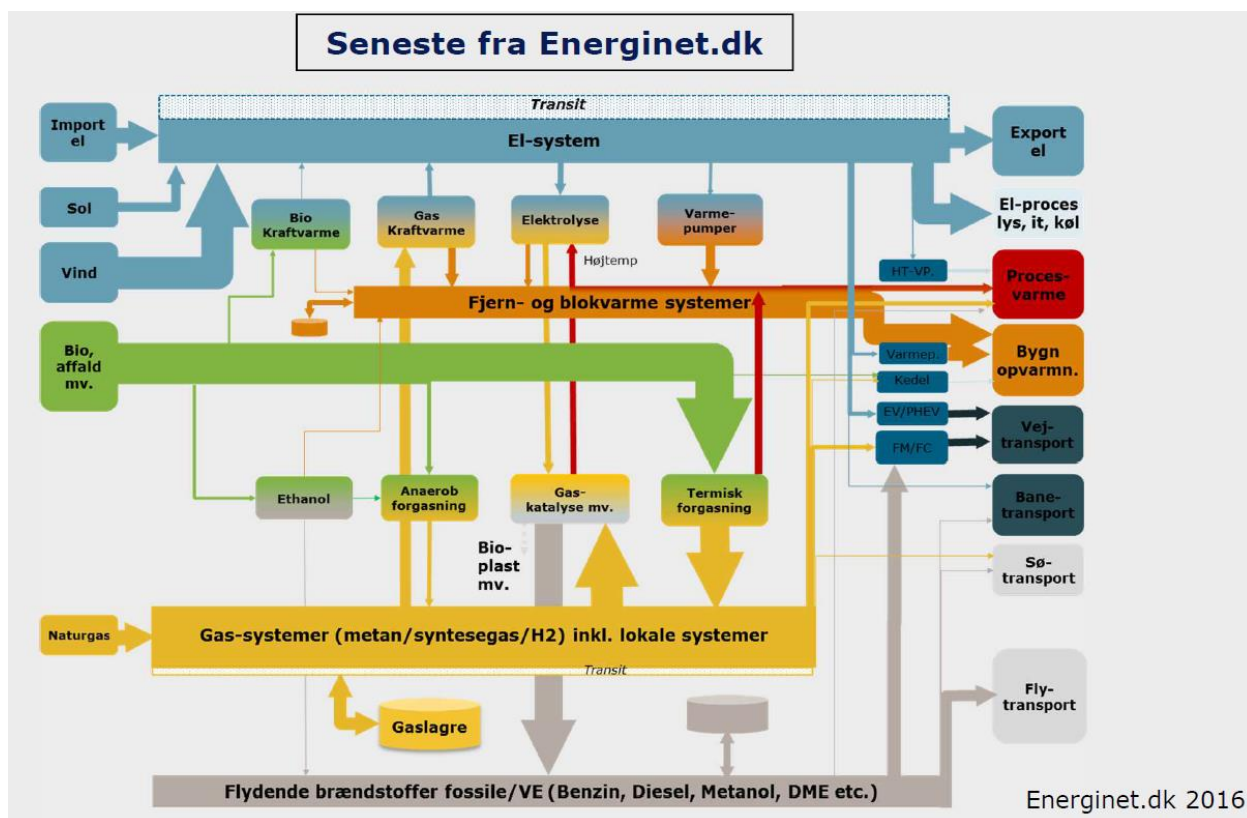
Dette diagram viser samspillet mellem elsystemet og gassystemet i et tænkt fremtidigt dansk energisystem. I det fremtidige danske energisystem uden fossile brændsler, hvilket er forudsat her, vil gassystemet og elsystemet supplere hinanden med kraftvarmen som nøglen til udvekslingen af energi mellem de to net. Gylle, affald og biomasse vil spille en stor rolle ved produktionen af nødvendige brændsler, som dækker transport, industri og kraftvarme i vindstille perioder. Størstedelen af varmen dækkes af elnettet via elpatroner og varmepumper, mens fjernvarmesystemerne med lagring af varme i vand virker som indirekte lager for overskydende vindenergi. Elektriciteten leveres tilbage til elnettet fra (gasfyrede) kraftvarmesystemer, som får energien via forgasning og biogas. Den direkte afbrænding af biomasse til varme er et spild og bør stoppes. Anvendelse af biomasse til kraftvarme bør ligeledes stoppes, medmindre der kan findes økonomi i kun at køre med disse KV-værker i 10-25 % af tiden, når vinden ikke blæser. Der skal være færrest mulige grundlastsystemer (mindst mulig effekt), som producerer el konstant uafhængigt af vindenergien.

Elektrolysen er indsat i diagrammet med stiplede linjer. Det er et spørgsmål, om der nogensinde bliver behov for elektrolysen i et fremtidigt system. Kun hvis biomassen er utilstrækkelig til at dække behovet for brændsel (bio-SNG og bio-olie), kan der være behov for en lille mængde elektrolyse. Det vil dog altid være i samspil med biogasanlæg og forgasningsanlæg, idet den nødvendige mængde CO₂ til at kombinere med brint til metan ved metanisering reelt set kun kan komme fra disse anlæg, hvor CO₂ vil være et næsten rent restprodukt i rigelige mængder.



Figur 5. Energistyrelsens fire scenarier.

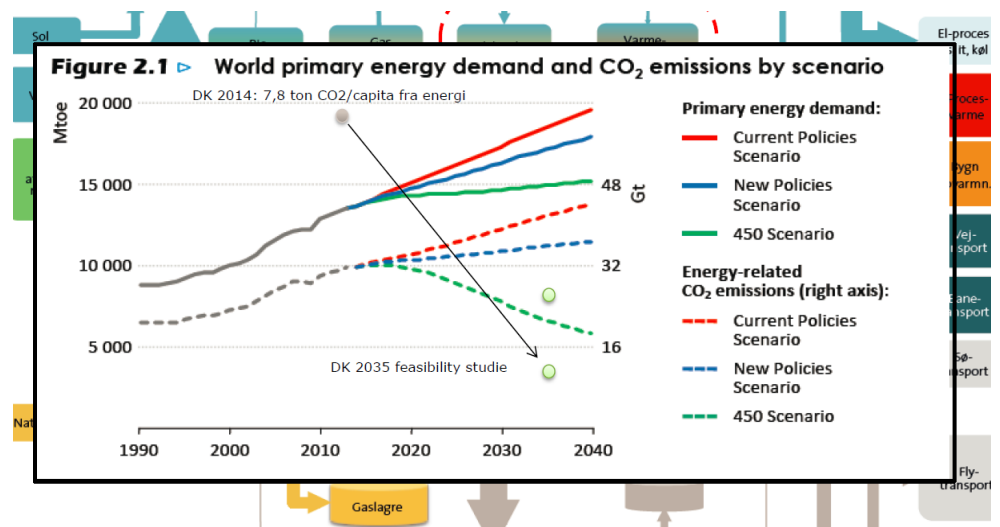
Man kan så spørge, hvordan diagrammet i Figur 4 harmonerer med andre analyser af energisystemet i Danmark. Figur 5 viser i et diagram fire scenarier, som Energistyrelsen lod analysere i 2014. De to øverste scenarier, Vind-scenariet og Biomasse-scenariet synes at være de mest realistiske. Hvis man ser på resultatet af analyserne, ses det, at biomasse sammen med biogas og vindenergi sammen med solenergi hver især kan give i størrelsesordenen 300 PJ energi pr år. Det stemmer godt overens med diagrammet i Figur 4.



Figur 6. Energinets bud på et fremtidigt dansk energisystem

Energinet.dk har gennem de seneste år vist diagrammer efter samme princip som diagrammet i Figur 4. Også i Tyskland har man set lignende diagrammer for det tyske energisystem. De seneste diagrammer fra Energinet.dk har meget stor lighed med diagrammet i Figur 4. Hvor der tidligere var stor vægt på elektrolyse, er denne nu nede på et minimum i diagrammet. Forgasning spiller en stor rolle i Energinet.dk's diagram, hvor syngassen konverteres til flydende brændsler. Man kunne imidlertid lige så vel tænke sig, at syngassen fra forgasningen konverteres til bio-SNG og derfra anvendes til transport og industri. Det er et faktum, at den bedste konverteringseffektivitet fra syngas til andre brændsler fås ved konvertering til metan som bio-SNG.

I denne figur fra Energinet.dk er det forudsat, at der stadig er en lille mængde fossil naturgas i gassystemet. Man kunne lige så vel tænke sig, at der i stedet stadig var en lille mængde flydende fossile brændsler i spil til forsyning af fly og tung trafik, mens al naturgas blev produceret fra biogas og forgasning, i takt med at de danske kilder til fossil naturgas udtømmes.



Figur 7. Et muligt scenarie for den danske CO₂ emission. Energinet 2016.

Denne figur (Energinet.dk 2016) viser, hvor Danmark ville ramme mht. CO₂-emission pr. capita i 2035, hvis Energinet.dk's diagram fra Figur 6 blev fulgt. Vi ville for Danmarks vedkommende ramme en emission, som ligger under den emission hele verdens befolkning skal ramme for at holde CO₂-indholdet i luften under 450 ppm og dermed temperaturstigningen under 2 °C. Det er ikke et urealistisk scenarie for Danmark.

Konklusion på fremtidens energisystem

Konklusioner, ideelt system

- Elbehovet dækkes primært af vind og sol samt udveksling
 - Ved underskud dækkes el ved kraftvarme primært fra gasnettet via gasmotorer og turbiner, som er billige i anskaffelse og drift
 - Fjernvarme dækkes af elpatroner (som er billige) ved el-overskud og af kraftvarme ved el-underskud samt af solvarme
 - Individuel varme dækkes primært af varmepumper, elpatroner samt af solvarme
 - Naturgasnettet forsynes fra biogas og forgasning via opgradering og metanisering
 - Biogas og forgasning kører kontinuert, mens KV kun kører efter behov
- Industri dækkes primært af el og metan
 - Persontransport dækkes primært af el, mens tung transport dækkes af metan og brændstof fra biomasser
 - Gasnettet er nøglen til lagring af el
 - Kraftvarmesystemet er nøglen til udvekslingen mellem el- og gasnettet
 - Alle teknologier er udviklet og kan implementeres. Forbedringer kan dog opnås
 - Elektrolyse bliver kun aktuel, hvis biogas og forgasning ikke kan dække behovet for metan og brændstof, og kun i samspil med disse, idet CO₂ fås derfra

Figur 8. Konklusionen på et muligt fremtidigt dansk energisystem.

Konklusion: Biogas og forgasning bør få en afgørende rolle i det fremtidige danske energisystem.

Danmark som foregangsland

Danmark var foregangsland ved udviklingen af vindenergien, først i Danmark og senere i resten af verden, hvor vindenergien nu er en vigtig spiller i den samlede energiforsyning.

Danmark var ligeledes foregangsland ved udviklingen af kraftvarme, hvor produktionen af el og varme blev en vigtig brik i energibesparelser, og som var en af de vigtigste årsager til, at Danmark siden 1980'erne har haft et næsten konstant energiforbrug (ca. 800 PJ/år). Desværre bliver dette system nu nedbrudt af kortsigtede løsninger med anvendelse af biomasse til direkte varme.

Med den rette politik kunne Danmark også blive et foregangsland ved udviklingen af forgasning af affaldsprodukter, restprodukter og dyrkede biomasser til ædlere brændsler i form af bio-SNG og bio-brændstof. Disse er lagerbare og multianvendelige, og de giver et vigtigt bidrag til de energiformål, hvor kun kemiske energiformer er anvendelige (fx industri, tung transport og flytransport). Desuden er de en nødvendig backup til vindenergien i de (sjældne) perioder, hvor vindenergi og udveksling med nabolande ikke dækker behovet for el og varme. Her er kraftvarme baseret på motorer og gasturbiner effektive og billige teknologier. Kraftvarmesystemer skal desuden bruges til at holde prisen på importeret el nede i de tilfælde, hvor vi ikke får nok el fra sol og vind.

I det fremtidige Danmark har vi simpelthen ikke råd til at anvende en større del af kemisk bunden energi til direkte varmeproduktion uden samtidig produktion af ædlere energiformer som el og brændstof. Med den igangværende omlægning af varmeproduktion fra kraftvarme til direkte afbrænding af bio-brændsler er vi i gang med at ødelægge et velfungerende system, som vil være nødvendigt i det fremtidige Danmark. Kun skævvridende afgifter og tilskud fremmer denne udvikling.

Alle kemiske energikilder skal gemmes til industri, transport og en lille del nødvendig kraftvarme samt varme uden for fjernvarmeområder. Varme skal hovedsagelig dækkes af el via elkedler og varmepumper. Den kemisk bundne energi i biomasse skal omformes til lagerbare gasformige og flydende energiformer, hvor omdannelse til metan er den mest effektive.

Kemisk og biologisk omformning af affald, restprodukter og dyrkede biomasser via termisk forgasning og biogasanlæg vil derfor være en meget vigtig brik i det fremtidige danske energisystem.

Elektrolyse vil først være aktuel, når størstedelen af varmeproduktionen er konverteret til el samt til et minimum af kraftvarme og direkte varme, og der må aldrig trykkes på startknappen til et elektrolyseanlæg, før al omdannelse af brændsel til varme og el er slukket (på det samme tidspunkt).

Rammebetingelser for forgasning

Stop diskrimineringen

Forudsætningen for, at forgasning med henblik på konvertering til ædlere brændsler kan blive en succes, er, at der skabes økonomiske forudsætninger for dette. Én af forhindringerne er diskrimineringen af bio-SNG fra forgasning i forhold til opgraderet biogas med henblik på injektion i det danske naturgasnet. I figuren herunder er dette illustreret.

Diskrimineringen af bio-SNG			
Konvertering af biomasse		El-fremstilling til el-net	Bio-SNG til naturgasnet
Biomasse →	Biogas	Tilskud	Tilskud
	Forgasningsgas	Tilskud	IKKE tilskud

Hvad er logikken?
Svar: der er ingen
eller: man er bange for succes

Figur 9. Illustration af diskrimineringen af bio-SNG fra forgasning.

Hvis biomasse som fx halm anvendes i en biogasreaktor, og den producerede biogas opgraderes og sendes på naturgasnettet, vil der være tilskud til denne bio-SNG. Hvis man i stedet forgasser den samme halm og metaniserer, så man har nøjagtig den samme resulterende gas som gennem biogasanlægget (og endda i større mængde), er der ikke tilskud til den producerede bio-SNG. Det er en uforståelig diskriminering af en bestemt fremstillingsproces for det samme produkt med samme kilde.

Det er en forudsætning for udviklingen af forgasningsteknologier i Danmark, at bio-SNG fra forgasning i fremtiden får de samme tilskud som bionaturgas. Det harmonerer med de nyeste tiltag i både EU og i Danmark, at tilskud til VE-energiteknologier skal være teknologineutrale, dvs. at man skal give samme tilskud til de samme VE-gasser uanset fremstillingsmetoden.

I EU's "Vinterpakke" er en ny definition på biogas foreslået: 'Biogas' is defines as "gaseous fuels produced from biomass".

Hvis denne definition kommer igennem, vil det være lidt vanskeligt at fastholde diskriminationen af bio-SNG, idet bio-SNG så pr definition vil være biogas og dermed skal have det same tilskud som biogas.

Markedet for VE-gasser på det danske naturgasnet

Med den planlagte udfasning af fossil naturgas på naturgasnettet før 2050 er det nærliggende at se på mulighederne for at erstatte denne manglende gas på nettet med VE-gasser.

Af hensyn til den fortsatte forbindelse med det europæiske gasnet og af hensyn til apparatbestanden i Danmark forudsættes det her, at fremtidens gasser på naturgas(NG)nettet vil være af naturgaskvalitet, dvs. harmonere med de europæiske standarder for gaskvalitet.

Ren brint fra elektrolyse har været nævnt som en mulig energigas på NG-nettet, fordi man herved kunne udligne overskuds-el fra vindmøller. Det er imidlertid en håbløs tanke. For danske forhold kan det vises, at denne metode kun kunne dække omkring 0,5% af det fremtidige behov for udligning af overskuds-el, mens de resterende 99,5% skulle dækkes på anden vis.

Hverken ren brint fra elektrolyse, biogas uden opgradering, flaskegas eller forgasningsgas uden metanisering har gaskvaliteter, som harmonerer med de eksisterende NG-kvaliteter i Europa. Små mængder vil kunne tilsættes, men det vil ikke have nogen praktisk betydning for reduktionen af drivhusgasser og kun være til besvær for NG-nettet på grund af de uvante gasser (sikkerhed, kapacitet, økonomi etc.)

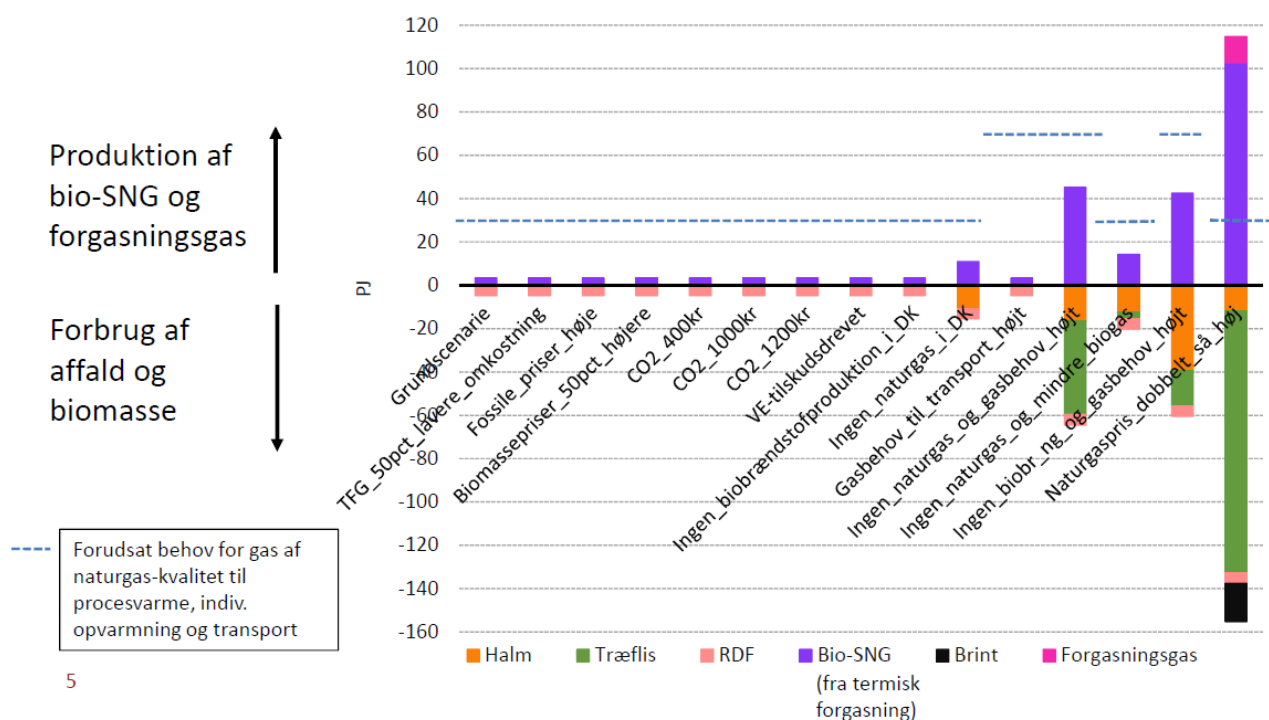
De relevante gasser for et fremtidigt NG-net uden fossil naturgas er derfor gasser, som har en gaskvalitet tæt på metan og dermed opfylder kravene. Det vil sige opgraderet biogas (biometan/bionaturgas), metaniseret brint plus CO₂ samt metaniseret og opgraderet forgasningsgas (bio-SNG, Syntetic Natural Gas).

Økonomiske beregninger for VE-gasser til naturgasnettet

I Partnerskab for Termisk Forgasning (PTF) er der i regi af et EUDP-projekt gennemført både samfundsøkonomiske og selskabsøkonomiske beregninger for VE-gasser til naturgasnettet. Model-beregningerne er udført af Ea-Energianalyse. Figur 10 viser resultatet for de samfundsøkonomiske beregninger vedrørende bio-SNG. En tilsvarende figur kan vises for biometan. Der er i alt gennemregnet 15 scenarier med forskellige variationer af brændstofpriser, CO₂-priser, naturgastilgængelighed, gasbehov, osv. I de tilfælde, hvor fossil naturgas er udfaset, vil biometan og bio-SNG være de gasser, som kan fyldes på

gasnettet. Elektrolyse og opgradering af biogas ved metanisering (elektrolyse-metan) er pt. ikke samfundsøkonomisk interessant, og er derfor ikke belyst nærmere i dette notat.

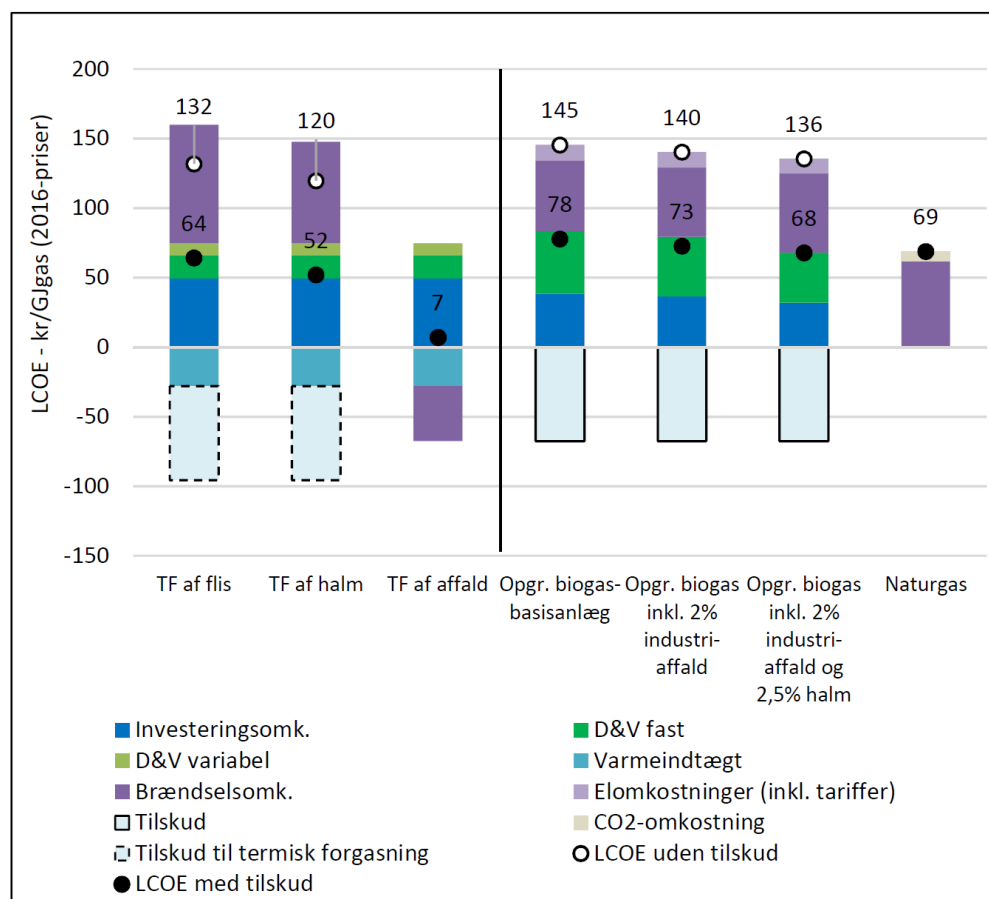
Termisk forgasning til el, varme, industri og transport (ekskl. flydende brændstoffer) -DK, 2050, forskellige scenarier



Figur 10. Brændselsforbrug og gasproduktion på termiske forgasningsanlæg i Danmark i 2050 for forskellige scenarier (resultat af samfundsøkonomisk systemoptimering). (Kilde: Ea-Energianalyse).

I de selskabsøkonomiske beregninger er udført såkaldte LCOE-beregninger (Levelized Cost Of Energy). Her er forskellige fremstillingsmetoder for gasser til NG-nettet sammenlignet, heriblandt fossil naturgas. Se figur 11. Det ses, at forgasning har de laveste priser for gasser til NG-nettet, naturgas er næstbilligst, og biogas er dyrest. Ved alle beregningerne er anvendt data fra teknologikataloget, som foreskriver de fremtidige forventede kostpriser og teknologiudviklinger for alle de anvendte teknologier til energikonvertering. Elektrolyse-

metan er ikke medtaget her, idet den alene ved de samfundsøkonomiske beregninger er udelukket på grund af en meget høj pris, og der forventes intet tilskud til elektrolysemetan.

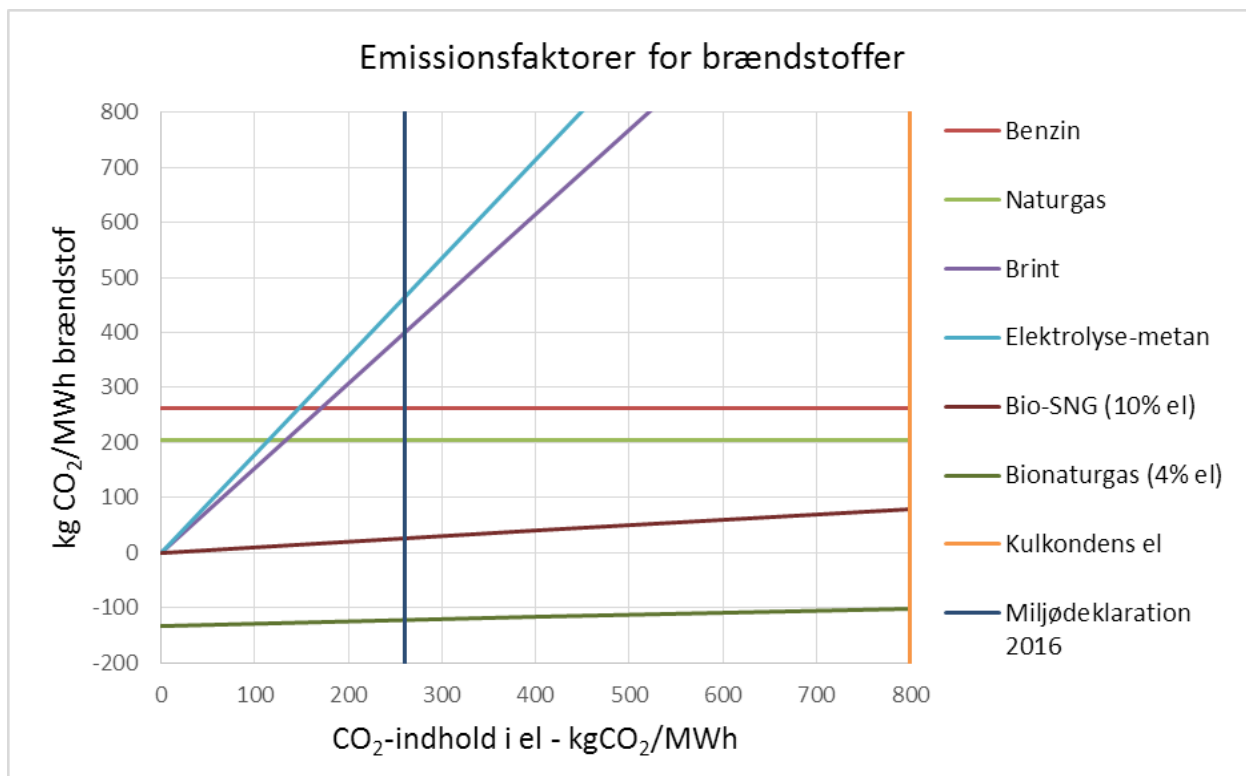


Figur 11. Selskabsøkonomiske LCOE i 2030 for produktion af bio-SNG, opgraderet biogas og naturgas. (2016-priser). (Beregninger: Ea-Energianalyse).

Forudsætningen i figur 11 er, at den nuværende tilskudsordning for biogas til NG-nettet fortsættes til 2030 og derefter, og at bio-SNG får samme tilskud.

CO₂-emissionsfaktorer

Ud over de økonomiske analyser kan man se på CO₂-emissionen fra de forskellige gasser. Brændsler som naturgas og benzin har standard CO₂-emissionsfaktorer. De andre gasser som biometan, bio-SNG og elektrolysemetan anvender større eller mindre mængder elektricitet ved fremstillingen, og CO₂-emissionsfaktoren afhænger derfor af, hvilket CO₂-footprint den anvendte elektricitet giver anledning til. Se figur 12.



Figur 12. CO₂-emissionsfaktorer for forskellige brændsler afhængigt af emissionsfaktoren for den til fremstillingen anvendte elektricitet. (Beregninger: DGC).

Både biogasanlæg, forgasningsanlæg og elektrolyseopgraderingsanlæg skal køre hele året med konstant el-forbrug. Det vil være alt for dyrt i investering, hvis man kun kører en del af året for at udnytte de relativt set få timer om året, hvor der er meget lave eller negative elpriser.

Der er forskellige meninger om, hvilken elektricitet man skal regne med ved anvendelse til fx elektrolysemetan. Man kan argumentere for, at der altid skal regnes med den marginale produktion af el i Nordeuropa, hvilket (næsten) altid vil være et kulkondensværk, som har den højeste emission, her 800 kg CO₂/MWh el.

Andre mener, at man blot kan købe certifikater for vindenergi og dermed være CO₂-frie. Det er imidlertid ren manipulation. Certifikaterne koster stort set ingenting, og hvis man påstår sig CO₂-neutral, blot fordi man køber vindcertifikater, er der blot andre elforbrugere, som tilskrives den ekstra CO₂, som man ikke selv tilskrives, og ingen af dem betaler ekstra.

Det mest korrekte må være at regne med middel CO₂-emissionen, som den leverede elektricitet har i løbet af et år (260 kg CO₂/MWh el i 2016). I så fald er CO₂-emissionsfaktoren for elektrolysemetan over det dobbelte sammenlignet med fossil naturgas. Tilskud til elektrolysemetan vil derfor være et totalt vildskud. De gasser, som har den laveste CO₂-emission, er biometan og bio-SNG, og de kan med brug af naturgaslagrene produceres hele året uden hensyn til gasforbruget.

Biometan har en emission under nul, idet biogassen tilskrives en yderligere reduktion af drivhusgasser på grund af, at gylle fra landbruget ikke afgiver drivhusgasser på marken og ved lagringen, men i stedet i biogasanlægget. Visse videnskabelige artikler tyder på, at bio-SNG baseret på flis fra affaldstræ bør tilskrives en tilsvarende ekstra CO₂-gevinst. Dette er dog ikke medtaget i figur 12.

Konklusionen er, at både ud fra en samfundsøkonomisk, en selskabsøkonomisk og fra drivhusgas synsvinkel, så er biometan og bio-SNG de gasser, som efter 2030 vil kunne levere metan til NG-nettet, når den fossile naturgas udfases. En gradvis overgang til disse gasser vil gøre NG-systemet gradvist CO₂-neutralt eller måske endog CO₂-negativt. Andre gasser vil formodentlig ikke have en chance, enten pga. gaskvaliteten, pga. prisen eller pga. CO₂-footprintet.

Bilag 5 - Bidrag fra Energinet og DTU Management

Termisk forgasning

– termisk forgasning i det fremtidige danske energisystem

Dette notat fokuserer på den fremtidige rolle for termisk forgasning i det Danske energisystem. Notatet beskriver potentialet for termisk forgasning i energisystemet set både fra et system perspektiv samt fra en økonomisk synsvinkel.

Baggrund

Danmark har sat det ambitiøse mål at opnå et energisystem som er uafhængig af fossile brændsler i 2050. Som delmål er det annonceret at 50% af Danmarks elektricitetsforbrug skal dækkes af vindenergi i 2020, 50% af energiforbruget skal forsynes fra vedvarende energi (VE) i 2030, samt 39% CO₂-reduktion i non-ETS sektorer i 2030 i forhold til niveauet i 2005. De fremtidige danske energimål betyder at det danske energisystem vil gennemgå en omstilling mod et energisystem, som er baseret på energi produceret fra vedvarende energi. Der er store udfordringer forbundet med den grønne omstilling. El- og varmesektoren er på rette spor i forhold til en større VE-andel i den samlede energiproduktion. Med en større andel af produktion fra varierende VE-kilder, som er karakteriseret ved en varierende, usikker og lokal produktion, kan der komme en stigende efterspørgsel efter hurtigt regulerbar elproduktion. Derudover forudses der også udfordringer i forhold til omstillingen af højtemperatur industriprocesser, som kræver en afbrænding af energitætte brændstoffer. Endelig anses, i særdeleshed, omkostningseffektiv omstilling af transportsektoren for at være en stor udfordring. Termisk forgasning er således en nøgleteknologi for at sikre kulstof til VE-brændstoffer (biobrændsler) i takt med at Danmark og Europa omstilles til vedvarende energi.

Hvorfor er der behov for termisk forgasning

Termisk forgasning har potentiale til at blive en nøgleteknologi i det fremtidige Danske energisystem, som er uafhængige af fossile brændsler. Termisk forgasning kan bruges til at producere gas, som kan benyttes i industriprocesser, til at generere el og/eller varme i spidslast situationer, samt i transportsektoren hvor komprimeret gas (CNG) kan bruges direkte og hvor forgasningsgassen kan benyttes til at realisere potentialet for Power-to-gas (P2G) ved at levere kulstof til kulbrinte-baserede brændstoffer.

Termisk forgasning til produktion af VE-brændstoffer, som kan benyttes til at decarbonisere transportsektoren

Termisk forgasning er en nøgleteknologi for at sikre kulstof til VE-brændstoffer, som kan benyttes til den grønne omstilling af transportsektoren.

Analyser af energisystemet i Danmark viser, at en stor del af energiforbruget til let vej-transport omkostnings-effektivt kan elektrificeres inden for de kommende årtier. Men selv med en meget kraftig elektrificering, vil der med stor sandsynlighed stadig være behov for brændstoffer til tung vej-transport, fly og skibstransport over lange afstande.

Samlet set er der behov for brændstoffer i energisystemet, også på det lange sigte. Med Danmarks mål om langsigtet at gøre energiforsyningen uafhængig af fossile brændstoffer er produktion af brændstoffer fra vedvarende energi helt centralt. Her vurderes der på lang sigt at være behov for omkring 150-200 PJ brændstoffer. Af disse kan i størrelsesordenen halvdelen forsynes ud fra biogas fra danske ressourcer³.

Termisk forgasning teknologien benyttes til at konvertere den tilgængelige biomasse samt andre mere komplicerede produkter såsom affald, til biobrændstoffer, som kan udnyttes i den grønne omstilling af transportsektoren. Termisk forgasning kan konvertere biomasse og affald til en forgasningsgas, som efterfølgende kan benyttes i forskellige processer, for eksempel i Fischer-Tropsch syntese eller metanol syntese. Til produktion af, for eksempel metanol, kan brint benyttes i processen for at opnå det optimale støkiometriske forhold.

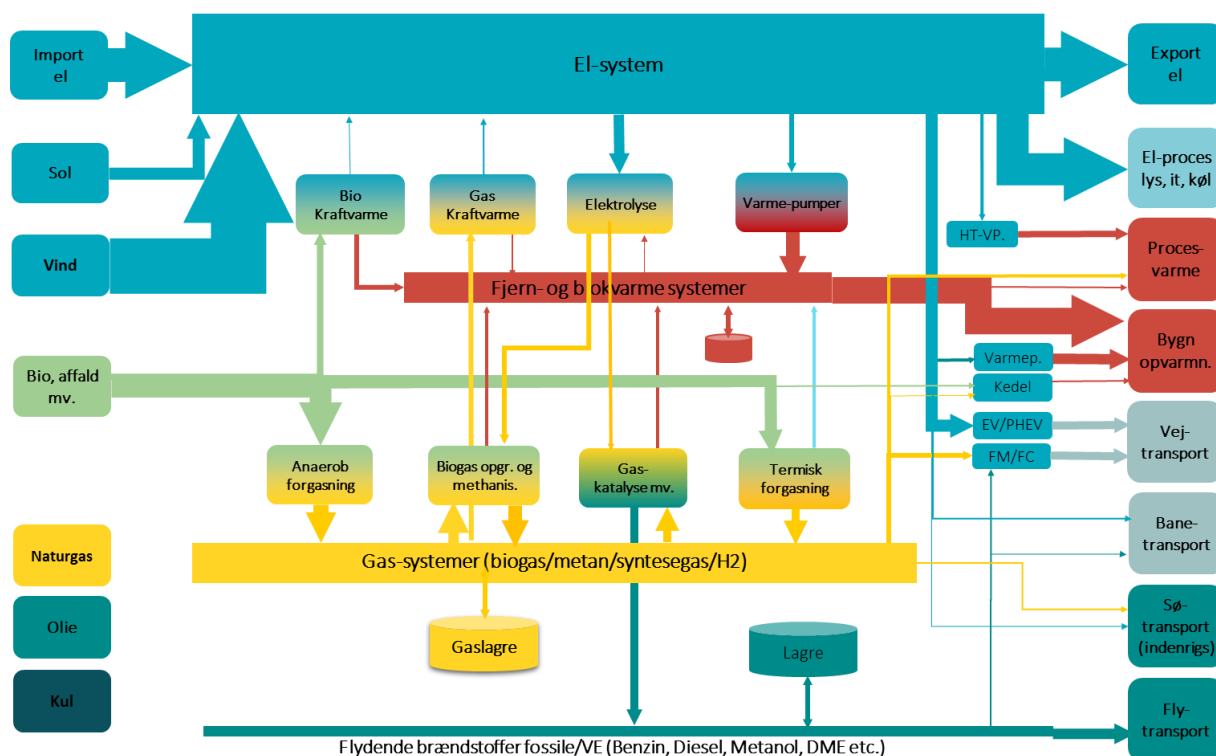
Termisk forgasning skaber koblinger mellem energisektorer

Termisk forgasning kan agere som en integrator for stærkere koblinger mellem energisektorer, hvilket er illustreret ved nedenstående figur.

Termisk forgasning, i sammenkobling med biobrændstof anlæg hvor brint fra elektrolyse udnyttes, forbinder effektivt el-, fjernvarme-, og gassystemet. Dermed kan potentielle gevinster set fra et system perspektiv blive udnyttet effektivt, for eksempel, fleksible produktion af brint som kan hjælpe til at balancere

³ Danmarks energi-forsyning og behovet for biomasse er set i en større sammenhæng ikke afgørende. Men adgangen til national biomasse pr. capita i DK er sammenligneligt med ressourcer opgjort på globalt niveau. Dertil kommer at for den Europæiske omstilling frem mod 2050 er målet at reducere drivhusgas-udledning med minimum 80%. Dette betyder i praksis at der ikke er plads til CO₂-udledning fra energiforbrug, og det Europæiske mål er således sammenligneligt med DK's fsva. energirelateret CO₂-udledning. En analyse af det danske energisystem giver derfor en rimelig vurdering af globale perspektiver for et langsigtet bæredygtigt energisystem.

el-systemet eller udnyttelse af overskudsvarme fra termisk forgasning i fjernvarmenettet.



Systemanalyser af det danske energisystem i Europæisk kontekst (f.eks. ENTSO-E/G scenarier Tyndp18) indikerer, at Danmark med sin placering ved Nordsøen frem mod 2035 potentielt får mulighed for at lave el/bio-baserede brændstoffer til en relativt konkurrencedygtig pris, hvilket blandt andet skyldes muligheden for at udnytte overskudsvarme fra processen til fjernvarme. Der er derved en potentiel gevinst ved at installere et biobrændstofanlæg i områder med stort fjernvarmeforbrug, eller i industriområder hvor højtemperatur varme kan benyttes. Dette understreger ydermere behovet for analyser som dækker hele energisystemet og som tager synergien og koblinger mellem energisektorer i betragtning.

Både det danske og den europæiske elsystem er på vej mod større andele el-produktion som er baseret på varierende vedvarende energikilder, såsom vindkraft og solenergi. I det fremtidige elsystem vil der derfor være et større behov for anlæg, som kan være hurtigt regulerbare og kan producere i perioder med lav produktion fra vindkraft og sol. Gas fyrede anlæg er ideelle i forhold til at kunne yde den nødvendige "service" på en omkostningseffektiv måde (lave in-

vesteringsomkostninger betyder at økonomien for anlæggene kan hænge sammen med færre fulldast timer hvor elprisen til gengæld er høj. Derudover kan et gasfyret kraftværk yde den nødvendige fleksibilitet til el-nettet i form af at kunne være hurtigt justerende). Termisk forgasning er en af mulighederne for at producere VE-gas, som kan benyttes til at producere el i perioder med lav produktion fra vindkraft og sol.

Termisk forgasning er en nøgleteknologi i forhold til at realisere det danske potentiale for, via Power-to-gas (PtG) og bio-ressourcer, at konvertere en del af Nordsø-regionens elproduktion til højværdi brændstoffer. Ydermere, kan produktionen af brint i denne forbindelse fungere som en demand-side/forbrugs-side fleksibilitets mulighed, som betyder at brint bliver produceret når elprisen er lav (jf. ofte pga. stor produktion fra vindkraft og sol), og brintproduktionen stopper i situationer hvor elprisen er høj (jf. ofte når elnettet er presset, pga. lav produktion af vindkraft og sol).

Effektiv udnyttelse af den begrænsede biomasse ressource samt af komplicerede affaldsprodukter

Power-to-gas ud fra el fra vindkraft og solceller kan producere en næsten ubegrænset mængde af hydrogen. Men for at få adgang til nødvendigt kulstof til kulbrinter, er der behov for enten biomasse, affald, CO₂ fra industrielle processer eller CO₂ opfanget fra atmosfærisk luft.

En væsentlig del af den globale/europæiske og nationale biomasse er tilgængelig som ligninholdig biomasse, typisk træ. For at få adgang til denne type biomasse som kulstof bærer for brændstoffer, er termisk forgasning en nøgle-teknologi.

I fremtiden kan nye teknologier komme ind på markedet og dermed blive en konkurrent til termisk forgasning. Teknologi til indsamling af CO₂ fra atmosfærisk luft (Direct air capture) kan potentielt være en substitution for termisk forgasning som kulstofkilde ved produktion af kulstofholdige brændstoffer. "Direct Air Capture" har dog med nutidens teknologier et prohibitivt højt energiforbrug for en storskala anvendelse af denne teknologi ved produktion af grønne kulstofholdige brændstoffer.

Forskning, udvikling og demonstration

En række indsatser er nødvendige for at bane vejen for udvikling af termisk forgasning. Anaerob omsætning af biomasse (biogas) er i dag en relativt moden

teknologi. Der er dog stadig potentiale for markante forbedringer af teknologien og særlig brug af halm som co-substrat til processen kræver en række års udvikling.

Termisk forgasning af biomasse er en relativt moden teknologi, for så vidt angår forgasning af træ, hvor forgasningsgassen indføres i en kedel. Men behandling af forgasningsgassen således, at det bliver en rensset syntesegas uden partikler, tjærestoffer mv. er stadig på et relativt lavt teknologi-udviklingsniveau (TRL). Dette rensningstrin er helt afgørende for at kunne bruge syntesegassen til produktion af brændstoffer (metanol, metan, DME, syntetisk. benzin og syntetisk diesel). Tilsvarende er der brug for forskning i konvertering af både forgasningsgas og tjære/ bioolie til transportbrændsler. Det bør derudover sikres at overskudsvarme fra produktionen kan udnyttes fuldt ud.

En del restbiomasse og affaldsfraktioner afbrændes i dag, primært med høj varme produktion som resultat. For at kunne mindske importen af biomasse og producere gas, transportbrændsler eller el med høj virkningsgrad og fleksibilitet, vil det være nødvendigt at udvikle forgasningsanlæg der kan håndtere disse brændselstyper.

Det er også nødvendigt at fokusere på at teknologien bliver driftssikker og konkurrencedygtig set fra et økonomisk perspektiv, ideelt set både i stor og mindre skala, hvilket vil kunne tillade anvendelse af flere lokale typer biomasse uden høje omkostninger til transport af biomassen.

Endeligt er der et interessant potentiale i at udnytte termiske forgasningsanlæg til CO₂ fangst og til at CO₂ kan lagres i koksresten fra den kun delvist forgasset biomasse som derefter returneres til jorden, samt til rensning af fx spildevandsslam mht. forurening fra tungmetaller.

Der er derfor behov for en målrettet FUD-indsats for at gøre teknologien moden til at realisere potentialet i perioden efter 2030.

Bilag 6 - Bidrag fra Frichs

Potentialet for termisk forgasning

Dette notat tager udgangspunkt i en virkelig proces, altså hvor et kommercielt anlæg producerer pyrolysegas og biochar.

Gas og biochar fra et anlæg til termisk forgasning

Grundlaget er en 12-timers test af et anlæg, der omsætter tørret spildevandsslam. Spildevandsslammet til den aktuelle test var desuden afgasset.

Under testen blev der taget prøver af dels den producerede gas, dels af restproduktet.

Selve anlægget er nyudviklet i konstruktion og til dels virkemåde, og det aktuelle anlæg er det første af sin art i industriel skala. Anlægget er solgt til Kina og er nu monteret hos kunden. Man må formode, at eksportpotentialet for anlæg til termisk forgasning er stort. Der mangler dog ofte de nødvendige økonomiske midler til udvikling og optimering.

Testen og beregninger på baggrund heraf viste, at reaktoren kan fødes med mere end 5400 kg tørret råmateriale i døgnet, samtidig med at reaktoren vil være i stand til at omsætte næsten 6000 kg tørret råmateriale i døgnet. En mindre del af den producerede gas blev brugt til at holde reaktoren oppe på 800 °C. Den producerede gasmængde udgør ca. 200 m³ pr. ton råmateriale. Heraf går ca. 10 % til opvarmning af reaktoren. I tidligere forsøg med afgasset og tørret spildevandsslam er der opnået op til ca. 250 m³ gas pr. ton råmateriale. Oprindelsen af råmaterialet har dog været en anden i det aktuelle tilfælde. I et forsøg med ikke afgasset (men stadig tørret) spildevandsslam blev der produceret en mængde, der svarer til ca. 490 m³ pr. ton råmateriale.

Sammensætning af gas¹⁾ omdannet fra afgasset og tørret spildevandsslam

Værdierne i tabel 1 viser, at selv om spildevandsslammet var afgasset i forvejen, udgør brændbare gasser stadig mere end 80 % af gassen. Det indikerer, at der er et vist potentiale i at viderebehandle afgasset spildevandsslam. Den øvre brændværdi af gassen er beregnet til 21,29 MJ/Nm³.

Sammensætning	Mol-%	Kogepunkt (°C)
Methan (CH ₄)	27,65	−258,7
Ethan (C ₂ H ₆)	1,91	−88
Ethen (C ₂ H ₄)	4,27	−103,8
C3	0,119	− 43 (kun propan)
C4	0,018	− 0,5 (kun butan)
Benzen (C ₆ H ₆)	0,013	+80,4
Hydrogen (H ₂)	23,21	−253
Carbonmonoxid (CO)	23,71	−192
Carbondioxid (CO ₂)	15,48	−78,5
Nitrogen (N ₂)	2,69	−196
Oxygen (O ₂) + argon (Ar)	0,38	O ₂ : −183; Ar: −186
Svovlbrinte (H ₂ S)	0,56	−60

¹⁾ Analyser udført af Dansk Gasteknisk Center, DGC.

Tabel 1. Sammensætning og kogepunkter af produceret gas fra testen..

Mere end 0,5 % af gassen består af svovlbrinte, hvilket er forventeligt med et råmateriale som dette. Svovlbrinte – især i denne koncentration – ødelægger motorer og skal derfor fjernes, hvis der skal være en fremtid i anvendelsen. Der eksisterer flere måder at gøre det på, lige fra filtrering over oxidation til reaktion med metal-ioner. En test på fjernelsen af svovlbrinte er ikke blevet udført, og det aktuelle anlæg omsætter spildevand fra en industriel produktion, der må formodes ikke at indeholde svovl. Beskrivelser af analyser og anvisninger af de eksisterende metoder kan findes mange steder i litteraturen (se f.eks. Eliassen og Kvist (red.), 2015).

Kogepunkterne, der er vist i tabellen, kan give en ide til mulige metoder til at separere gasserne.

Sammensætning af dannet biochar sammenlignet med råmateriale

Både råmaterialet og den producerede biochar er blevet analyseret og det generelle resultat er, at det indeholder stort set alt, hvad man leder efter. Da råmaterialet kommer fra forskellige kilder, er det ikke overraskende.

Analyserne er opdelt i en uorganisk og hovedsagelig organisk del. Selv om der findes ilt både i råmaterialet og i restproduktet (visse analyser fandt op til 19 vægtprocent i biocharen og op til 18 vægtprocent i råmaterialet), er der ikke analyseret for ilt her.

Den organiske del er analyseret ved hjælp af en CHNS-analyse, mens den uorganiske del er analyseret ved hjælp af XRF (røntgenfluorescens). CHNS-analysen blev udført ved 1150°C, så en mindre del af den uorganisk bundne C, H, N og S kan også være målt med her.

Prøve	C (w %)	H (w %)	N (w %)	S (w %)	Total
Råmateriale	31,46	4,381	4,60	1,576	42,0
Produkt_1h	20,12	0,878	2,03	1,987	25,0
Produkt_6h	22,02	0,796	1,80	2,097	26,7

Tabel 2. Resultater af CHNS-analyser.

Tallene i tabel 2 indikerer, hvad man kan forvente, nemlig at andelen af carbon og hydrogen falder under processen. Normalt vil der altid være noget carbon tilbage i biocharen som følge af underskud af hydrogen i råmaterialet.

Men i dette tilfælde ser det ud til, at der stadig kan dannes brændbare gasser. Her er vi ved at udvikle en teknik, der kan trække den sidste rest af gas ud af biocharen, selv når der ikke er mere hydrogen til stede. Dette vil kun forøge potentialet i metoden.

Efter 6 timer er der kun sket en lille forandring, hvilket ikke overrasker, da biocharen nu består af nyligt omdannet materiale.

Prøve	Fe	Ca	Si	P	Al	S	K	Ti	Cl	Zn	Mn	Ba	Sr	Cu
Råmateriale	4,536	3,144	2,783	2,584	1,446	1,281	0,4739	0,4739	0,243	0,09106	0,05184	0,04733	0,02528	0,02085
Produkt_1h	9,767	6,815	6,82	5,702	3,898	1,847	1,019	0,6769	0,3048	0,1906	0,1098	0,1081	0,05557	0,04508
Produkt_6h	9,507	6,568	6,592	5,39	3,613	1,825	0,9908	0,6615	0,2461	0,1886	0,1065	0,1119	0,05518	0,04345

Tabel 3. Resultater af XRF-analyser på uorganiske grundstoffer i materialet.

Tabel 3 viser atomare procenter af en række uorganiske grundstoffer i slammet. Det mest karakteristiske træk er, at den procentvis andel af hvert grundstof stiger i den første time af testen. Det skyldes omdannelsen af organiske stoffer, som der derfor bliver mindre af (jf. tabel 2). Efter 6 timer er der

kun sket en lille forandring. Den lille forandring antyder, at råmaterialet ikke er homogent med hensyn til stofsammensætning.

Konklusion

Testen har vist, at der er stort potentiale i termisk forgasning af spildevandsslam. Når man tager i betragtning, at der trods afgasning af råmaterialet alligevel blev produceret ca. 200 m³/ton, og der sandsynligvis kan udvindes mere, og sammenholder det med de fordele der er nævnt under afsætningspotentialet, er det en teknologi, der er værd at udbygge i fremtiden.

Afsætningspotentiale

Ovenstående er det vist, at man ved termisk forgasning kan udvinde yderligere energi af afgasset spildevandsslam. Herudover har man den fordel, at den biochar, der kommer ud af processen, er fuldstændig rensset for mikroplast og evt. sygdomsfremkaldende bakterier og lignende.

Den spildevandsslam, man kører ud på markerne i dag, har typisk et tørstofindhold på mellem 25 og 30 procent. Det betyder store transportomkostninger for at komme af med slammet. Ved at anvende termisk forgasning, hvor man ender med at have et tørt produkt til bortskaffelse, kan man reducere den mængde, der skal håndteres med 80-85 %. Det betyder væsentlige besparelser på transportomkostningerne.

Ved at tage slammet ud af rådnetankene eller biogasanlæggene tidligere, end man gør i dag, og køre slammet gennem et termisk forgasningsanlæg, vil man samtidig kunne få en væsentlig forøgelse af kapaciteten på eksisterende rådnetanke eller biogasanlæg uden at skulle foretage yderligere investeringer i disse.

Med baggrund i ovennævnte burde både eksisterende og nye rensningsanlæg overveje, om ikke termisk forgasning burde være en integreret del af teknologien på rensningsanlæggene

Bilag 7 - Udsagn fra workshop

Notat om kommentarer og tilbagemelding fra deltagere i workshop den 27. april 2017 på DTU Risø Campus

Nedenfor er oplistet et uddrag af de bemærkninger, som fremkom ved workshopen, både ved indlæg og ved den efterfølgende diskussion. De er i en mere eller mindre tilfældig rækkefølge uden sammendrag eller redigering.

- Forskningsbehov for at fjerne knasterne på teknikområdet fra allerede gennemførte forgasningsprojekter i DK.
- Større sammenhængskraft i budskab om forgasningsgas fortræffeligheder.
- Fokus på forgasningsgas ud fra et miljø-, gødskning- og energimæssigt synspunkt og ikke kun ud fra en enkel parameter. Herunder et mere konkret billede af hvad kan forgasningsgas bruges til og de synergieffekter der mellem fx brændstof, gødningsværdi og lagring af kulstof (jordforbedring) osv. **Få det fortalt!**
- Fokus på, hvor det giver mening at anvende forgasningsgas for derefter at målrette sin forskningsindsats den vej.
- Der burde skeles til skabelon for strategi, som Partnerskab fra Brint og Brændselsceller har udarbejdet.
- I den forbindelse skal der gives bidrag til ENS Teknologikatelog, da nuværende udgave trækker på løsninger i forskellige retninger
- Behov for en forretningsudvikling og business case, der kan tiltrække store aktører (DONG, E.ON osv.) gerne med tråde til internationale projekter; vurdere strategi fra Tyskland og Sverige.
- Projekterne skal vurderes ud fra frie markeds kræfter, og de aktører, der går ind i projekterne, skal vurdere den risiko, der er i forgasningsgas projekter.
- Strategi for PTF skal være funktionsneutral og fleksibel både med hensyn til produktion og forbrug af forgasningsgas.
- ”Polygeneration” kan det være svaret på om ”Kraftvarmeløsningen er død?”
- Forgasningsgas skal bruges til SNG eller som transportgas/diesel.

- Miljørelateret så klimagevinst bliver synlige, herunder jordforbedring
- DME og metanol er billigere og har højere virkningsgrad end Fischer-Tropsch (FT).
- Bio-SNG skal ikke konkurrere med biogas, men skal indgå i synergi.
- For danske forhold er det vigtigt at fokusere på "economy of number" i stedet for på "economy of scale".
- Der **skal** ske en udvikling af forgasningsteknologier, før de kan konkurrere.
- En forgasning af halm/slam-blanding giver meget bedre P/N-forhold i aske/biochar end ved forgasning hver for sig.
- Strategikataloget skal være så konkret, at resultatet kan bruges i stedet for teknologikataloget; hvad kan de forskellige teknologier tilbyde?
- Det er vigtigt at lægge vægt på anvendelse af den lokale biomasse i Danmark, der ikke skal leveres med skib til havne.
- Danske leverandører af flis kan levere til KV-værker og har masser af flis at levere. Faste og kontinuerlige leverancer og aftag er vigtige for flisleverandører.
- Biochar kan føres tilbage til både marker og skov som gødning og jordforbedring.
- Hvilke forgasningsteknologier skal der sættes på? Affaldsforgasning? FT? Andet? Der er stor uenighed om, hvilke teknologier der er bedst.
- Teknologikataloget bør ses efter i sømmene (vedrørende forgasning)
- Der er ikke mange aktører, og der er behov for større (internationale) aktører, som f.eks DONG og EON.
- Ingen ser ud til at være villige til at tage en risiko.
- Det er **nu**, der skal opstilles store (demo/kommercielle) forgassere med det fremtidige mål som fokus. Ellers bliver det for sent.
- Det må være bedre at købe danske ressourcer end fx fra Rusland.
- Energikommisionen siger: det skal være teknologineutralt, hvilke **funktioner** har gassen?
- Selve forgasseren må ikke være ret meget dyrere end en kedel.