

Technical University of Denmark



## Bioenergi kan støtte bæredygtig landbrugsproduktion

**Hauggaard-Nielsen, Henrik; Østergård, Hanne**

*Published in:*  
Robust og bæredygtig bioenergi

*Publication date:*  
2012

*Document Version*  
Også kaldet Forlagets PDF

[Link back to DTU Orbit](#)

*Citation (APA):*  
Hauggaard-Nielsen, H., & Østergård, H. (2012). Bioenergi kan støtte bæredygtig landbrugsproduktion. I T. Skøtt (red.), Robust og bæredygtig bioenergi: Biomasse i fremtidens danske energisystem (s. 18-19). BioPress.

## DTU Library

Technical Information Center of Denmark

---

### General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.



# Robust og bæredygtig bioenergi

# Indhold



**4** Robust og bæredygtig bioenergi

**6** Regulering og tilskud styrer udbredelsen af nye teknologier

**8** At høste solen – optimal udnyttelse af arealerne.



**12** Bioenergi kan gøre energisystemet fleksibelt

**15** Solens energi kan omdannes mere effektivt til biomasse



**18** Bioenergi kan støtte bæredygtig landbrugsproduktion

**20** Tang som bæredygtig energikilde

**22** Miljøvurdering af gylleteknologier

**Robust og bæredygtig bioenergi** er en samling artikler om nye, spændende teknologier til produktion af bioenergi, der har modtaget støtte fra danske forskningsprogrammer. Publikationen er udarbejdet i forbindelse med et seminar om emnet, der bliver afholdt den 5. december 2012.

**Ansvarshavende redaktør:**  
Journalist Torben Skøtt

**Layout:** BioPress

**Tryk:** CS Grafisk

**Forsidefoto:** BioPress

**Redaktionen sluttet:**  
Den 14. september 2012

**Oplag:** 3.500 stk.

**Publikationen kan downloades fra:**  
[www.biopress.dk](http://www.biopress.dk)

**24** Oparbejdning af næringsstoffer i gylle

**26** Optimering af energiudbytte og næringsstoffer fra gylle

**28** Optimering af biogasprocessen

**30** Det intelligente energisystem

**32** Biomasse til transportsektoren

**34** Inbicon: Fra mark til marked

**36** REnescience: Fra affald til afkast

**38** Pyroneer: Fra besværlig biomasse til grøn gas

**40** Fra organisk affald til olie

**43** Testanlæg til fremstilling af bioolie





Foto: Claas

# Robust og bæredygtig bioenergi

Produktion og anvendelse af bioenergi indgår i strategien for det danske energisystem frem til 2050. Væk skal fossil energi, og ind skal sol, vind og biomasse. I denne publikation kan du læse mere om, hvordan vi kan anvende biomasse i fremtidens danske energisystem på en robust og bæredygtig måde.

Af *Sven G. Sommer og Poul Erik Morthorst*

Verden står over for en ny energipolitisk tidsalder, fordi de fossile energikilder udtømmes, og fordi forbrænding af fossile energikilder medfører global opvarmning. Svaret på udfordringen fra den danske regering og et bredt flertal i Folketinget er en ambitiøs langsigtet målsætning om at gøre Danmark uafhængigt af fossile brændsler i 2050.

Anvendelse af bioenergi og konceptet om den biobaserede økonomi indgår i FORSK2020, som er grundlaget for prioriteringen af den strategiske forskning i Danmark. Den danske regering ønsker også, at Danmark skal bidrage til EU's ambitiøse målsætning om at reducere udledningen

af drivhusgasser med 30 procent inden 2020.

I det 21. århundrede skal behovet for energi opfyldes med nye grønne teknologier. Det skal være bæredygtigt, så kommende generationers muligheder for anvendelse af bioenergi ikke begrænses, og der skal være tale om robuste løsninger i forhold til forsyningssikkerhed, omkostninger og energiokonomi.

Målsætningen om at gøre Danmark uafhængigt af fossile brændsler kan opfyldes ved at reducere forbruget af energi og ved at omstille energiforsyningen til vind, sol og bioenergi. Vind og sol forventes at blive storleverandør af energi i midten af århundredet. Biomasse og organisk affald vil bidrage med en tredjedel af energiforsyningen, og det vil være en vigtig for-

udsætning for at kunne skabe et stabilt energisystem, hvor der er balance mellem udbud og efterspørgsel.

## Bioenergi

I Energiforliget fra 2012 har politikerne besluttet, at der skal udarbejdes en egentlig biomassestrategi i forhold til energi- og transportformål. En bæredygtig og robust biomassestrategi skal omfatte anvendelse af biomasse i bred forstand, fordi biomasse er en knap resurse, hvor efterspørgslen forventes at stige i fremtiden. På den korte bane, det vil sige frem til 2020, forventes bioenergien at bidrage med to tredjedele af den grønne energi i EU-landene.

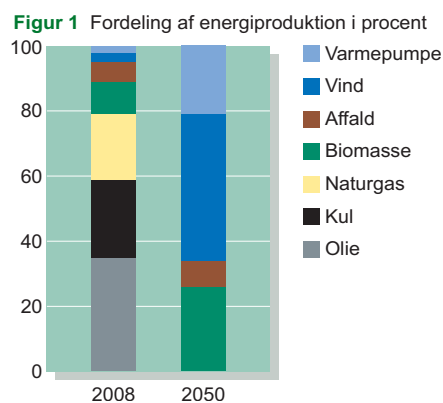
I Danmark og i EU forventes er stor del af den vedvarende energi at komme fra biomasse i form af bionedbry-

deligt affald, træ, halm og husdyrgødning (se figur 1 og 2). Forsyning af transportsektoren med vedvarende energi er en af de vanskeligste nødder at knække, og her skal bioenergi i form af bioethanol, biodiesel og andre flydende biobrændstoffer erstatte ti procent af benzin- og dieselforbruget i 2020.

I nærværende publikation fremgår det af artiklen "Regulering og tilskud styrer udbredelsen af nye teknologier", at anvendelse af organiske affaldsprodukter og husdyrgødning til energiproduktion også er styret af miljøhensyn. Slutproduktets anvendelighed og kategorisering som affald eller biomasse er af afgørende betydning for, om energiproduktionen kan blive økonomisk rentabel.

Der er en forventning om, at nye grønne energiteknologier reducerer udledningen af drivhusgasser og er miljøvenlige. Det kræver, at bioenergien ses i en større sammenhæng, hvor man ser på den totale fortrængning af drivhusgasser, og i hvor høj grad værdifulde stoffer genanvendes.

Majs er for eksempel et udmærket foder til de metanproducerende bakterier i et biogasanlæg, men energiproduktionen reducerer ikke udledningen af drivhusgasser væsentligt, fordi der sker udslip af metan fra gasmotorer og fra lagre med afgasset biomasse. Ved biogasanlæg føres næringsstofferne tilbage til landbrugsjorden, men ved afbrænding af biomasse vil næringsstofferne ved visse anlæg gå tabt, mens andre teknologi-



Klimakommissionens bud på, hvordan energiforsyningen vil ændre sig i perioden fra 2008 til 2050.

## Det Strategiske Forskningsråd

Det Strategiske Forskningsråd ønsker, at:

- de udviklede teknologier kan bidrage væsentlig til nye arbejdspladser i Danmark og til opfyldelse af regeringens målsætninger på energiområdet.
- Danmark på udvalgte områder er globalt førende både med hensyn til produktion af biobaseret og miljøvenlig energi-teknologi.
- danske forskere fortsat kan matche de bedste på verdensplan.

er åbner mulighed for at næringsstofferne kan genbruges.

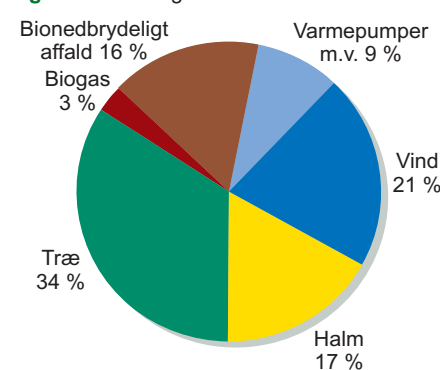
### Forskningen

Forskningen i bioenergi drejer sig især om at anvende restprodukter som bioaffald, halm, træ og husdyrgødning til energiformål, men der forskes også i energiafgrøder, ligesom der forskes i alger fra havet for på den måde at øge produktionen af biomasse.

Forskning i at omdanne biomasse til energi har fokus på forbrænding og forgasning, biogasproduktion og produktion af flydende biobrændstoffer. På den måde understøtter Det Strategiske Forskningsråd og andre offentlige programmer den danske energi- og miljøpolitik.

Der er støttet projekter, hvor målet er at udvikle teknologier som kan øge energibærerens anvendelighed. Det kan for eksempel være projekter, der sigter mod at omdanne metangas til

**Figur 2** Fordeling af VE i 2010



Fordeling af vedvarende energikilder i 2010, hvor cirka 20 procent af det danske energiforbrug blev dækket af vedvarende energi.

metanol, der kan anvendes som brændstof i forbrændingsmotorer og brændselsceller. Udvikling af energikonverterere og motorer, der effektivt kan anvende bioenergien, er også støttet, og endelig er der givet penge til projekter, som sigter mod at integrere bioenergi i intelligente energisystemer (se figur 3).

### Restprodukterne har værdi

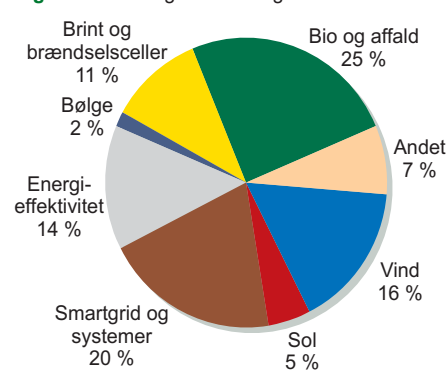
Bioenergi er dyrere end fossil energi, men økonomien kan blandt andet forbedres ved at udvikle teknologier, hvor restprodukterne har en værdi som foder, gødning og jordforbedring. En tankegang der støttes af The Copenhagen Declaration for a Bioeconomy in Action, der anbefaler, at værdikæderne ved håndtering skal tages i betragtning for at sikre en fornuftig økonomi i anlæggene.

Det Strategiske Forskningsråd ønsker at fremme samarbejde med BRIK-landene og andre vækstlande. Siden 2009 har bioenergi været med i fire opslag om dansk-kinesisk forskningssamarbejde på energiområdet finansieret af kinesiske og danske fondsmidler, og der er indgået samarbejdsaftaler om energiforskning med Brasilien og Sydkorea.

*Sven G. Sommer er professor ved Institut for Kemi-, Bio- og Miljøteknologi på Syddansk Universitetet.*

*Poul Erik Morthorst er professor ved DTU Management Engineering og formand for Det Strategiske Forskningsråd programkomite for bæredygtig energi og miljø.*

**Figur 3** Fordeling af forskningsmidler fra DSF



Fordeling af i alt 1,2 milliarder kroner fra Det Strategiske Forskningsråds programkomite for bæredygtig energi og miljø i perioden 2004 - 2011.

# Regulering og tilskud styrer udbredelsen af nye teknologier

Mange nye teknologier til håndtering af husdyrgødning er ikke økonomisk bæredygtige. Udbredelsen afhænger derfor af tilskudsordninger og lovgivningen, men hvis ikke lovene udvikler sig i samme takt som teknologierne, opstår der problemer. Et eksempel er produktion af gyllefibre, der typisk defineres som affald, og hvor myndigheder stiller så skrappe krav, at der ikke kan skabes økonomi i anlæggene.

*Af Bent Ib Hansen, Marieke ten Hoeve & Sven G. Sommer*

Handelsgødning og fossil energi er så billigt, at det er vanskeligt at skabe et gennembrud for nye teknologer, hvor produktionen er baseret på husdyrgødning. Udnyttelse af det enorme potentiale, der ligger i husdyrgødning, er derfor afhængig af tilskudsordninger, og hvordan myndighederne definerer produkterne i henhold til lovgivningen.

Ved afbrænding eller termisk forgasning af husdyrgødning produceres restprodukter. Miljømyndigheder, teknologudviklere og landbrugere har haft en længere diskussion om, hvordan man skal definere produkterne i forhold til lovgivningen. Man er enige om, at miljøproblemer ved håndtering af husdyrgødning skal løses ved at få den størst mulige nytte af gødningen. Derfor skal energiteknologier til husdyrgødning udvikles, så de ikke forurener, og så der ikke mistes vigtige planteneringsstoffer.

Udfordringen er, at myndighederne ved afbrænding kræver dyre online målinger og skrappe emissionskrav af en række miljøskadelige stoffer. Derfor er det for tiden kun muligt at afbrænde husdyrgødning på store centrale anlæg, mens landmændene gerne vil kunne brænde husdyrgødning decentralt. Således har det store Måbjergværk ved Holstebro tilladelse til at brænde fiberfraktionen fra bio-

gasanlæg, mens firmaet Samson Bi-matech ikke fik godkendt deres decentrale anlæg til forbrænding af fiber.

I modsætning hertil har de irske myndigheder godkendt et ristefyret forsøgsanlæg, som afbrænder gyllefiber og hønsemøg. Anlægget er blandt andet solgt i både Korea og England, hvor de enkelte anlæg overvåges fra Irland. Det er dog tvivlsomt, om anlægget kan overholde kravene i EU's affaldsdirektiv.

I Holland verserer den samme diskussion som her. Derfor indleder vi med en omtale af, hvordan hollænderne håndterer udfordringerne med gødning fra en stor husdyrproduktion.

## Hollandske erfaringer

I Holland anvendes 50 procent af gødningen på gården med husdyr, 28 procent benyttes på andre gårde, 15

procent eksporteres, mens de sidste 8 procent viderebehandles.

Viderebehandlingen foregår på centrale anlæg, hvor 33 procent forbrændes, 23 procent omdannes til gødningspiller og eksporteres, mens 24 procent bliver komposteret og anvendt som gødning og til dyrkning af svampe.

Siden 1984 er anvendelse af husdyrgødning fra svine- og fjerkræproduktionen blevet reguleret, og i 1991 blev EU's nitratdirektiv ratificeret med en lovgivning, der revideres hvert fjerde år. I dag må der på ejendommen anvendes 170 kg kvælstof/hektar i husdyrgødning og 250 kg kvælstof/hektar, hvis afgrøderne er kvælstofkrævende.

Allerede i dag er der 2,5 procent for meget fosfor i produktionen, og derfor eksporteres en del af gødnin-



Foto: Torben Skott/BioPress

*Separering af afgasset biomasse på et fælles biogasanlæg i Fangel syd for Odense. Den flydende fraktion køres tilbage til andelshaverne, mens den faste fraktion bliver afsat til plantevlere i nærområdet.*

gen under nøje overvågning. Ved lastning af gylletankvognene udtages gylleprøver til analyse, og tankvognene er forsynet med GPS, så man kan dokumentere, at gyllen køres til en slutbruger. Fosforoverskuddet forventes at stige til otte procent i 2015 som følge af skærpede krav. Overskud skyldes import af fosfor i foder og handelsgødning, og det er planen, at genanvendelse skal løse problemet.

Råfosfat er en begrænset resurse, som plante- og husdyrproduktionen er totalt afhængig af. Dertil kommer, at 80-90 procent af de kendte fosforressurser findes i Marokko, der er et politisk ustabil land, og det kan give problemer med forsyningsikkerheden. Det hollandske miljøministerium støtter derfor en virksomhedsplatform, som indsamler, bearbejder og distribuerer nye såkaldte sekundære handelsgødninger, og hvor én af metoderne er afbrænding med efterfølgende genanvendelse af fosforen.

EU-lovgivningen er imidlertid en barriere for udviklingen, for et produkt, der én gang har været husdyrgødning, vil altid defineres som husdyrgødning eller bioaffald. Det betyder, at de sekundære handelsgødninger ikke kan formidles eller sælges. For tiden agiterer hollænderne i EU for, at husdyrgødning kan defineres som et råstof, og gødningsprodukter fra husdyrgødning er handelsgødninger. Det vil betyde, at husdyrgødning kan fjernes, anvendes til energiproduktion og gødningsproduktet tilføres afgrøden som handelsgødning.

### Husdyrgødning eller affald

Ifølge miljøbeskyttelsesloven § 73 b må husdyrgødning udbringes som gødning på markerne, når bare de almindelige gødskningsregler overholdes. Ønskes husdyrgødning eller separeret gyllefibre brugt til andet formål, bliver det straks til affald. Det skyldes, at affald ifølge lovgivningen er defineret som: "Ethvert stof og enhver genstand, som indehaveren skiller sig af med, agter at skille sig af med eller er forpligtet til at skille sig af med."

På det grundlag vurderer den danske miljøstyrelse, at husdyrgødning, der forbrændes, defineres som affald, da indehaverens primære formål er at



Foto: Torben Skøtt/BioPress

*Måbjergværk ved Holstebro er et af de få anlæg, der har tilladelse til at brænde fiberfraktionen fra biogasanlæg.*

skille sig af med gødningen. Det omfatter også fraseparerede fiberfraktioner, piller, briketter eller tilsvarende, som kan produceres af husdyrgødningen, og som efterfølgende forbrændes.

### Krav til anlæg

Når husdyrgødning er defineret som affald, skal det anlæg, som forbrænder disse fraktioner (omfatter også pyrolyse), miljøgodkendes efter Forbrændingsbekendtgørelsens regler. Det omfatter blandt andet dyre online-målinger af en række miljøskadelige stoffer.

Dog er det ifølge affaldsdirektivet artikel 6 stk. 1 muligt at oparbejde affald i en grad, så det ophører med at være affald, når det har gennemgået en nyttiggørelsesoperation. Det kan for eksempel være genanvendelse af fosfor fra husdyrgødning under forudsætning af, at brugen af stoffet ikke har generelt negativ indvirkning på miljøet eller menneskers sundhed. Ved en sådan afklassificering skal miljømyndigheden også vurdere miljøforholdene under forarbejdningsprocessen.

Der foregår for tiden en debat med Miljøstyrelsen om, hvilken dokumentation der skal foreligge, for at styrelsen på et fagligt grundlag vil kunne

afklassificere husdyrgødning som værende omfattet af affaldsdirektivet, så man vil kunne undgå at udføre de dyre onlinemålinger.

### Mulige tilskud

Ved brug af vegetabilsk biomasse til elproduktion gives der i Danmark et tilskud på 15 øre per kWh i tilskud samt fritagelse af varmeafgift svarende til 16-17 øre per kWh.

Gyllefibre er ifølge bekendtgørelse om biomasseaffald under miljøbeskyttelsesloven defineret som ikke organisk affald, og er derfor ikke omfattet af tilskudsreglerne til brug af vegetabilsk biomasse. Dog er forbrænding af frasepareret gyllefibre efter bioforgasning fritaget for varmeafgiften.

*På hjemmesiden Cleanwaste.dk kan man finde referencer til lovgivning og artikler refereret i denne artikel*

*Bent Ib Hansen er chefkonsulent ved Videncenter for Svineproduktion.*

*Marieke ten Hoeve er PhD-studerende ved Institut for jordbrug og økologi på Københavns Universitet.*

*Sven G. Sommer er professor ved Institut for Kemi-, Bio- og Miljøteknologi på Syddansk Universitetet.* ■



# At høste solen

## – optimal udnyttelse af arealerne

Foto: Claas

Det er nødvendigt at indføre kriterier for bæredygtighed, hvis vi skal skaffe energi, foder og fødevarer til ni milliarder mennesker. Bæredygtighed bliver ofte vurderet ud fra begreber som LUC og ILUC, men modellerne er utilstrækkelige, og man risikerer at tage beslutninger, som har den modsatte effekt af, hvad man ville opnå.

*Af Claus Felby & Niclas Scott Bentsen*

Vi bruger solens energi til at lave fødevarer, materialer og energi, men for at kunne udnytte solindstrålingen til planternes fotosyntese kræves store arealer.

Når et areal skifter anvendelse fra for eksempel fødevarer til energiproduktion

eller kombinationer heraf, vil der være en række faktorer, som påvirkes. Den tidligere vegetation og mængde af kulstof i jorden kan blive omsat og dermed frigive CO<sub>2</sub>, eller der kan ske afledte effekter, som påvirker helt andre arealer, og på den måde bidrager til udslip af klimagasser. Omvendt kan der være modsat-

rettede effekter ved øget produktivitet og ændret afgrødevalg, som bidrager til at reducere CO<sub>2</sub>-udledningen.

Disse påvirkninger går under betegnelsen "land use change", og har været et af de mest omdiskuterede emner inden for bioenergi. Der skelnes mellem "direct land use change" (LUC) og "indirect land use change"

(ILUC). Sidstnævnte indgår som en del af certificeringen af biobrændstof-fer i Californien, og for øjeblikket forsøger EU at finde ud af, om ILUC og så skal indgå i deres kriterier for bæredygtighed.

Princippet omkring "land use change" gælder for alle arealanvendelser – det være sig fødevarer- og energi-produktion samt byudvikling og vejbyggeri.

Udfordringen består i at måle og kvantificere effekterne af "land use change". Det dækker over sammenhænge mellem arealanvendelse og CO<sub>2</sub>-udledning, planters tilvækst og omsætning, forbrug, efterspørgsel, prissætning med mere. Det er nogle af de mest komplicerede og dynamiske sammenhænge at forstå og beregne konsekvenserne af.

Denne artikel beskriver nogle af forholdene bag "land use change", og hvordan forklaring og forståelse af begrebet har udviklet sig.

### Jordens areal

Landarealet på Jorden er en endelig størrelse på i alt cirka 13 gigahektar. Heraf består knap 12 procent af landbrug, skovene udgør cirka 27 procent, mens savanner og græsstepper lægger beslag på omkring 31 procent. Resten er bjerge, søer, byer, veje med videre.

Menneskets teknologiske udvikling har i høj grad sat sig spor i ændret arealanvendelse. Fra det øjeblik vi begyndte at drive landbrug, har vi ændret skove og græsstepper til marker. I dag lægger det direkte landbrug med afgrøder beslag på godt 1,5 gigahektar. Dertil kommer det areal, der anvendes til afgræsning af husdyr, så det samlede landbrugsareal når op på over fire gigahektar.

Men vi er også blevet bedre til at udnytte arealet. I slutningen af 1900-tallet fandt man, at landbruget ikke kunne brødføde mere end halvdanden milliarder mennesker. Så kom kunstgødningen, den grå Ferguson og den grønne revolution, og i dag brødføder landbruget syv milliarder mennesker.

Men der er selvfølgelig en grænse for, hvad der er plads til, og i flere tilfælde kan vi se, at landbrugsproduktionen nærmer sig denne grænse.

Samtidig stiger vores globale forbrug, og det giver et yderligere pres på klodens arealer, så det er nødvendigt med en bedre forståelse af "land use change" for at sikre en bæredygtig udvikling.

### LUC

Den direkte effekt af "land use change" (LUC) kan umiddelbart måles. Konverteres et areal fra for eksempel skov til marker, eller ændres udnyttelsen af en skov fra ekstensiv til intensiv drift, vil der umiddelbart ske et udslip af CO<sub>2</sub> ved omsætning af organisk materiale. Det fænomen kaldes "carbon debt", og betyder i praksis, at CO<sub>2</sub>-udledningen fra anvendelse af bioenergi først reduceres, når "gælden" er betalt.

For biobrændstoffer er konverteringen af tropiske tørvemoser til oliepalmer det værste eksempel på "carbon debt", hvor det kan tage århundreder inden CO<sub>2</sub>-udslippet er udlignet. Omvendt vil konverteringen af græssteppe til sukkerrør eller omlægning af våde jorde fra dyrkning af korn til pil have en "carbon debt", som udlignes på mindre end ét år.

Der har været diskussioner af "carbon debt" ved øget udnyttelse af skovarealer, hvor skov til produktion af bioenergi holdes op imod et scenarie,

hvor skoven står urørt hen i 50-100 år. Der er grund til at være skeptisk over for disse beregninger, da de antager, at skoven er helt stabil i en meget lang periode. Erfaringen viser nemlig, at kun meget få skove har en naturlig stabilitet i det omfang, som forudsættes i beregningerne.

### ILUC

De indirekte effekter af "land use change" (ILUC) er langt sværere at måle og kvantificere. ILUC er defineret som de afledte effekter på andre arealer, når udnyttelsen af et areal ændres, og sammenhænge er både biologiske, økonomiske og fysiske.

Umiddelbart vil man mene, at når der bruges én hektar majs til produktion af biogas, så skal den mistede fødevarerproduktion erstattes af et tilsvarende areal andetsteds.

Men sådan er det ikke i praksis. Mindskes udbuddet af majs til mad, stiger prisen, og vores forbrug flyttes typisk over til andre produkter, hvilket reducerer efterspørgslen og dermed prisen. Derudover er der andre faktorer som stigende udbytter, befolkningstilvækst og økonomisk vækst, der på samme tid påvirker størrelsen og arten af det anvendte areal samt priserne på afgrøder/biomasse. ▶

Figur 1 Regionale ændringer i landbrugsareal 2005-2010.

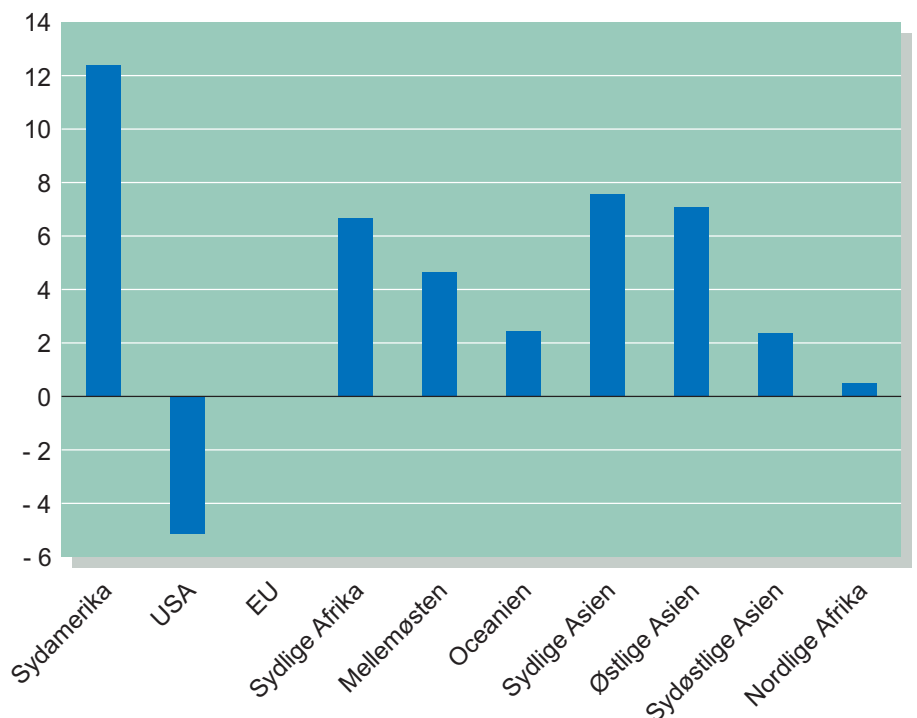




Foto: Claas

ILUC-effekterne ved at anvende majs og hvede til bioethanol ser med de nyeste modeller ud til at være væsentligt reduceret, og kan måske helt elimineres med en yderligere udvikling af foderprodukterne.

### ► Udviklingen i landbrugsarealet

De sidste fem år er det globale landbrugsareal steget med cirka 30 millioner hektar (se figur 1). Det er samtidig en periode, hvor produktionen af 1. generationsbiobrændstoffer er steget kraftigt, men det er også en periode med økonomisk vækst og stigende befolkningstal.

Kigger man nærmere på tallene (tabel 1) så viser det sig, at landbrugsarealet stiger markant mindre end væksten i befolkningen og økonomien. Ydermere er landbrugsarealet faldet i USA, til trods for en voldsom ekspansion af bioethanol fra majs. I samme periode er både produktion og eksport af fødevarer fra USA steget. Umiddelbart virker det i modstrid med teorien bag ILUC, så hvad kan forklaringen være?

Når værdien af landbrugsproduktionen stiger, så øges intensiteten på det enkelte areal, ligesom forædling får udbyttet til at stige med omkring en halv procent om året. Dertil kommer, at proteinprodukter fra 1. generationsbioethanol kompenserer for færdværdien af den majs, som nu bru-

ges til bioethanol. Der er således flere faktorer, som giver en positiv effekt i forhold til ILUC.

Der er selvfølgelig en rent biofysisk grænse for, hvor meget landbruget kan effektiviseres, men for at kunne tage højde for og eventuelt anvende ILUC i certificeringen af biobrændsler er det nødvendigt at kende og kvantificere de kombinerede effekter.

### Modellering af ILUC

Den måde, som ILUC kvantificeres på i praksis, er ikke ved hjælp af specifikke målinger, men ved hjælp af økonomiske modeller, der inddrager en lang række faktorer som:

- udbud og omkostninger for landbrugsareal

- produktivitet af eksisterende og nyt landbrugsareal
- pris- og efterspørgsel
- substitutionseffekter mellem afgrøder og biomasse
- indirekte effekter og substitution af fossile brændsler

Især to modeller kaldet GTAP og FAPRI anvendes i analyse af ILUC effekter.

Modellerne virker ikke ens, og for en given ændring i efterspørgslen på biobrændstoffer kommer de til forskellige resultater i forskellige områder på kloden. Forskellene kan være op til flere hundrede procent. Holdt op imod den reelle udvikling i landbrugsarealet overvurderer de nuværende modeller effekterne af ILUC for blandt andet brugen af majs til 1. generationsbioethanol.

De økonomiske modeller er under stadig udvikling. GTAP-modellen blev anvendt i en artikel om ILUC fra 1. generationsbioethanol publiceret i Science i 2008 af Searchinger et al, og gav dengang anledning til en voldsom debat. Siden er GTAP-modellen blevet yderligere udviklet. Det har be-

Område	Vækst
Landbrugsareal	0,5 procent
Befolkning	1,0 procent
Økonomi	2,3 procent

Tabel 1. Udviklingen i globalt landbrugsareal, befolkning og økonomi i perioden 2005-2010.

tydet, at de estimerede ILUC-effekter er blevet reduceret med omkring en faktor seks i forhold til Searchinger's oprindelige resultat (se figur 2).

Udviklingen af GTAP-modellen skyldes blandt andet, at man har indbygget markedsøkonomiske effekter og befolkningstilvækst. ILUC-effekterne ved at anvende majs og hvede til bioethanol ser med de nyeste modeller ud til at være væsentligt reduceret, og kan måske helt elimineres med en yderligere udvikling af foderprodukterne.

2. generationsbioethanol, der anvender halm eller andre restprodukter, vil umiddelbart ikke have nogen ILUC-effekter, som medfører et stigende areal. Tværtimod kan foderprodukter fra processen medføre, at der er et "negativt" arealforbrug, hvor de indirekte effekter frigiver areal. Det er dog et scenarie, som kun er overfladisk undersøgt.

Der er næppe noget område som er mere komplekst for økonomiske modeller end netop ILUC. Og de forskere, som arbejder med modellerne og deres udvikling, er helt bevidste om, at der forestår et betydeligt arbejde med modellerne, før de kan give et reelt billede af effekterne på arealanvendelser og CO<sub>2</sub>-udledning.

Men netop derfor er der til stadig grund til at arbejde videre med forståelse af ILUC. Kun derved vil man

være i stand til at vælge og udvikle den kombination af teknologi og landbrug, som giver de bedste effekter i forhold til CO<sub>2</sub>-udledning og miljø.

### ILUC som kriterium?

ILUC indgik som element i den californiske "low carbon fuels standard", men siden da er ILUC-effekten løbende blevet revideret og nedskrevet.

Udover det vanskelige i at estimere ILUC-effekter er der også et principielt spørgsmål om, at den enkelte bonde eller skovejager via ILUC bliver holdt ansvarlig for, hvad en tilsvarende bonde og skovejager foretager sig et helt andet sted på kloden. Grundlæggende peger det snarere på et behov for global regulering af arealanvendelse, hvad enten det er fødevarer eller bioenergi, frem for at lade markedsmekanismerne styre udviklingen.

Den nuværende modellering og forståelse af ILUC og "carbon debt" begrebet ved LUC virker ikke tilstrækkelig udviklet til at være en del af bæredygtighedskriterier for biobrændstoffer. Set lidt fra oven skulle man i stedet sætte nogle direkte krav til de former for biobrændstoffer, man vil tillade – alene ud fra deres produktivitet og umiddelbare arealforbrug.

Det ville favorisere de 2. generationsteknologier, som findes. Olieafgrøder til biodiesel har et grundlæggende problem med det lave udbytte

for soja og raps, samtidig med at de trækker den prisbillige biodiesel fra palmeolie ind på markedet. Og netop palmeolie har de største reelle problemer med LUC, da oliepalmerne konkurrerer direkte med tropisk skov.

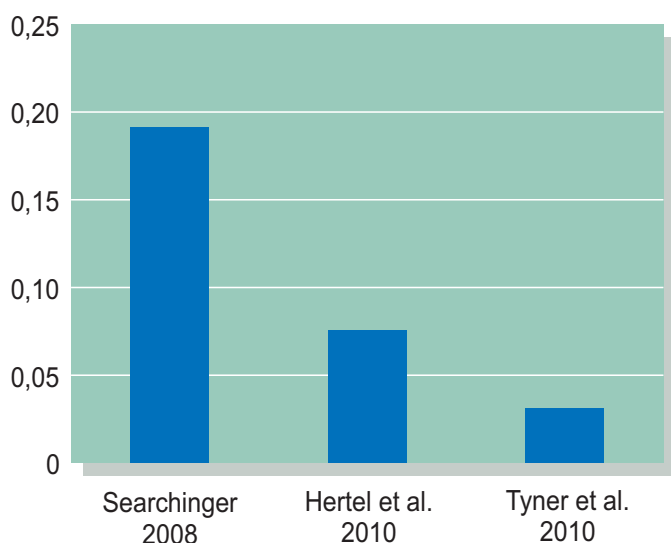
Det betyder dog ikke, at biodiesel fra olieafgrøder helt skal undgås, men arealerne med olieafgrøder ville måske være mere velegnede til andre former for bioenergi. Endelig skal man være bevidst om, at LUC eller ILUC intet siger om generel bæredygtighed, der også indebærer økologisk, social og økonomisk bæredygtighed i den direkte arealanvendelse.

Forståelsen af LUC- og ILUC-effekter ved fødevarer- og energiproduktion kan være vigtige redskaber til at reducere CO<sub>2</sub>-udslippet fra den primære produktion. Men at bruge de nuværende økonomiske modeller som baggrund for politiske beslutninger om bæredygtighedskriterier er i bedste fald utilstrækkeligt. I værste fald risikerer man at tage beslutninger, som har den modsatte effekt af, hvad man egentlig ønsker at opnå.

*Claus Felby er professor ved Københavns Universitet, Det Natur- og Bio-Videnskabelige Fakultet.*

*Niclas Scott Bentsen er fagkonsulent ved Københavns Universitet, Det Natur- og Bio-Videnskabelige Fakultet.*

**Figur 2** ILUC-effekter i hektar per 1.000 liter bioethanol



Udviklingen af de estimerede ILUC-effekter ved GTAP-modellen. Bemærk at effekterne er blevet reduceret med omkring en faktor seks i forhold til det oprindelige resultat.



Foto: Claas

2. generationsbioethanol, som anvender halm eller andre restprodukter, vil umiddelbart ikke have nogen ILUC-effekter, der medfører et stigende arealbehov.

# Bioenergi kan gøre energisystemet fleksibelt

En bæredygtig tilgang til udvikling af bioenergi bør fokusere på fleksibilitet og på at give handlemuligheder til fremtidige generationer. I dag bruges betydelige mængder halm til opvarmning, men set i et lidt længere perspektiv bør anvendelsen af biomasse til varme og til dels også elektricitet have en lavere prioritet sammenlignet med brændsler, kemikalier og materialer.

Af Niclas Scott Bentsen & Claus Felby

Flere mennesker på kloden, større forbrug og svindende mængder fossile resurser. Mange stiller i dag spørgsmålstegn ved, om det kan fortsætte, og det har ført til øget fokus på menneskets forvaltning af naturressourcerne.

Bæredygtig udvikling er et hyppigt brugt mantra, også i debatten om bioenergi, og der afsættes meget tid og mange penge til udvikling og analyse af bæredygtige energisystemer.

Men bæredygtighed er også et af de mest misbrugte ord i debatten om resurseanvendelse. Brundtland definitionen på bæredygtig udvikling fokuserer på to adskilte generationer: den nuværende og en fremtidig.

Forestillinger om fremtidige energiteknologier har i mange tilfælde vist sig at være misvisende, og fremtidige generationers behov og efterspørgsel for energi kender vi reelt kun på et overordnet niveau.

Teknologiske gennembrud som effektiv lagring af el vil på afgørende vis kunne ændre forudsætningerne. Som konsekvens heraf må en bæredygtig tilgang til udvikling af bioenergi fokusere på fleksibilitet og på at forsyne fremtidige generationer med mange handlemuligheder.

Denne artikel introducerer nogle grundlæggende begreber for forståelse af sammenhængen mellem biomassens indhold af energi, og de energitjenester vi efterspørger. Popu-

lært kan man beskrive fremstillingen af energi fra biomasse som værende underlagt det universelle princip om at "der ikke er nogen gratis frokost". Dertil kommer, at det ikke er ligegyldigt, hvilken slags energi der produceres fra biomassen. Der kan nemlig være tale om både "ægte" og "tomme" kalorier.

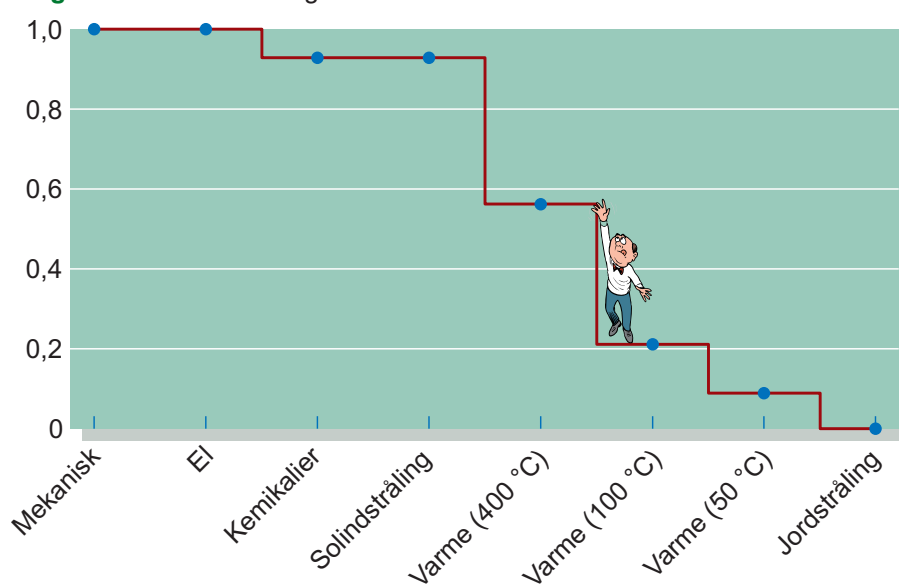
Artiklen bruger termodynamikkens to første hovedsætninger til at beskrive sammenhængen mellem "ægte" og "tomme" kalorier eller mere korrekt mellem energikvantitet og energikvalitet.

## Termodynamikken

Termodynamikkens 1. hovedsætning siger, at energi hverken kan skabes eller destrueres – den kan kun skifte form. Som eksempel kan betragtes biosfæren. Den mængde energi biosfæren modtager fra solen er af samme størrelsesorden som den mængde energi, der stråler tilbage til universet. I store træk er biosfæren således i energimæssig ligevægt.

Men liv kræver energi, så hvordan skabes og opretholdes liv på jorden, når det ikke er forbundet med et overordnet forbrug af energi?

Figur 1 Indeks for energikvalitet



Energikvalitetshierakiet angiver forskellige energiformers mulighed for at blive omdannet til mekanisk arbejde. Indeks 1 angiver den højeste mulige kvalitet.



Foto: Torben Skøtt/BioPress

Den mængde halm, som i dag bliver anvendt til energiformål, bliver primært brugt til fremstilling af varme og el, men der kan være mange fordele ved i stedet at satse på fremstilling af biobrændstoffer, kemikalier og materialer.

Termodynamikkens 2. hovedsætning kan forklare dette tilsyneladende paradoks. Den fortæller i store træk, at energi kan omdannes fra én form til en anden under skabelse af entropi, der er en indikator for energiens kvalitet. Kun hvis processen er reversibel, forbliver entropiniveauet konstant, men i den virkelige verden findes ingen eller kun meget få processer, som kan foregå i omvendt orden af sig selv – altså uden tilførsel af energi.

Grundlaget for liv på jorden er derfor ikke forbundet med forbrug af energi, men med dannelse af entropi og forbrug af energikvalitet. Dette princip gælder også for anvendelsen af energi til de ydelser, som vi efterspørges; transport, lys, varme og kommunikation – energien bevares, men entropien øges.

På baggrund af 2. hovedsætning kan man opstille et hierarki af energiformer i forhold til deres evne til at udføre mekanisk arbejde (figur 1). Energien kan flyttes både op og ned, men før eller siden havner den på nederste trin, og det "koster", ligesom høje trin "koster" mere end lave.

### Halm til energi og materialer

Hvad er den bedste anvendelse af biomassereresurser? Det har været debatteret intensivt både nationalt og internationalt.

Resultaterne spænder vidt, da der ikke er enighed om, hvad "bedst" skal sættes i forhold til, og hvordan det skal måles. Vi analyserer seks scenarier for anvendelse af halm i energisektoren i henhold til termodynamikkens 1. og 2. hovedsætning.

Analysen efter 2. hovedsætning anvender begrebet exergi som mål for energikvalitet. Exergi er et mål for en energiforms potentiale for at blive omsat til mekanisk arbejde og bygger på både 1. og 2. hovedsætning.

Tabel 1 viser input og output fra de seks scenarier. Alle scenarier får tilført ét ton halm. På outputsiden skal produktionen betragtes som et netto-udbytte efter fradrag af eget forbrug af el og varme.

Effektiviteten af de forskellige scenarier er beregnet for både energi og exergi. I scenarie 1, 2 og 4 er effektiviteten for energi og exergi sammenlignelig, mens der er en betydelig afvigelse for scenarie 3, 5 og 6. Det

skyldes, at der i scenarie 3, 5 og 6 indgår produktionen af fjernvarme, som er den energiform med den laveste kvalitet.

### Elektricitet eller materialer

Både elektricitet og materialer (kemisk bundet energi) er højkvalitets- energiformer, men der er en modsætning mellem produktionen af dem. Det er nemlig ikke muligt på samme tid, at producere større mængder elektricitet og materiale af den samme resurse.

De scenarier, der producerer relativt meget elektricitet er kendetegnet ved en lavere exergieffektivitet end de scenarier, der producerer relativt meget materiale. Årsagen til dette skal ikke findes i kvalitetsforskellen mellem elektricitet og materiale, men i det forhold, at elproduktion typisk omfatter flere trin ned og op ad kvalitetstrappen (figur 1). Fra kemisk energi til varmeenergi og videre til mekanisk energi, der til sidst omdannes til elektrisk energi.

### Rigtigt eller forkert

Analysen ovenfor fører til vidt forskellige konklusioner afhængig af, om den

Scenarium	Output					Effektivitet	
	Ethanol	El	Metan	Varme	Ren CO <sub>2</sub>	Energi	Exergi
1. Fermentering af C6 sukker + el	1.143 kWh	585 kWh			147 kg	0,40	0,36
2. Fermentering af C6 og C5 sukker + el	1.414 kWh	359 kWh			214 kg	0,47	0,43
3. Fermentering af C6 sukker + el + fjernvarme	1.143 kWh	471 kWh		1.547 kWh	147 kg	0,73	0,40
4. Fermentering af C6 sukker + el + biogas	1.143 kWh	120 kWh	1.269 kWh		147 kg	0,59	0,53
5. El + fjernvarme		1.249 kWh		3.149 kWh		1,02	0,35
6. Fjernvarme				4.657 kWh		1,08	0,16

Tabel 1. Masse- og energibalance for seks scenarier, hvor der anvendes ét ton halm til energiproduktion i hvert scenarium.

► tolkes på baggrund af 1. eller 2. hovedsætning; men hvilken tolkning giver mest mening?

I en tid hvor resurser opfattes som udtømmelige, eller hvor konsekvensen af et voksende resurseforbrug ikke tillægges stor vægt, har analyser baseret på 1. hovedsætning vist sig tilstrækkelige i forhold til de ydelser, der blev efterspurgt. Det har været tilfældet i en stor del af det tyvende århundrede, og derfor har man primært satset på at opnå den størst mulige mængde energi uden større hensyn til, hvilken kvalitet der var tale om.

I de senere årtier er der kommet langt mere fokus på, at vi har begrænsede resurser til rådighed, og den måde, vi udnytter dem på, kan have store konsekvenser. Derfor giver analyser af energisystemer, som er baseret på termodynamikkens 2. hovedsætning i dag langt mere mening end dem baseret på 1. hovedsætning.

## Modsætninger

Bæredygtighed er ikke et termodynamisk begreb, og der er en iboende modsætning mellem bæredygtighed og termodynamikkens 2. hovedsætning. Bæredygtighedsbegrebet, der antager, at noget kan opretholdes for evigt, er i modstrid med 2. hovedsætning, der siger, at intet kan opretholdes for evigt.

Termodynamikken kan heller ikke forholde sig til etiske, politiske eller sociale problemstillinger, men ikke desto mindre kan termodynamikken være en stor hjælp til udviklingen af

en mere bæredygtig forsyning af energi og materialer.

Flere forskere mener, at der er en positiv sammenhæng mellem exergi-effektivitet og bæredygtighed. Om den påstand holder i alle tilfælde er tvivlsomt, men en modsatrettet relation synes oplagt.

Entropi danner termodynamisk irreversibilitet, og det giver mangel på fleksibilitet. Hvis bæredygtighed side-stilles med fleksibilitet, vil irreversibilitet være et mål for, hvor lidt bæredygtigt resurseforvaltningen er.

De seks scenarier i tabel 1 danner forskellige niveauer af irreversibilitet og dermed tabt fleksibilitet (tabel 2). Scenarium 5 og 6 repræsenterer den i dag helt almindelige anvendelse af halm til energiformål. Ved fjernvarme-produktion (scenarium 6) går 84 procent af den oprindelige fleksibilitet i halmressourcen tabt, mens kraftvarme-produktion (scenarium 5) "kun" taber

Scenarium	Irreversibilitet	Tabt fleksibilitet
1.	11.904 MJ	64 procent
2.	10.625 MJ	57 procent
3.	11.305 MJ	61 procent
4.	8.841 MJ	48 procent
5.	12.063 MJ	65 procent
6.	15.574 MJ	84 procent

Tabel 2. Irreversibilitet og tab af fleksibilitet for de seks scenarier, hvor der anvendes ét ton halm i hvert scenarium.

65 procent eller nogenlunde det samme som for 2. generationsbioethanol. Den mest fleksible energiproduktion fås ved at kombinere ethanol, el og biogas (scenarium 4).

## Perspektiv

Ovenstående analyse kan give det indtryk, at anvendelse af halm til varmereproduktion er mindre godt i forhold til andre anvendelser, men sådan kan man ikke konkludere.

Hvad der er bedst i en given situation afhænger af efterspørgselen på forskellige energitjenester, tilgængeligheden af resurserne og konkurrencen imellem dem. Samfundet efterspørger også varme med både høje og lave temperaturer, så det skal energisystemet også kunne levere.

Men set i et lidt længere tidsperspektiv og i lyset af begrænsede resurser bør anvendelsen af biomasse til varme og til dels også elektricitet have en lavere prioritet sammenlignet med brændsler, kemikalier og materialer. Med fokus på energikvalitet frem for kvantitet sikres det, at der tages så små trin på energikvalitets-trappen som muligt, hvilket er til gavn for bæredygtigheden i forvaltningen af resurserne.

*Niclas Scott Bentsen er fagkonsulent ved Københavns Universitet, Det Natur- og Bio- Videnskabelige Fakultet.*

*Claus Felby er professor ved Københavns Universitet, Det Natur- og Bio- Videnskabelige Fakultet.* ■

# Solens energi kan omdannes mere effektivt til biomasse

De fleste landbrugsafgrøder er optimerede til produktion af foder og fødevarer, og i mange tilfælde vil produktionen af biomasse kunne fordobles ved i stedet at vælge flerårige energiafgrøder. Det vil give mulighed for at levere råvarer til bioraffinaderier og reducere nitratudvaskningen uden, det går ud over produktionen af fødevarer.

*Af Uffe Jørgensen, Jørgen E. Olesen, Poul Erik Lærke, Kirsten Kørup, Karsten Raulund-Rasmussen, Poul Erik Jensen og Claus Felby.*

De afgrøder, vi i dag dyrker i landbruget, er optimerede til produktion af foder og fødevarer. Afgrøderne er udviklede til at kunne lagres og omsættes i den infrastruktur, som vi over århundreder har bygget op til fødevarerproduktion og -industri.

Hidtil har der primært været fokus på produktion af frø, kerner og knolde, og det betyder, at mange af de velkendte afgrøder ikke udnytter produktionspotentialt optimalt. Eksempelvis udnytter kornafgrøderne ikke solens energi i et par af vækstsæsonens bedste måneder, hvor det modner, høstes og sås igen.

I et fremtidigt biobaseret samfund, hvor biomasse kan omsættes til en vifte af produkter i bioraffinaderier, er

kvalitetsparametrene nogle andre, end når afgrøderne skal anvendes til direkte konsum af dyr og mennesker. Det giver mulighed for at udvikle dyrkningssystemer, der i langt højere grad udnytter produktionspotentialt i dansk jordbrug. Det kan vi gøre ved at dyrke afgrøder, der ikke behøver at sætte blomster og frø før derefter at visne, men fortsætter væksten så længe temperatur og lysforhold tillader det om efteråret. For rigtigt at ud- ►



Afgrøde	Nuværende klima	2 °C varmere klima
Korn	21,3 tons/hektar	23,8 tons/hektar
Maksimal C <sub>3</sub>	36,4 tons/hektar	37,8 tons/hektar
Maksimal C <sub>4</sub>	34,2 tons/hektar	39,9 tons/hektar
Maksimal C <sub>4</sub> øget kuldetolerance	39,9 tons/hektar	44,4 tons/hektar

Tabel 1. Resultatet af simple beregninger med typiske værdier for C<sub>3</sub> og C<sub>4</sub>-afgrøder.

- nytte vækstsæsonen vil disse afgrøder også skulle starte væksten meget tidligt i foråret.

### Op til 40 tons per hektar

Med den solindstråling og temperatur vi har i Danmark, er det teoretiske produktionspotentiale i høstbar overjordisk biomasse på cirka 35 tons tørstof per hektar, og potentialet nærmer sig 40 tons per hektar med de forventede temperaturstigninger i dete århundrede.

Det gennemsnitlige udbytte af vinterhvede, som er den hyppigst dyrkede afgrøde i dag, er cirka 9 tons tørstof per hektar, når halm- og kerneudbytte lægges sammen. Det er således indlysende, at selvom udbyttet i praksis reduceres af en række faktorer som tørke, sygdomme og skadedyr, er der et meget stort potentiale for at øge totaludbyttet fra det nutidige niveau.

Projektet BIORESOURCE har fokus på dette uudnyttede potentiale, og projektets hypotese er, at vi kan fordoble energjudbyttet og CO<sub>2</sub>-fortræng-

ningen per arealenhed ved at forøge energifiksering i fotosyntesen, minimere energitabet under biomasseproduktionen samt forfine omdannelsen til energi, materialer og foder.

### Tre afgrøder undersøges

I projektet undersøges produktionspotentiale og stresstolerance for tre forskellige biomasseafgrøder med vækst gennem hele sæsonen. Det er to "træagtige" afgrøder, pil og poppel, samt elefantgræs. Sidstnævnte benytter sig af C<sub>4</sub>-fotosyntese, der under varme forhold omsætter sollyset med cirka 30 procent højere effektivitet end C<sub>3</sub>-fotosyntese, som pil og poppel benytter sig af.

C<sub>4</sub>-fotosyntese er en klar fordel under tropiske forhold, men under vores tempererede forhold kan det, der vindes på gyngerne, nemt mistes på karusellen, idet afgrøderne ikke udnytter sollyset godt nok ved de lave temperaturer i det tidlige forår og forsommer.

Vores projektpartner fra Energy Bioscience Institute i USA, har dog tidligere påvist, at den mest alminde-

lige klon af elefantgræs besidder et særligt biokemisk forsvarsværk, der beskytter C<sub>4</sub>-fotosyntesen mod kuldehæmning. Derfor kan elefantgræs udnytte sollyset over en længere vækstsæson end majs, der er den mest almindelige C<sub>4</sub>-afgrøde på vores breddegrader. Undersøgelsen i USA viste således cirka 60 procent højere biomasseproduktion i elefantgræs end i majs over en hel vækstsæson.

### Forædling

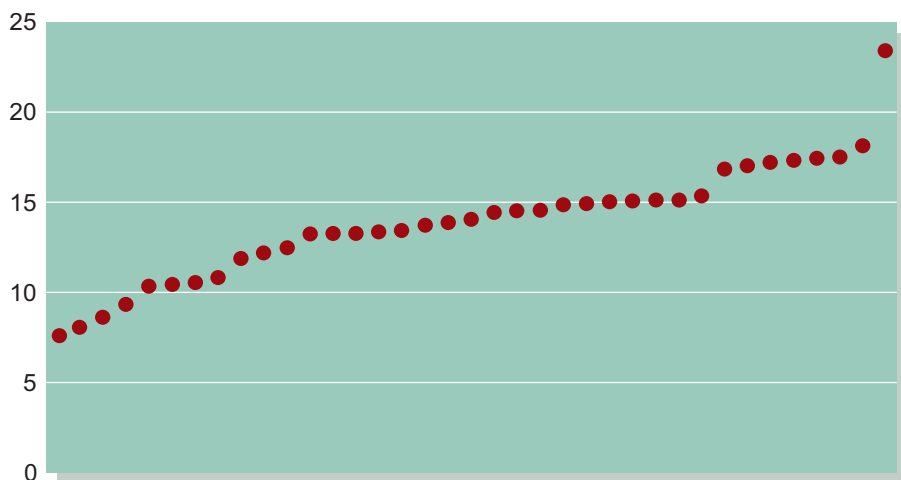
Elefantgræs er stort set uforædlet, og den undersøgte klon er naturligt forekommende. Vi forventer derfor, at der vil være et stort forædlingspotentiale, og i BIORESOURCE-projektet screener vi en samling af genotyper indsamlet fra forskellige områder i Japan.

De første målinger af fotosyntesens kuldetolerance i elefantgræs-samlingen i foråret 2012 har vist en meget stor variation (se figur 1), som nu vil danne udgangspunkt for nye krydsninger.

Hvis det ved selektion og forædling kan lykkes at sænke C<sub>4</sub>-afgrøders basistemperatur for fotosynteseaktivitet med cirka 2 °C og fastholde den store effektivitet i højsommeren, vil det være muligt at sikre høj produktivitet fra maj til oktober.

Tabel 1 viser resultatet af simple beregninger med typiske værdier for C<sub>3</sub> og C<sub>4</sub>-afgrøder. Under det nuværende klima er C<sub>3</sub>-afgrøder samlet set C<sub>4</sub> afgrøder overlegne, men ved en temperaturstigning på blot 2 °C vender

Figur 1 Fotosyntese i  $\mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2 \text{ s}$



Fotosynteseaktivitet for forskellige typer elefantgræs målt ved lave temperaturer i foråret 2012.



Foto: AU-Foulum

Udstyr til måling af fotosyntese på bladniveau.



Foto: AU-Foulum

Foto: AU-Foulum

Nye typer elefantgræs fra det nordlige Japan (billedet til venstre) var cirka en meter højere end majs den 21. juni 2012 (billedet til højre). Elefantgræs er stort set uforædlet, så forskerne forventer et stort forædlingspotentiale.

billedet. Hvis  $C_4$ -afgrøder kan gøres mere kuldetolerante, vil de endda kunne producere dobbelt så meget biomasse gennem hele vækstsæsonen som de nuværende kornafgrøder.

### Mindre udvaskning

Ved at benytte flerårige afgrøder til produktion af biomasse vil der samtidigt ske en reduktion i nitratudvaskning og en øget lagring af kulstof i jorden. På den måde kan sammenhængen mellem produktivitet og miljøpåvirkning knækkes.

Det høje udbytte i afgrøder med kontinuert vækst som for eksempel

grønne græsser kan med fordel udnyttes i våde konverteringsprocesser. En bioraffineringsproces vil være interessant, da der vil kunne udvindes andre værdifulde stoffer som fibre til materialer eller proteiner til foder og fødevarer. Grønne græsser har nemlig et højt proteinindhold, og såvel foderkvalitet som metoder til ekstraktion bør undersøges nærmere.

Samlet set vil højere udbytte i flerårige afgrøder kunne levere råvarer til bioraffinaderier og reducere nitratudvaskningen markant, uden at det går ud over produktionen af fødevarer.

*Uffe Jørgensen, Jørgen E. Olesen, Poul Erik Lærke og Kirsten Kørup er alle ansat ved Institut for Agroøkologi, Fakultet for Naturvidenskab og Teknologi, Aarhus Universitet.*

*Karsten Raulund-Rasmussen og Claus Felby er ansat ved Skov & Landskab, Det Natur- og Biovidenskabelige Fakultet, Københavns Universitet*

*Poul Erik Jensen er ansat ved Institut for Plantebiologi og Bioteknologi, Det Natur- og Biovidenskabelige Fakultet, Københavns Universitet.* ■

# Bioenergi kan støtte bæredygtig landbrugsproduktion



Foto: Claas

Bioenergi kommer til at fylde mere og mere i energiforsyningen, men det er ikke tilstrækkeligt at se på energiudbyttet fra biomassen. Det er mindst lige så vigtigt at vurdere, hvordan produktionen kan tilrettelægges, så den minimerer udslippet af klimagasser og tager hensyn til jordens behov for kulstof og næringsstoffer.

*Henrik Hauggaard-Nielsen  
og Hanne Østergård*

Bæredygtig energiproduktion er en fundamental forudsætning for vores højteknologiske samfund, men vi kan ikke klare os udelukkende med sol og vind. Bioenergien giver et meget væsentligt bidrag til energiforsyningen, og den kan skabe balance i et fremtidigt energisystem, hvor en stor del af elforsyningen er baseret på sol og vind.

Fremtidens samfund forventes i høj grad at blive biobaseret, og derfor er det vigtigt at påpege, hvor grundlæggende det er for ethvert økosystem, at kulstof og næringsstoffer fra planteproduktionen bringes tilbage i kredsløbet, efter at afgrøderne er høstet.

I vores industrialiserede samfund betyder den stigende flytning fra land

til by desværre, at denne cyklus alt for ofte brydes. Stigende efterspørgsel af fødevarer, stigende international handel og nu også udnyttelsen af biomasse til energiformål øger denne ubalance. Fremtidens fødevarer systemer bør derfor tilstræbe øget selvforsyning af gødning, foder og energi. Og det bør ske uden at reducere jordens frugtbarhed og ved at tilstræbe en reduktion af miljøpåvirkninger, herunder udledning af drivhusgasser.

## Økologisk jordbrug

Økologisk jordbrug tager udgangspunkt i at arbejde i lukkede kredsløb og benytte lokale resurser.

I denne artikel er eksempler fra økologisk jordbrug hovedsagelig hentet fra BioConcens projektet, der er støttet af forskningsprogrammet FØJO III. Projektet benyttes for at diskutere, hvorvidt det er muligt at skifte fra overvejende fossile energikilder til en bæredygtig energiforsyning, baseret på recirkulering af næringsstoffer og reduceret udledningen af drivhusgasser. Vi har valgt at benytte biogas som eksempel.

Landbrugssystemet består af flere primære komponenter; markbrug, husdyr, forarbejdningsindustrier og bioenergiteknologier, som er mere eller mindre forbundet (se figur 1). Systemet kan principielt skaleres op fra

decentrale modeller til mere centrale løsninger, der omfatter større eller mindre byer.

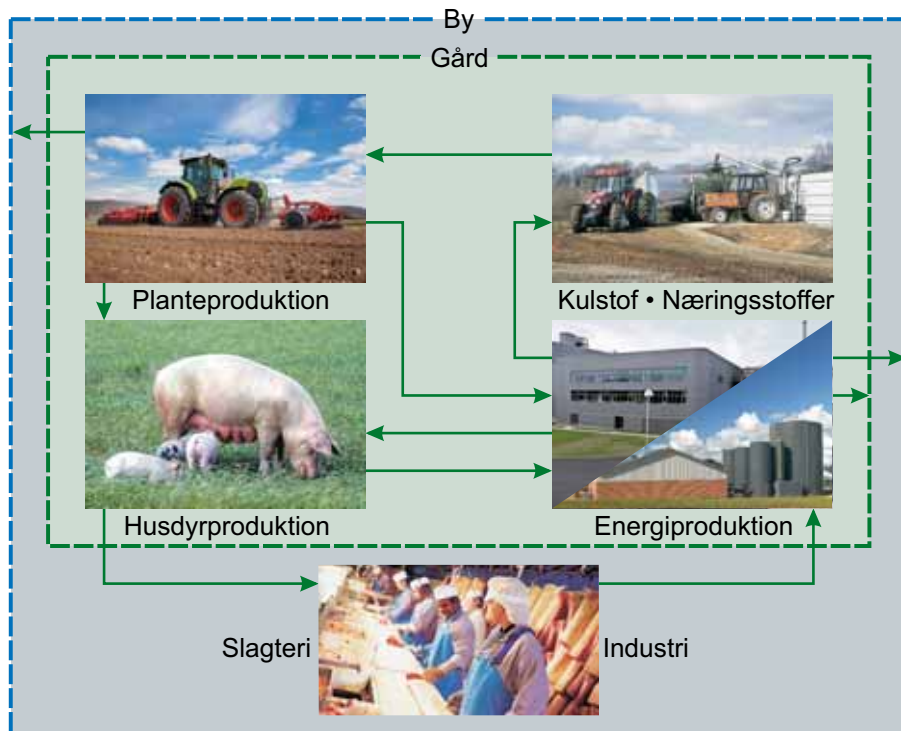
Ved at skifte fossile brændsler ud med biogas er den økologiske landmand med til at reducere udledningen af kuldioxid til atmosfæren. Danske biogasanlæg har traditionelt brugt gylle som den primære råvare. Det skyldes dels den intensive husdyrproduktion, dels at gyllen er let at håndtere i et biogasanlæg.

Ulempen er, at gylle i sig selv har et lavt gaspotentiale, så det med fordel kan blandes med andre biomasser som for eksempel kløvergræs.

Kløvergræs kan også benyttes alene i processen med gode udbytter på op til 370 m<sup>3</sup> metan per ton VS (den organiske, nedbrydelige del af tørstof-fet). Det er næsten dobbelt så meget som kvæggylle, der har et udbytte på omkring 200 m<sup>3</sup> metan per ton VS.

For at sikre en rentabel biogasproduktion er det vigtigt at kunne vurdere effektiviteten, som er afhængig af den organiske belastning af reaktoren, opholdstiden, temperaturen og den kemiske sammensætning af biomassen.

De optimale forhold kan således variere meget. Forsøg i laboratorium viser, at afgangning af rent gylle giver et udbytte på 15-20 m<sup>3</sup> metan/ton, men for at produktionen kan blive rentabel, kræves et udbytte på om-



Figur 1. Produktionen af biomasse til energiformål består af flere komponenter, som er mere eller mindre forbundne. Råvarerne til energifremstillingen stammer fra både planteproduktionen, husdyrproduktionen og industrien, og energianlæggene leverer ikke blot el og varme til gården og det øvrige samfund. De sørger også for, at kulstof og næringsstoffer føres tilbage til landbrugsjorden, ligesom der i visse tilfælde kan foregå en produktion af foder til landbruget.

kring 30 m<sup>3</sup> metan/ton våd biomasse. Det kan blandt andet opnås ved at anvende en kombination af gylle og kløvergræs.

### Majs kan være problematisk

Hvis biogasproduktionen skal være bæredygtig, er det imidlertid ikke tilstrækkeligt at se på energiudbyttet. Det er mindst lige så vigtigt at vurdere, hvordan restproduktet kan tilbageføres til jordbruget som højkvalitetsgødning med et minimalt tab af næringsstoffer og drivhusgasser.

Forsøg med majsdyrkning og gødsning med afgasset gylle har vist, hvor vigtigt det er at inkludere alle klimagasser, når bæredygtigheden skal evalueres. Det gælder ikke mindst for lattergas, der er tre hundrede gange så kraftig en klimagas som kuldioxid.

Majs er en krævende afgrøde, når det drejer sig om næringsstoffer, og forsøgene viste faktisk, at et øget majsudbytte blev modsvaret af et øget tab af lattergas, som foregår primært efter tilførsel af den afgassede gylle. Tager man "klimakasketten" på, er det altså problematisk at bruge majs til produktion af biogas.

### Kløvergræs er velegnet

Produktion af biomasse til energiformål bør afstemmes med behovet for fødevarer og andre biobaserede pro-

dukter, ligesom påvirkningen af klimaet og jordens frugtbarhed bør indtages i beslutningsprocessen. I den forbindelse kan der komme krav om at ændre dyrkningspraksis, hvor eksempelvis korn skiftes ud med flerårige afgrøder.

Stribedyrkning er en praksis, hvor hver afgrøde etableres i striber med en bredde, der sikrer interaktion mellem afgrøderne, og som samtidig tilpasses lokalt maskinel. Derved fungerer de enkelte striber som individuelle "marker", og det afgrødespecifikke markarbejde kan foregå uafhængigt af hinanden.

Øget dyrkning af flerårige afgrøder som kløvergræs er ligeledes en forudsætning for at modvirke det generelle fald i jordens kulstofpulje og dermed frugtbarhed. Forsøg med nedmuldning af kløvergræs med forskellig alder har vist, at efter blot to år er der opbygget betydelige mængder kulstof i jorden, og den tendens øges med tiden. Hidtil har kløvergræs ikke været særlig udbredt hos planteavlere, fordi den "skubber" en salgsafgrøde ud, men til energiproduktion er den meget velegnet.

### Vigtigt med selvforsyning

Betydningen af kløvergræs som energiforgrøde til biogasanlæg er blevet analyseret i et modelsystem bestående

de af fem økologiske planteavlsgårde, som deler ét biogasanlæg.

Gårdene producerer energi i form af raps, der bruges til fremstilling af biodiesel og kløvergræs, der tilføres et biogasanlæg, som producerer el og varme. Derudover produceres der fødevarer, foder og grøngødning.

Den afgassede biomasse fra biogasanlægget benyttes som gødning. Al grøngødning, lidt el og varme samt halvdelen af den producerede biodiesel, bruges på gårdene, der dermed bliver selvforsynende med energi og gødning.

Land- og skovbrug, som producerer råvarer til energiformål, kommer i fremtiden til at spille en betydelig rolle, hvis det skal lykkes at gennemføre de forskellige energipolitiske målsætninger. En måde at sikre landbruget fremover er at øge graden af selvforsyning på bedriftsniveau. Det er endnu bedre, hvis gården er en nettoenergiproducerende, da energi, der bruges til forarbejdning, distribution og handel med landbrugsprodukter, skal leveres fra landbruget for at øge forsyningssikkerheden.

Henrik Hauggaard-Nielsen er seniorforsker ved DTU Kemiteknik.

Hanne Østergård er forskningsspecialist ved DTU Kemiteknik. ■

Tang kræver hverken landbrugsjord, ferskvand, sprøjtemidler eller kunstgødning. Miljømæssigt set er der således mange fordele ved at bruge tang til energiproduktion, men økonomien er fortsat en udfordring, og der går formentlig flere år, før tang er et realistisk alternativ til landbaseret biomasse.



Foto: Peter Bondo Christensen

## Tang som bæredygtig energikilde

Af Annette Bruhn, Sidsel Sode, Michael Bo Rasmussen, Anne-Belinda Bjerre og Preben Birr-Pedersen.

Tang har før været i søgelyset som biomasseressource til energiproduktion. Under energikrisen i 1970'erne blev store forskningsprogrammer søsat blandt andet i USA for at afklare energipotentialt i tang. Dengang blev konklusionen, at det ikke kunne betale sig.

Men teknologien inden for energikonvertering har udviklet sig betydeligt siden, energipriserne er igen steget, og i vor resurseknappe verden har man fået øjnene op for fordelene ved at udnytte hele ressourcen i et bioraffinaderi. I dét perspektiv er konklusionen "det kan ikke betale sig" til revision. Store summer går igen til projekter om tang, og herhjemme har adskillige forskningsprojekter til formål at vurdere de energi- og miljømæssige perspektiver i at bruge biomasse fra tang. Det er projekter som:

- MacroAlgeBiorefinery (Det Strategiske Forskningsråd)
- KOMBI (GUDP)
- et vandrensingsprojekt hos Fredericia Spildevand (Vandsektorens Teknologiuudviklingsfond)
- Alger til Biogas (Region Midtjyllands vækstforum)
- "søsalatprojektet" (ForskEL).

### Dyrkning

Biomasse fra tang er meget anderledes end den biomasse, vi kender fra

planter – både hvad angår dyrkning og indhold. Dyrkning af tang kræver sollys og næringsstoffer ligesom landplanter, men tang fremhæves ofte som mere bæredygtigt end landbaseret biomasse.

Der kræves hverken landbrugsjord, ferskvand, sprøjtemidler eller kunstgødning til dyrkning af tang, og man kan opnå samme eller større produktion per hektar end ved dyrkning af landbaserede planter. Søsalatprojektet har således dokumenteret et udbytte på op til 45 tons tørstof/hektar i Danmark. Udbyttet for store brunalger i Danmark kendes endnu ikke, men det ligger formentlig på omkring 10-15 tons tørstof/hektar.

Tang eller makroalger, som det også kaldes, kan opdeles i tre grupper: brunalger, rødalger og grønalger. Arter fra alle grupper dyrkes til fødevarer, primært i Asien.

Store brunalger som sukkertang og fingertang podes på liner, der sættes ud i havet og høstes, når algerne har nået en vis størrelse. Rødalger som purpurhinde (sushi-tang) og grønalger som søsalat dyrkes også på liner eller net i havet. Både rød- og grønalger dyrkes dog også i mindre omfang i bassiner på land.

I landbruget har mekanisering, effektivisering og fremavl af de dyrkede sorter stået på i tusinder af år. Den udvikling har tangdyrkingen endnu til gode, og flere af de danske projekter arbejder med netop det aspekt for at forbedre økonomien i tangdyrkning.

### Indhold

Tang indeholder op til 50-60 procent kulhydrater, og det er dem, man udnytter til energiformål. Men hovedparten af kulhydraterne i tang er meget anderledes end de kulhydrater, man finder i planter, og de er forskellige fra røde til brune og grønne alger. Kulhydraterne i tang er forgrenede og uregelmæssige, og både sukkerenhederne og bindingerne mellem dem er anderledes end de regelmæssige kæder af sukkerenheder, som findes i for eksempel cellulose.

Biomasse fra tang indeholder stort set ingen lipider (fedtstof), men både indholdet af vand, aske, salt og proteiner er relativt højt. Proteinerne i tang har en fordelagtig sammensætning af aminosyrer, og der er øget fokus på at udnytte proteinerne fra tang i foder til både fisk og husdyr.

Udover kulhydrater, protein og mineraler/aske, indeholder makroalger også mindre mængder potentielle højværdistoffer som farvestoffer og forskellige bioaktive stoffer, der kan udnyttes i fødevarer- og medicinalindustrien.

### Energikonvertering

Makroalger kan udnyttes til forskellige former for bioenergi via både termiske og biologiske konverteringer. De biologiske metoder ser mest lovende ud. Forskningsresultater viser et biogasudbytte, der er næsten på højde med kvæggylle, græs eller halm, og det endda uden dyre eller resursekræven-

de forbehandlinger i form af enzymer eller termisk hydrolyse (figur 1).

Bioethanolpotentialer er teoretisk set det samme som for landbaseret biomasse, og de første indledende simple gæringsforsøg (hvor kun C<sub>6</sub> omsættes) viser et foreløbigt udbytte svarende til 60-67 procent af de landbaserede biomasser som for eksempel halm og bagasse (figur 2). Der er således god grund til at forvente sig langt større udbytter i fremtiden med kombineret fermentering med andre mikroorganismer. Udfordringerne ligger primært i udvikling af specifikke enzymer til nedbrydning af de forskellige kulhydrater og optimering af fermentering med mikroorganismer, der kan omsætte både C<sub>6</sub> og C<sub>5</sub> sukker.

Inden for termisk konvertering som forbrænding, forgasning og pyrolyse støder man også på udfordringer: Tang er en våd biomasse og tørring af biomassen kræver uforholdsmæssig meget energi. Desuden indeholder tørret tang op til 32 procent aske med et højt indhold af alkaliske mineraler, der giver problemer med korrosion og slaggedannelse under forbrændingen.

### Miljøfordele

En stor fordel ved alger er, at de kan bruges til at rense havet for noget af det kvælstof og fosfor, der er så rigeligt af i vores kystnære farvande, idet tang optager kvælstof, fosfor og CO<sub>2</sub>

under væksten ligesom planter. Det kan blandt andet udnyttes af havbrugene, der i mange tilfælde kun kan få tilladelse til at udvide produktionen, hvis de kan dokumentere, at den øgede udledning af kvælstof bliver "samlet op igen". Et ton tør tang indeholder 10-40 kg kvælstof, cirka 0,5 kg fosfor og 330 kg kulstof svarende til omkring 2 tons CO<sub>2</sub>.

Engelske forskere har i projektet Supergen påvist, at man kan sænke udslippet af drivhusgasser med 77 procent ved at erstatte naturgas med energi fra brunalger dyrket til havs.

Også på land udnyttes tang til at rense næringsrigt spildevand, især fra akvakultur. Rensning af spildevand fra landbrug, by og industri er også forsøgt med lovende resultater, men her er det svært at få økonomien til at hænge sammen. Store mængder spildevand kræver store arealer til algedyrkning, og det er vanskeligt at bruge biomassen til højværdiprodukter, når algerne først har været i kontakt med spildevand.

### Makroalger deler vandene

Holdningerne til biomasse fra makroalger er spredte og spænder fra overdreven optimisme til stærk skepsis.

Fakta er, at makroalger i dag kan levere nogenlunde samme biogas- og ethanoludbytte som landbaseret biomasse. En ny positiv erfaring er, at fremstilling af bioethanol på basis af

tang ikke kræver høj temperatur og tryksat forbehandling, hvilket reducerer både anlægs- og driftsudgifterne.

Tre afgørende aspekter vil blive belyst over de næste år:

- Kan dyrkningen af makroalger effektiviseres tilstrækkeligt i Danmark?
- Kan ethanolproduktionen optimeres, og kan en samproduktion af proteiner og andre højværdistoffer i et bioraffinaderi forbedre økonomien?
- Kan miljøgevinsterne løfte bæredygtigheden af hele produktionskæden?

Svarene vil vise, om biomasse fra makroalger kan blive et reelt supplement til landbaseret biomasse i fremtidens produktion af fødevarer, foder og energi.

*Annette Bruhn er forsker ved Aarhus Universitet, Institut for Bioscience og AlgeCenter Danmark.*

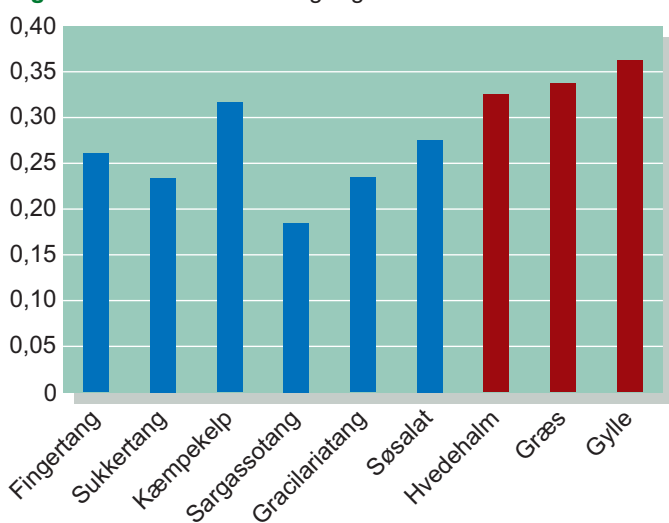
*Sidsel Sode er cand.scient. i marin biologi, Orbicon A/S.*

*Michael Bo Rasmussen er seniorforsker ved Aarhus Universitet, Institut for Bioscience og AlgeCenter Danmark.*

*Anne-Belinda Bjerre er seniorkonsulent ved Teknologisk Institut.*

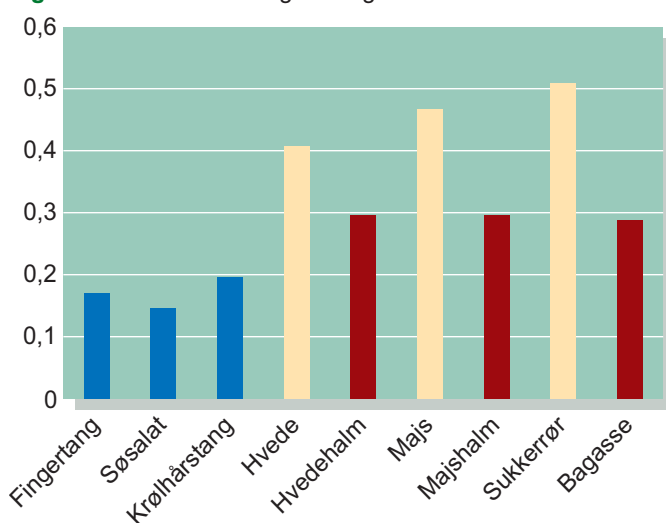
*Preben Birr-Pedersen er direktør i BiRR.*

**Figur 1** Kubikmeter metan/kg organisk tørstof



Sammenligning af biogasudbyttet mellem tang og landbaserede afgrøder. Bemærk at udbytterne er per kg organisk tørstof.

**Figur 2** Liter bioethanol/kg tørvægt



Sammenligning af bioethanoludbytte mellem tang og landbaserede afgrøder. De lysegule søjler er 1. generationsteknologi, mens de mørkerøde er 2. generation.

# Miljøvurdering af gylleteknologier

Inden for de senere år er der udviklet forskellige teknologier, som kan reducere miljøpåvirkninger fra håndtering af husdyrgødning. Inden teknologierne implementeres i stor stil, er det dog vigtigt at undersøge, om de rent faktisk er til gavn for miljøet, hvis man kigger på hele husdyrgødningens livscyklus.

*Sander Bruun, Marieke ten Hoeve og Nick Hutchings*

Der kan være mange problemer forbundet med husdyrgødning. De vigtigste er lugtgener og udslip af kvælstof, som forårsager algevækst og iltsvind i de indre farvande. Andre påvirkninger stammer fra udslip af drivhusgasser, og den måde vi håndterer husdyrgødning på kan have afgørende indflydelse på forbruget af vigtige resurser som fosfor.

Der er efterhånden udviklet en del teknologier, som kan reducere miljøpåvirkningerne ved håndteringen af gylle. En af teknologierne er gylleseparering, hvor man får en fast frak-

tion, der er rig på tørstof og fosfor og en flydende, hvor hovedparten af kvælstoffet findes.

Den faste fraktion kan relativt let transporteres til områder, hvor der er underskud af fosfor, og dermed reduceres risikoen for tab af fosfor til vandmiljøet samtidig med, at der anvendes mindre mængder handelsgødning.

Væskefraktionen har et lavere indhold af tørstof, og siver dermed hurtigere ned i jorden, hvorved ammoniakfordampningen reduceres.

## Teknologier

Den mest almindelige teknologi til gylleseparation er en skruepresse, der er billig, men ikke så effektiv med hen-

syn til at få tørstof og fosfor over i den faste fraktion. En dekantercentrifuge er noget dyrere, men væsentligt mere effektiv.

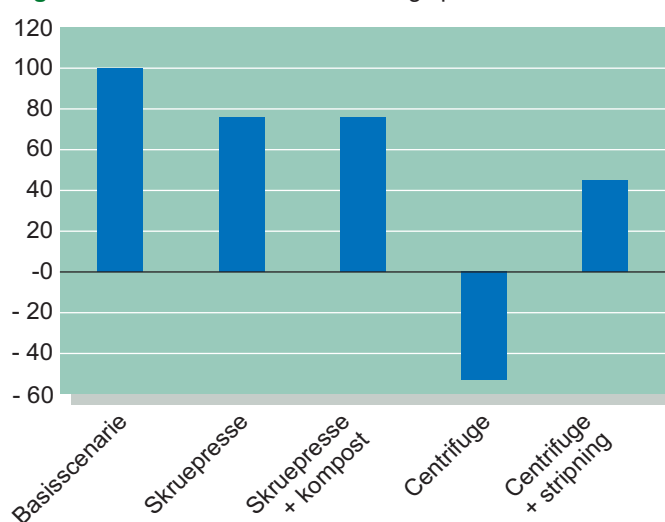
Inden den faste fraktion transporteres til områder med underskud af fosfor, kan den komposteres, så den bliver mere stabil. For at reducere fordampningen af ammoniak fra væskefraktionen yderligere, kan den "stripes" for ammonium ved at fange ammoniakken i syre. Det fjernede ammoniak kan herefter anvendes som gødning med en høj udnyttelsesgrad, da det kun er meget begrænsede mængder, der fordamper.

Udover de miljømæssige fordele der er ved gylleseparering, er der og-



Dekantercentrifuge på Morsø Biogasanlæg. Indsat billede nederst til venstre viser den faste fraktion.

Figur 1 Relativ ferskvandseutrofiering i procent



Relativ ferskvandseutrofiering i procent af basisscenariet, hvor gyllen køres direkte ud efter lagring.

så en del ulemper. De fleste teknologier kræver for eksempel et større eller mindre forbrug af energi, der bidrager til den globale opvarmning. Inden man indfører sådanne teknologier, er det derfor relevant at undersøge, om de er miljømæssigt fordelagtige eller om fordelene bliver opvejet af ulemperne.

Et godt værktøj til at undersøge miljøpåvirkningerne ved gylleseparering er de såkaldte livscyklusvurderinger. Her opgøres miljøpåvirkningerne gennem hele livscyklusen for de forskellige teknologier, som sammenlignes.

### Påvirkning af vandmiljøet

I figur 1 ses, hvordan ferskvandsøkosystemer påvirkes ved håndtering af ét ton gylle med forskellige teknologier beregnet over hele gyllens livscyklus fra det forlader dyrene til det kommer ud på markene.

Påvirkning af vandmiljøet kaldes også eutrofiering, og skyldes i forbindelse med gyllehåndtering udledning af for meget fosfor.

Værdierne i figuren er normaliseret, så basissceneriet med direkte udbringning af gyllen svarer til 100 procent. Som det ses, reducerer alle de anvendte teknologier ferskvandseutrofieringen. I scenarierne med separation ved hjælp af en centrifuge reduceres det faktisk til under nul procent. Det skyldes, at fosforoverskuddet på arealer med meget fosfor reduceres, sam-

tidig med at man sparer handelsgødning, som også er forbundet med tab.

I figur 2 ses påvirkningen i form af eutrofiering af marine økosystemer, som skyldes udslip af kvælstof i form af ammoniakfordampning og nitratudvaskning. Som det fremgår af figuren, reduceres denne form for eutrofiering også i teknologiscenarierne. Det hænger sammen med et højere planteoptag af kvælstof fra væskefraktionen og et tilsvarende mindre udvaskningstab. Planteoptaget er endnu højere, når der anvendes ammoniakstripping, da udnyttelsen af handelsgødning er endnu højere og tabene dermed mindre.

I figur 3 ses påvirkningen i form af global opvarmning. Her reduceres påvirkningen også som følge af teknologierne, hovedsagelig på grund af reduktioner i emissionerne af lattergas efter udbringning. Kompostering af den faste fraktion giver dog anledning til øgede udslip af metan og kuldioxid, som produceres i processen.

Hvis vi kigger på forbruget af fosfor, som er en begrænset resurse, så reduceres forbruget kraftigt i alle scenarierne, fordi fosfor bringes fra arealer med overskud til områder med underskud. Det er især tydeligt, når der anvendes en centrifuge til separation af gyllen.

### Valg af teknologi

Generelt kan man konkludere, at gylleteknologier indeholder et stort po-

tentiale for at reducere miljøpåvirkningerne ved håndtering af gylle.

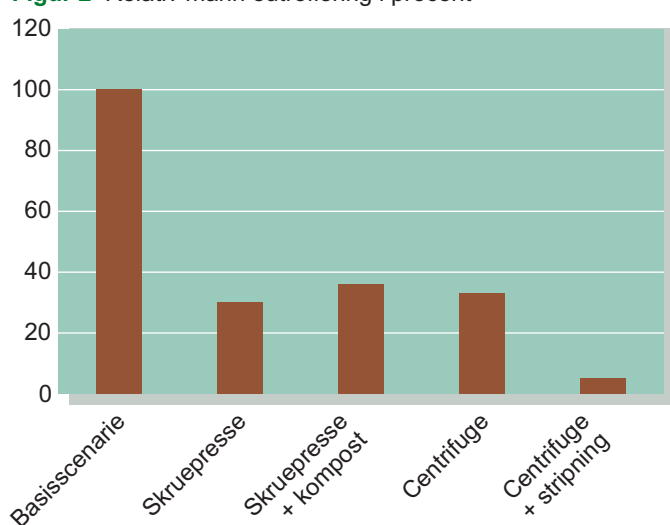
Hvilken teknologi, som bør anvendes, afhænger af hvilken miljøpåvirkning der er i fokus. Hvis der er et moderat overskud af fosfor, kan det håndteres med en skruepresse. Ved et større overskud er en dekantercentrifuge dog mere effektiv. Hvis der derimod er problemer med ammoniakfordampning, kan det være en god ide at overveje ammoniakstripping. Kompostering er forbundet med højere udslip af drivhusgasser, men kan have andre fordele som reduktion af lugt og patogener og lavere transportomkostninger.

*Sander Bruun er lektor ved Københavns Universitet, Institut for Jordbrug og Økologi, Plante- og Jordvidenskab.*

*Marieke ten Hoeve er Ph.d.-studerende ved Københavns Universitet, Institut for Jordbrug og Økologi, Plante- og Jordvidenskab.*

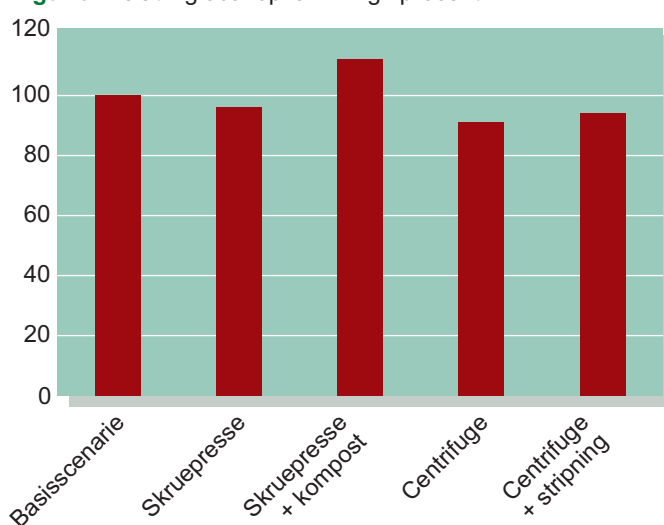
*Nick Hutchings er seniorforsker ved Aarhus Universitet, Institut for Agroøkologi.* ■

**Figur 2** Relativ marin eutrofiering i procent



Relativ marin eutrofiering i procent af basissceneriet, hvor gyllen køres direkte ud efter lagring.

**Figur 3** Relativ global opvarmning i procent



Relativ global opvarmning i procent af basissceneriet, hvor gyllen køres direkte ud efter lagring.





## Oparbejdning af næringsstoffer i gylle

Med gylleseparering bliver det lettere at sikre en korrekt tildeling af næringsstoffer til planterne, men hvis den faste fraktion skal markedsføres som et værdifuldt gødningsprodukt kræves yderligere opkoncentrering. En løsning kan være filtrering med såkaldte membrankontakter, men teknologien er endnu ikke klar til at kunne markedsføres.

Af Maibritt Hjorth, Agata Zarebska, Ole Thygesen, Christina Østerballe Pedersen og Birgir Norddahl

I moderne dansk landbrug er husdyrproduktionen koncentreret på forholdsvis små områder. Det betyder, at der flere steder vil være et overskud af næringsstoffer, som skal flyttes til områder med færre husdyr for at undgå skadelige effekter på miljøet.

Mængden af de tre vigtigste næringsstoffer i gylle, kvælstof, fosfor og kalium, stemmer dog ikke overens med planternes behov. For eksempel er indholdet af fosfor ofte for højt, og derfor udnyttes gyllens næringsværdi ikke fuldt ud. I stedet ender en del af næringsstofferne i vandmiljøet, hvilket gennem årene har ført til iltsvind og fiskedød i blandt andet Mariager Fjord.

Ved at adskille gyllens næringsstoffer i forskellige fraktioner kan landmændene lettere gøde udelukkende med de næringsstoffer, afgrøderne har brug for, og man undgår at bruge

kunstgødning, der lægger beslag på mange resurser.

### Næringsstofferne skal adskilles

Ved separering af husdyrgødning opnås en flydende fraktion, der indeholder mineralsk kvælstof og kalium, mens den faste fraktion indeholder fosfor og hovedparten af det organiske kvælstof.

I 2010 blev der i Danmark separeret omkring 880.000 tons gylle, svarende til tre procent af den samlede gyllemængde. Den andel har været forholdsvis stabil de foregående seks år efter en voldsom stigning midt i forrige årti.

Gylleseparering finder især sted på biogasanlæg og gårde med svineopdræt, der står for henholdsvis 38 og 53 procent af den mængde gylle, som separeres i Danmark. Det forventes, at gylleseparering bliver mere udbredt i de kommende år, efter at et bredt flertal af Folketingets partier har besluttet at øge støtten til biogasanlæg.

### Partiklerne skal klistre sammen

Ved gylleseparering gælder det om at få partiklerne i gyllen overført til den faste fraktion, samtidig med at vandet bliver i væskefraktionen. Det gøres ved at forbedre partiklernes evne til at klistre sammen, så vandet lettere kan skilles fra.

Partiklernes evne til at klistre styres af deres elektriske ladninger, der igen styres af de kemiske grupper på partiklernes overflade. De kemiske grupper ændres med skift i pH og med indholdet af ilt.

Der er danske gylleteknologier, som ændrer gyllens pH, og teknologier der ændrer iltindholdet for at minimere afgangningen af henholdsvis kvælstof og lugtstoffer. Meget tyder på, at en kombination af disse teknologier kan gøre separeringen endnu mere effektiv.

### Opkoncentrering af ammoniak

Den flydende fraktion har et højt vandindhold og en lav koncentration af næringsstoffer. Hvis det skal mar-

kedsføres som et værdifuldt gødningsprodukt, kræves yderligere opkoncentrering for at reducere væskemængden og samle kvælstof og kalium i ét produkt, der let kan transporteres til områder med mangel på næringsstoffer.

En løsning er filtrering på molekylniveau med såkaldte membrankontakter. Det er mikroporøse vandafvisende membraner, som bruges til opkoncentrering af ammoniak. Teknologien er endnu ikke udviklet til kommerciel anvendelse, men har med succes været anvendt til at fjerne ammoniak fra afgasset biomasse.

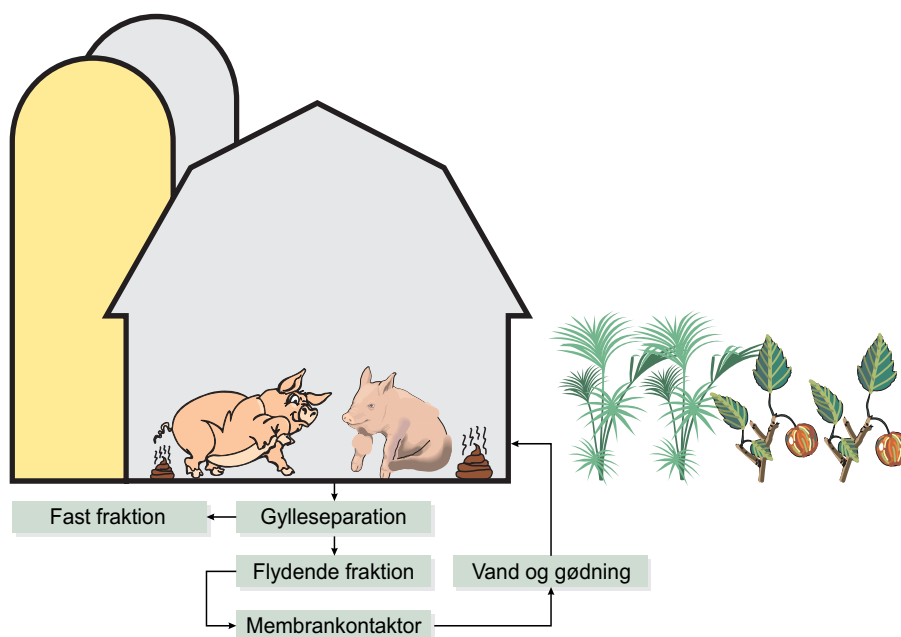
Membrankontakter konkurrerer med konventionelle teknologier som luftstripping eller dampstripping. Fordelen ved membrankontakter er, at de er mindre pladskrævende og har et meget lavere energiforbrug. Membranen har en stor aktiv overflade, og det giver en hurtig adskillelse af ammoniak fra gyllen med et lavt energiforbrug.

### Udfordringer

Den største hindring ved membrankontakter er aflejring af primært organiske bestanddele på overfladen og i porerne. Forsøg har vist, at efter en uges drift vil der være opbygget et lag af opslæmmede partikler på omkring 0,13 mm, og derved går processen i stå, med mindre membranerne bliver rensat.

Der er således behov for yderligere forbedringer, hvis teknologien skal kunne fungere i praksis. Det kan blandt andet være optimering af membranmaterialet samt løbende overvåg-

**Figur 1** Flowdiagram af gylleseparering



ning og rensning af membranerne. Derudover vil separering af gyllen, inden den tilføres biogasanlægget, kunne forbedre processen.

På Syddansk Universitet, Aarhus Universitet, Københavns Universitet og Limerick University arbejder forskere målrettet på at kunne optimere teknologien og reducere prisen på de anlæg, der skal stå ude hos den enkelte landmand. En attraktiv pris er nemlig en afgørende forudsætning for at kunne implementere teknologien i landbruget.

Lykkes det, vil landbruget i Danmark være kommet et skridt nærmere på at kunne anvende gyllens næringsstoffer fuldt ud – til gavn for både miljø og landbrug.

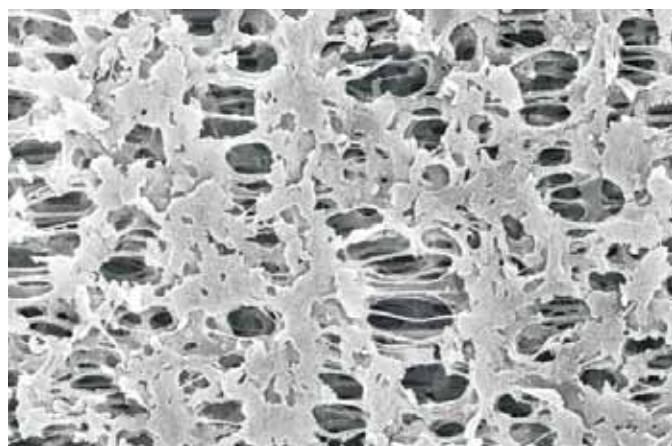
*Maibritt Hjorth er adjunkt ved Aarhus Universitet, Institut for Ingeniørvidenskab.*

*Agata Zarebska er Ph.d.-stipendiat ved Syddansk Universitet, Institut for Kemi-, Bio- og Miljøteknologi.*

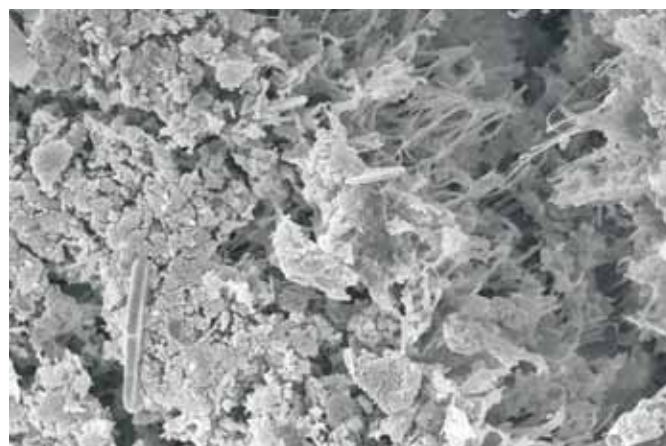
*Ole Thygesen er Ph.d.-studerende ved Syddansk Universitet, Institut for Kemi-, Bio- og Miljøteknologi.*

*Christina Østerballe Pedersen er Ph.d.-studerende ved Aarhus Universitet, Institut for Ingeniørvidenskab.*

*Birgir Norddahl er lektor ved Syddansk Universitet, Institut for Kemi-, Bio- og Miljøteknologi.* ■



Nærbillede af ren membran.



Nærbillede af beskidt membran efter syv dages drift.

# Optimering af energiudbytte og næringsstoffer fra gylle

Gylleseparering kan være det første skridt til at sikre en bedre udnyttelse af husdyrgødning, men ved forgasning eller pyrolyse af den faste fraktion opnås en endnu bedre udnyttelse af energiindholdet og næringsstofferne. Pyrolyse giver blandt andet mulighed for at producere biokul, der kan være med til at opbygge jordens kulstofpulje.

Af Lars S. Jensen, Wibke Christel, Kun Zhu, Renata Wnetrzak, Witold Kwapinski og Anita Rye Ottosen

Den animalske produktion kræver et enormt input af resurser som jord, vand, energi og næringsstoffer. Samtidig er effektiviteten lav, og det belastar miljøet ved udledning af drivhusgasser, ammoniak, lugt, nitrat og fosfat.

I forskningsprojektet CleanWaste udvikler vi teknologier, der kan erstatte jordbrugets forbrug af fossile energikilder, øge recirkuleringen af næringsstoffer og bevare jordkvaliteten ved at tilbageføre organisk materiale til landbrugsjorden.

Fosfor har i mange år været på den politiske dagsorden som ét af landbrugets miljøproblemer, der forurener søer og vandløb.

Men fosfor er også et uerstatteligt næringsstof for alle levende organismer og afgørende for vores fødevarerproduktion. Vores væsentligste kilde til fosfor er minedrift, og verdens største reserver varer formodentlig kun ét eller nogle få århundreder endnu. Endvidere ligger de væsentligste forekomster i politisk ustabile stater som Marokko, Vest Sahara og Kina med monopollignende producenter.

Der vil til stadighed være behov for at gødske afgrøderne med fosfor, hvis en høj produktion af fødevarer og bioenergi skal opretholdes. Forsyning med fosfor bliver derfor en af fremtidens helt store udfordringer på linje

med vand, energi, overbefolkning og ørkendannelse.

Det bliver således mere og mere oplagt at sikre en optimal recirkulering af fosfor fra alle de væsentligste affaldsstrømme i samfundet. For Danmarks vedkommende er det i prioriteret rækkefølge gylle, spildevandsslam, kød- og benmel samt husholdningsaffald. Det sker allerede i et vist omfang for gylle og spildevandsslam, men bør også gælde for det affald, der i dag forbrændes, og hvor asken oftest ender som fyldstof i beton og dermed forlader kredsløbet.

## Forgasning af den faste fraktion

Separation af husdyrgødning i en væskefraktion og en fast fiberfraktion, der er rig på fosfor og organisk materiale, er første nødvendige trin i en bedre udnyttelse af fosfor (se artiklerne på de fire foregående sider). Den faste fraktion kan enten:

### Biokul – Biochar

Biokul eller biochar, som det også kaldes, er forkullet restmateriale fra biomasse. Biokul kan være med til at lagre kuldioxid i jorden, forbedre jordens evne til at holde på næringsstoffer og vand, og endelig ser det ud til at kunne påvirke udslippet af lattergas. Biokul produceres ved pyrolyse af biomasse, hvor der samtidig produceres gas og bioolie.

- udbringes direkte på jordbrugsarealer uden overskud af næringsstoffer
- tilsættes som supplement til rågylle i biogasanlæg, og derefter udbringes på jordbrugsarealer
- forbrændes eller forgasses med henblik på energiudnyttelse og produktion af aske eller biokul også kaldet biochar
- komposteres og anvendes til produktion af vækstmedier eller jordforbedringsmidler uden for jordbruget.

De to sidste har potentiale til at skabe en højere værdi af affaldsprodukterne og fjerne næringsstoffer fra jordbruget, men teknologierne er endnu ikke udviklet tilstrækkeligt.

Forgasning er ofte at foretrække frem for forbrænding, når det drejer sig om biomasser med et højt indhold af alkaliske salte eller aske som fiberfraktion fra gylle. I forgasningsanlæg, hvor lufttilgangen kontrolleres, kan processen foregå ved lavere temperaturer end forbrændingen, og derved undgår man, at der dannes slagter i anlægget. Endvidere vil næringsstoffer, der opkoncentreres i asken, i højere grad forblive på en mere opløselig form end ved forbrænding, og dermed bliver de lettere at optage for planterne.

### Pyrolyse

Hvis lufttilgangen under forgasning begrænses helt, er der tale om pyrolyse, hvor der både produceres gas, bioolie og biokul, der er en fast frak-



Eksempel på forskellige produkter fra separeret gylle. Øverst til venstre ses den friske fiberfraktion, mens den ved siden af er komposteret. Nederst til venstre er det biokul fra pyrolyse og nederst til højre er det aske fra forbrænding. I eksemplerne har udgangspunktet været den samme mængde fiberfraktion.

tion, som kan bruges til at opbygge jordens kulstofpulje.

Forholdet mellem gas, olie og kul afhænger af både temperatur, opvarmningsrate og opholdstid. Energiudbyttet er lavere end ved forgasning, da det normalt kun er gassen og olien, der udnyttes til energiformål, men biokul har til gengæld potentiale som et meget stabilt jordforbedrings- og gødningsmiddel.

På ovenstående billede ses et eksempel på hvor meget biochar og aske, der kommer ud af processerne i forhold til den anvendte fiberfraktion.

I CleanWaste-projektet deltager forskere fra University of Limerick i Irland, og her har man fundet et positivt nettoenergiudbytte ved pyrolyse af fiberfraktionen fra husdyrgødning. Udbyttet afhænger dog af temperaturen, opholdstiden og hvor stor en del af produktet, der ender som biokul.

Hvis biokul anvendes til gødning eller jordforbedring, er der kun et positivt energiudbytte i de tilfælde, hvor der er tale om en forholdsvis høj temperatur og kort opholdstid. Energiudnyttelsen skal derfor afvejes mod værdien af biokul som gødnings- og jordforbedringsmiddel.

## Plantetilgængelighed

I CleanWaste-projektet har vi undersøgt vandopløselighed og plantetilgængelighed af fosfor i såvel aske som biokul, der er produceret ved stigende temperaturer fra 300 til 1.000 °C. I alle tilfælde er vandopløseligheden lavere end i den friske fiberfraktion. Opløseligheden i aske falder til meget lave værdier med forbrændings- eller pyrolysetemperaturer på over 400 °C, men det ser ud til, at plantetilgængeligheden af fosfor i biokul opretholdes på et relativt højt niveau ved temperaturer på op til 600 °C. Vi forsker for øjeblikket i, hvorvidt biokul kan udnyttes som et fosfor gødningsprodukt, og om det kan beriges yderligere med næringsstoffer.

Biokul, der tilføres jorden, har endvidere en høj modstandsdygtighed mod biologisk nedbrydning. Dermed kan det dels være med til at lagre kuldioxid i jorden, dels bidrage positivt til at jorden bedre kan holde på næringsstoffer og vand, og endelig ser det ud til at kunne påvirke udslippet af den potente drivhusgas lattergas. I et laboratorieforsøg, hvor frisk eller komposteret fiberfraktion blev tilført jordprøver, blev emissionen af lattergas således reduceret med 33-62 procent ved iblanding af biokul. Vi undersøger nu, om resultatet holder under andre forhold og forsøger at afdække mekanismen bag denne effekt.

## Viderebehandling

Hvis næringsstofferne i asken har en lav plantetilgængelighed, kan den viderebehandles, så resultatet bliver et lettilgængeligt og koncentreret gødningsprodukt.

Askerne kan som udgangspunkt inddeles i to grupper: De "rene" som indeholder over 10 procent fosfor og ikke er forurenede med tungmetaller, og de "urene" som indeholder mellem 5-14 procent fosfor og er forurenede med tungmetaller.

Kommunekemi har i forbindelse med CleanWaste-projektet udviklet



Forsøgsanlæg på University of Limerick i Irland, der kan bruges til forgasning og pyrolyse .

processer til genanvendelse af fosfor fra begge asketyper. Af de "rene" asker kan der produceres en majs-gødning, mens der af de "urene" asker kan produceres monoammiumfosfat (MAP) eller trinatriumfosfat (TSP). MAP kan anvendes som gødning eller i industrien, mens TSP kan anvendes i foder eller i industrien. Den "urene" askes indhold af fosfor er dog meget afhængig af behandlingsprisen, og det er i dag kun rentabelt at viderebehandle aske, der indeholder over ti procent fosfor.

Lars S. Jensen er professor ved Københavns Universitet, Institut for Jordbrug og Økologi.

Wibke Christel og Kun Zhu er begge Ph.d.-studerende ved Københavns Universitet, Institut for Jordbrug og Økologi.

Renata Wnetrzak er Ph.d.-studerende og Witold Kwapinski er lektor ved University of Limerick, Department of Chemical and Environmental Science.

Anita Rye Olsen er ingeniør ved Kommunekemi A/S. ■

# Optimering af biogasprocessen



Foto: Maabjerg BioEnergy

Brint er et vigtigt mellemtrin i den biologiske proces i et biogasanlæg, og med de rette værktøjer vil brint kunne bruges som en indikator for driftsstabilitet, og hvor hårdt anlægget kan belastes. Det fænomen bliver nærmere undersøgt i HYCON-projektet, hvor målet er at opnå en højere produktivitet i gyllebaserede biogasanlæg.

Af Anders Feilberg, Jeppe Lund Nielsen, Freya Mosbæk, Michael Nielsen, Niels Peter Revsbech og Lars D. M. Ottosen

Brint er et vigtigt mellemtrin i de komplekse biologiske processer, der fører til dannelse af metangas ud fra biomasse. Brint dannes ved fermentering af kortkædede organiske syrer, men der dannes også brint i andre trin af den mikrobielle nedbrydning af biomasse.

For at opretholde en stabil produktion af metan er det nødvendigt, at

brinten løbende omsættes, da en op-hobning af opløst brint i koncentrationer over et vist niveau fører til, at nedbrydningen af organiske syrer bremses. Ophobning af organiske syrer fører til forsurening, hvilket virker hæmmende og kan sætte biogasproduktionen helt i stå.

For at modvirke det fænomen er de mikroorganismer, der indgår i produktion og nedbrydning af brint, forbundet i grupper, så brinten hurtigt kan overføres til de organismer, der bruger brinten til at danne metan via en reduktion af CO<sub>2</sub>.

## HYCON-projektet

Der findes undersøgelser, som har vist en sammenhæng mellem overbelastning og forekomsten af opløst brint i biogasanlæg, hvor man har observeret en hæmning af metanproduktionen som følge af forsurening. Det er én af baggrundene for HYCON-projektet, hvor målet er at opnå en højere gennemsnitlig belastning og dermed en højere produktivitet i gyllebaserede biogasanlæg.

I den forbindelse kan brint bruges som en indikator for driftsstabilitet i forhold til for eksempel indfødning og

opblanding. Endvidere undersøges potentialet ved aktivt at styre mængden af brint i systemet, enten ved at sænke eller øge niveauet. Sidstnævnte har relevans i forhold til ønsket om at kunne tilsætte eksternt produceret brint til biogasanlæg. Det vil give mulighed for at bruge overskydende vindmøllestrøm til fremstilling af brint, der efterfølgende kan omdannes til metangas og lagres i naturgasnettet.

En væsentlig del af forskningsaktiviteterne i HYCON er rettet mod at udvikle nye kemiske og biologiske metoder til at undersøge brints fordeling, dannelse og omsætning i biogasprocessen. Den opnåede viden udnyttes til at udpege nye muligheder for optimering af produktionen i et biogasanlæg. Aktiviteterne består blandt andet af:

- udvikling af en ny mikrosensor til måling af opløst brint
- anvendelse af molekylærbiologiske metoder til undersøgelse af populationsdynamik
- anvendelse af stabile isotoper til undersøgelser af forskellige nedbrydningsveje.

### Mikrosensor til måling af brint

Mikrosensorer er en specialiseret teknologi der, som navnet indikerer, omfatter sensorer med en meget fin målespids. Diameteren er typisk på 10-50 µm eller mindre end et almindeligt menneskehår.

Forskning med mikrosensorer gør det muligt at studere detaljer af mikrogradienter i mange forskellige miljøer, herunder biofilm fra biogasanlæg, og kan således bidrage med værdifuld information om blandt andet systemers dynamik og funktion.

Der er i dag udviklet mikrosensorer for et stort antal kemiske parametre, inklusive ilt, svovlbrinte, lattergas, pH og brint. I forbindelse med HYCON-projektet har en central målsætning været at udvikle en mikrosensor til brint, som ikke er følsom over for svovlbrinte, der normalt forekommer i store mængder i biogasanlæg, og som interfererer voldsomt med eksisterende sensorer.

Ved at anvende en højeffektiv kemisk sulfidfælde, er det lykkedes for

sensorlaboratoriet på Afdeling for Mikrobiologi ved Aarhus Universitet at udvikle en helt ny brintsensor, der med stor præcision kan måle selv meget lave forekomster af brint i stærkt sulfidholdige miljøer.

### Isotop-studier

Mærkning med stabile isotoper af kemiske forbindelser, der indgår i biogasprocessen, kan bruges til at kortlægge de dominerende nedbrydningsveje for forskellige biomasser og under forskellige betingelser. I processen anvendes særligt fremstillede substrater, der indeholder isotoper, som er tungere end normalt. Det kan for eksempel være kulstof-13 i stedet for kulstof-12.

Substraterne tilsættes en aktiv reaktor, hvilket fører til dannelse af produkter, der ved hjælp af massepektrometri kan spores til de isotopmærkede substrater. Med den metode har man for eksempel kunnet påvise, at dannelsen af metan ud fra eddikesyre under visse omstændigheder sker via fuldstændig omdannelse til CO<sub>2</sub>, der efterfølgende reagerer med brint. Det er nyt, idet man tidligere har antaget, at processen delvist forløber via spaltning af eddikesyre til metan og CO<sub>2</sub>.

## HYCON

HYCON er en forkortelse for Hydrogen Control for Optimization of Methane Production from Livestock Waste. Projektet, der blev startet i starten af 2011 og slutter i 2014, skal føre til en større viden om brints rolle i biogasreaktorer for på den måde at optimere metanproduktionen. Følgende partnere deltager i projektet:

- Teknologisk Institut, Materialer og Produktion samt Life Sciences
- Aalborg Universitet, Institut for Kemi og Bioteknologi
- Aarhus Universitet, Institut for Ingeniørvidenskab og Institut for Bioscience
- Totax A/S
- Xergi A/S
- Unisense A/S
- University of Queensland
- Novozymes A/S

I HYCON-projektet anvendes en særlig gaskromatograf kaldet GC-IRMS til at afklare udbredelsen af dette fænomen ved forskellige procesbetingelser og biomasser. Endvidere undersøges muligheden for at bruge online massepektrometri (MIMS) til at overvåge isotopmærkede komponenter med høj tidsopløsning.

### Molekylærbiologiske metoder

Identiteten af mikroorganismene i gyllebaserede biogasanlæg er relativt forskellige i forhold til biogasanlæg, der primært er baseret på plantebiomasse, spildevand eller kombinationer heraf. Og selv om sammensætningen af de mikrobielle konsortier er afgørende for anlæggets drift, er der i dag kun meget lidt kendskab til deres identitet og funktion.

I HYCON-projektet har vi fokus på såvel de delpopulationer, der er til stede i alle anlæg og dem, der er mindre hyppige. Ved hjælp af en række molekylære teknikker kombineret med isotopteknikker ønsker vi at opnå en bedre forståelse for disse gruppers funktion, da de er afgørende for procesoptimering og øget stabilitet.

*Anders Feilberg er lektor ved Aarhus Universitet, Institut for Ingeniørvidenskab.*

*Jeppe Lund Nielsen er lektor ved Aalborg Universitet, Institut for Kemi og Bioteknologi.*

*Freya Mosbæk er Ph.d.-stipendiat ved Aalborg Universitet, Institut for Kemi og Bioteknologi.*

*Michael Nielsen er postdoc ved Aarhus Universitet, Institut for Bioscience – Mikrobiologi.*

*Niels Peter Revsbech er professor ved Aarhus Universitet, Institut for Bioscience - Mikrobiologi.*

*Lars D. M. Ottosen er sektionsleder ved Teknologisk Institut, Kemi- og Bioteknik.*

I fremtidens VE-samfund er det nødvendigt, at elsektoren sammentænkes med varme-, gas- og transportsektorerne. Elbiler bliver en nøgleteknologi, og brint skal kombineres med kulstof fra biomasse eller atmosfæren, så der kan fremstilles brændstoffer til transportsektoren.



Foto: Torben Skott/BloPress

# Det intelligente energisystem

Af Brian Vad Mathiesen, Henrik Lund, Frede K. Hvelplund, David Connolly, Niclas S. Bentsen, Davide Tonini, Poul Erik Morthorst, Henrik Wenzel, Thomas Astrup, Niels I. Meyer, Marie Münster, Poul Alberg Østergaard, Birgitte Bak-Jensen, Mads Pagh Nielsen, Erik Schaltz, J.R. Pillai, Lorie Hamelin, Claus Felby, Kai Heussen, Peter Karnøe, Jesper Munksgaard, Lise-Lotte Pade og Frits M. Andersen

Det langsigtede mål for Danmarks energiforsyning er klart: I 2050 skal Danmark være helt fri af de fossile brændsler. Det rejser spørgsmålet om, i hvor høj grad vi skal erstatte de fossile brændsler med biobrændsler og bioenergi, og/eller i hvor høj grad vi skal satse på besparelser og anvende andre former for vedvarende energi.

Det store fokus på biomasse i Danmark, kombineret med den store tiltro til at anvende biomasse i Europa, bør vække bekymring blandt især beslutningstagere, virksomheder og forsyningsselskaber. På trods af at vi har formået at holde vores primære energiforbrug konstant, vil vi fremover skulle nedbringe energiforbruget for at kunne få biomasseresurserne til at slå til.

Danmark har haft særdeles stort fokus på at effektivisere i konverteringssektoren og spare i slutforbruget. Det skal vi fortsat gøre, ligesom vi fortsat skal have en decentral struktur. Med hensyn til forsyningssikkerhed

går vi dog ind i en ny fase. Spørgsmålet er, i hvor høj grad vi skal satse på biomasse, og i hvor høj grad vi skal lave besparelser og investeringer i andre former for vedvarende energi som vindmøller?

## CEESA-projektet

I CEESA-projektet, der er støttet af Det Strategiske Forskningsråd, har en stor gruppe forskere igennem flere år arbejdet med scenarier for, hvordan Danmark kan blive 100 procent baseret på vedvarende energi i 2050 (se figur 1). I arbejdet har der især været fokus på spørgsmålet om anvendelse af biomasse og omlægning af transportsektoren.

En af de vigtigste konklusioner i projektet er, at transportsektoren er en nøgleudfordring i forhold til hele denne omstilling. Hertil kommer, at biomasseresourcen er begrænset. Derfor skal der anvendes så meget el som muligt direkte til transport, især fordi arealanvendelsen til elproduktion er væsentlig mindre end produktion af biomasse til biobrændstoffer.

Det intelligente elnet bliver en vigtig del af fremtidens energisystem. Allerede i dag har vi velfungerende markeder, der kan sikre lave produktionspriser, samtidig med at vi har et stabilt elsystem. I fremtiden bliver udfordringerne større, idet vi i 2050 vil have 50 procent vindenergi. Tidligere forskning har vist, at det ikke er ellagre som pumpeværker, batterier og lig-

nende, der kan løse de udfordringer, vindmøllerne giver.

## Det intelligente energisystem

I CEESA har vi arbejdet med konceptet Smart Energy Systems eller det intelligente energisystem. Det er defineret som et energisystem med en stor sektorintegration, flere forskellige typer fleksibelt forbrug og lagringsmuligheder. Analyserne viser, at når elsektoren sammentænkes med varme-, gas- og transportsektorerne kan vi finde de bedste og de billigste løsninger til integration af vind.

I et vedvarende energisystem er brændselseffektivitet vigtig. Derfor skal der gives prioritet til kraftvarme og til så lidt elproduktion som muligt, hvor varmen går til spille.

Når vindandelen øges, er det første vigtige skridt, at varmesektoren integreres. Her er vi langt i Danmark. Vi kan lave kraftvarme, når vinden ikke blæser, og bruge fjernvarme fra billige varmelagre, når det blæser. Alle kraftvarmeværker opererer på et elmarked, der sikrer, at produktion og forbrug hænger sammen time for time. Det kan give mulighed for at integrere op til cirka 20 procent vindenergi, uden at det går ud over brændselseffektiviteten, da kraftvarmefordelen kan bevares.

## Over 40 procent el fra vind

I næste fase er den største udfordring at få kraftværkerne til at mindske eller helt stoppe deres elproduktion,

når vinden blæser. Derfor er det vigtigt, at kraftvarmeverkerne har store varmelagre og varmepumper til rådighed, så de kan dække varmebehovet i de perioder, hvor der er rigeligt med vindkraft. Med det koncept kan vindmøllerne dække over 40 procent af elforbruget.

Parallelt med de store varmepumper i kraftvarmesystemerne bør fjernvarmen fastholdes og udbygges. Hvor fjernvarmen bliver for dyr, bør eksisterende olie- og gasfyr erstattes med individuelle varmepumper. Derved spares der brændsel, og integrationen af vindkraften bedres en smule som følge af en mindre stigning i elforbruget.

Det er dog næppe hensigtsmæssigt at satse stort på at anvende individuelle varmepumper til yderligere integration af vind. Dertil er investeringerne i overkapacitet og individuel varmelagre for store.

## Transportsektoren

Sektorintegrationens næste skridt bør således være transportsektoren, og her er elbilerne en nøgleteknologi, der kan gøre det muligt at erstatte ineffektive forbrændingsmotorer med effektive elmotorer.

Med elbilerne og mere el i den kollektive transport kan man komme op

på 50-60 procent vindenergi. Det betyder store besparelser i forhold til anvendelsen af biomasse. Den store udfordring er de lange, tunge transport og fly. Her er der sandsynligvis brug for flydende brændsler.

Den åbenlyse løsning er forskellige former for biobrændstoffer. I CEESA projektet har vi arbejdet med forskellige teknologier til fremstilling af flydende brændsler, og det står klart, at de brændsler, der anvendes, bør kunne indeholde energi fra vindmøller. Dette kan nedbringe afhængigheden af biomasse til et bæredygtigt niveau.

## Brint og kulstof

I det omfang, der ikke kan anvendes el direkte eller indirekte via batterier, skaber dette det tredje trin i det intelligente energisystem. Ved hjælp af vindmøllestrøm kan der produceres brint, og ved at kombinere brint med kulstof fra biomasse eller atmosfæren kan der fremstilles gasformige og flydende brændstoffer til transportsektoren. På den måde kan vindandelen hæves yderligere til 70-80 procent.

Når vindandelen kommer op på det niveau skyldes det blandt andet, at elforbruget stiger kraftigt, fordi store mængder fossile brændsler til

den tunge trafik skal erstattes med vedvarende energi.

En sådan systemintegration giver gode muligheder for at lagre den vedvarende energi, da gas kan lagres flere måneder i naturgasnettet, og flydende brændsler kan lagres i tankanlæg.

*Brian Vad Mathiesen, Henrik Lund, Frede K. Hvelplund, David Connolly, Poul Alberg Østergaard, Birgitte Bak-Jensen, Mads Pagh Nielsen, Erik Schaltz, J.R. Pillai, og Peter Karnøe er alle ansat ved Det Teknisk-Naturvidenskabelige Fakultet, Aalborg Universitet.*

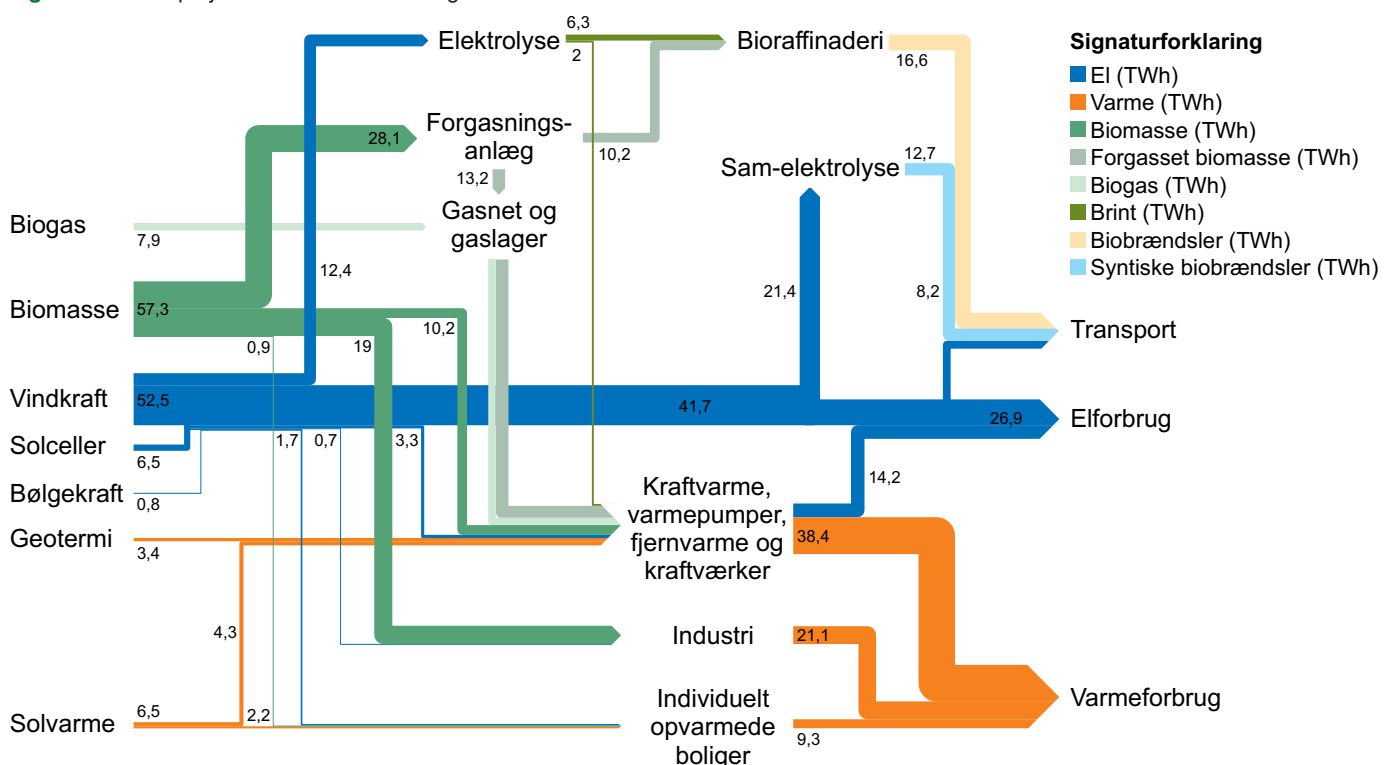
*Niclas S. Bentsen og Claus Felby er ansat ved Det Natur- og Biovidenskabelige Fakultet, Københavns Universitet.*

*Poul Erik Morthorst, Thomas Astrup, Davide Tonini, Niels I. Meyer, Marie Münster, Lise-Lotte Pade, Kaj Heussen og Fritz M-Andersen er ansat ved Danmarks Tekniske Universitet.*

*Henrik Wenzel og Lorie Hamelin er ansat ved Det Tekniske Fakultet, Syddansk Universitet.*

*Jesper Munksgaard er i dag ansat ved Københavns Energi.*

Figur 1 CEESA-projektets scenarie for energistrømme i 2050





# Biomasse til transportsektoren

Transportsektoren bliver en af de helt store udfordringer i et fremtidigt energisystem baseret på 100 procent vedvarende energi. Selv med de mest optimistiske antagelser om nye teknologier kan behovet næppe dækkes med biobrændstoffer baseret på danske resurser. Løsningen består i at begrænse stigningstakten i transportbehovet og få så meget el ind i transportsektoren som muligt.



Foto: Torben Skøtt/BioPress

Af Brian Vad Mathiesen, David Connolly, Henrik Lund, Mads Pagh Nielsen, Erik Schaltz, Henrik Wenzel, Niclas S. Bentsen, Claus Felby, Per Kaspersen og Kenneth Hansen

I de seneste fire årtier er det lykkedes Danmark at holde det samlede primære energiforbrug konstant på omkring 800 PJ. Det er sket på trods af en stor stigning i energiforbruget til transport og en lille stigning i elforbruget. I 1980 brugte vi mindre end 150 PJ til transport, men det er steget til over 200 PJ, selvom der er sket effektiviseringer inden for området.

Særligt to forhold gør det særdeles vanskeligt at omstille transportsektoren til 100 procent vedvarende energi: For det første er sektoren historisk set 95 procent afhængig af olie, og for det andet har der været en betydelig vækst i transportbehovet over de sidste årtier.

Det står klart for de fleste, at det ikke giver mening at erstatte mere end 200 PJ olie med biobrændstoffer, da det vil kræve mere biomasse, end der kan produceres i Danmark, medmindre man ligefrem vælger at

inddrage naturarealer og en del af fødevarereproduktionen.

Foruden afhængigheden af olie og den store vækst er sektoren yderst kompleks. For at kunne lave scenarier for transportsektoren i fremtiden skal der en dybere forståelse til af transportformer, -vaner, -længder og -behov.

## Væksten i transportbehovet

I CEESA-projektet, der er støttet af Det Strategiske Forskningsråd, er transportsektoren blevet endevendt. Der er blevet udviklet et referenceforløb, og det eksisterende transportsystem er blevet kortlagt for ikke mindre end 26 forskellige transporttyper inden for person- og gods-transport.

I referencescenariet har vi valgt at medregne al transport, der har tilknytning til Danmark. Det betyder, at hvis alle andre lande benytter den samme afgrænsning, bliver hele verdens transportbehov medregnet.

For at kunne lave en sådan kortlægning er transportbehovene blevet inddelt i national, transit og international transport. Det vil sige, at 100 procent af national transport er medregnet samt 100 procent af dansk

transittransport i udlandet. For den internationale transport er det antaget, at 50 procent er relateret til Danmark.

Al transport er således med i de scenarier, der er lavet, men det betyder samtidig, at arbejdet ikke er helt sammenligneligt med andre studier, hvor man ikke medregner den internationale luft- og skibstransport. For eksempel er transportenergiforbruget i CEESA's referencescenarie for 2050 omkring 75 PJ højere end i Klimakommissionens rapport.

Hvis vi antager den vækst i transporten, som de officielle myndigheder normalt bruger, vil transportbehovet være dobbelt så stort i 2050 som i dag. Med en høj vækst i transportbehovet viser scenarierne i CEESA, at selv med de mest optimistiske antagelser vedrørende nye teknologier, kan så stort et behov næppe dækkes med biobrændstoffer baseret på danske resurser.

## El har første prioritet

Hvis vi erstattede dagens forbrug af benzin, diesel, fly- og skibsbrændstof med biobrændstoffer, ville det kræve et større areal end Danmarks land-

brugsareal med de afgrøder og den produktion, vi har lige nu. Hvis man ville dække behovet, er det teknisk set muligt, men det vil kræve meget væsentlige omlægninger fra fødevarerproduktion til energiafgrøder.

For mindre mængder biobrændstoffer baseret på restprodukter kan der imidlertid være et arealforbrug på nul. Det er dog kun tilfældet, hvis restprodukterne ikke kan anvendes til andre formål.

I en teknisk sammenligning bruger vindmøller et langt mindre areal end biobrændstoffer, selv når vi sammenligner med 2. generationsteknologier. Hvis vi vælger at prioritere hensyn til natur og fødevarerproduktion eller forsyningsikkerhed anderledes, kan billedet ændre sig, men arealforbruget vil være større end med vindmøller, og kan ikke være nul, hvis hele transportsektorens energibehov skal dækkes.

Det er ikke ensbetydende med, at der ikke skal bruges biobrændstoffer, men det betyder, at der skal anvendes mest mulig el i transportsektoren, da elproduktion fra for eksempel vindmøller kræver langt mindre areal end biomasse.

Scenarierne er udviklet med fokus på det primære energiforbrug, arealforbruget og de samlede omkostninger. Arbejdet indeholder også beregninger af, hvad det vil koste at ændre

på infrastrukturen, for eksempel ved at flytte en del af transporten fra biler til jernbaner.

### Fordobling problematisk

Resultaterne af CEESA-projektet viser tydeligt, at en fordobling af transportbehovet er problematisk, men de viser også, at der er store muligheder for at øge anvendelsen af el i transportsektoren.

For den øvrige transport skal der bruges biobrændstoffer og/eller syntetiske brændstoffer. I den forbindelse peges der i projektet på muligheden for at kombinere brint med kulstof fra biomasse eller atmosfæren, også kaldet hydrogenering. Det giver mulighed for at booste biomassen, så det samlede behov for biomasse bliver mindre, samtidig med at der kan laves flydende eller gasformige brændsler, der er nemmere og billigere at håndtere end brint.

I det lys er der en klar udfordring: Prisen på biomasse og teknologi spiller ind på de samlede omkostninger. Samlet set er der lavet et transportsценarie, hvor godstransporten vokser som i "business-as-usual", men hvor persontransporten "kun" vokser knap 50 procent i forhold til i dag i stedet for knap 100 procent. Vi kan altså køre lige så meget eller mere i bil i fremtiden sammenlignet med i dag, og sam-

tidig komme over på vedvarende energi.

Noget af væksten i vej- og flytransport overføres til jernbaner i scenariet. Derpå øges andelen af hybridbiler og rene elbiler til at udgøre 85 procent af personbilflåden. Resten skal dækkes af flydende brændsler.

### Løsninger

Som nævnt er det nødvendigt at finde løsninger, hvor man kombinerer brint med biomasse eller andre kilder med kulstof, herunder kraftværkernes røggas. I CEESA-projektet er der regnet på fire forskellige teknologier, hvor man kombinerer brint og kulstof, og her viser resultaterne, at:

- Det primære brændselsforbrug kan sænkes til under 150 PJ (se figur 1).
- Det er teknisk muligt at dække transportbehov og behov for biomasse i andre dele af energisystemet med biomasse svarende til det danske potentiale.
- De samlede omkostninger er mindre end en situation med en høj vækst i persontransportbehovet.
- Omkostninger ved hydrogenering ikke er væsentligt forskellige i forhold til omkostninger fra scenarier baseret på biobrændsler, som vi kender dem i dag.
- Investeringer i infrastruktur opvejer de besparelser, der er på brændsler og på sparede investeringer i vejnettet.

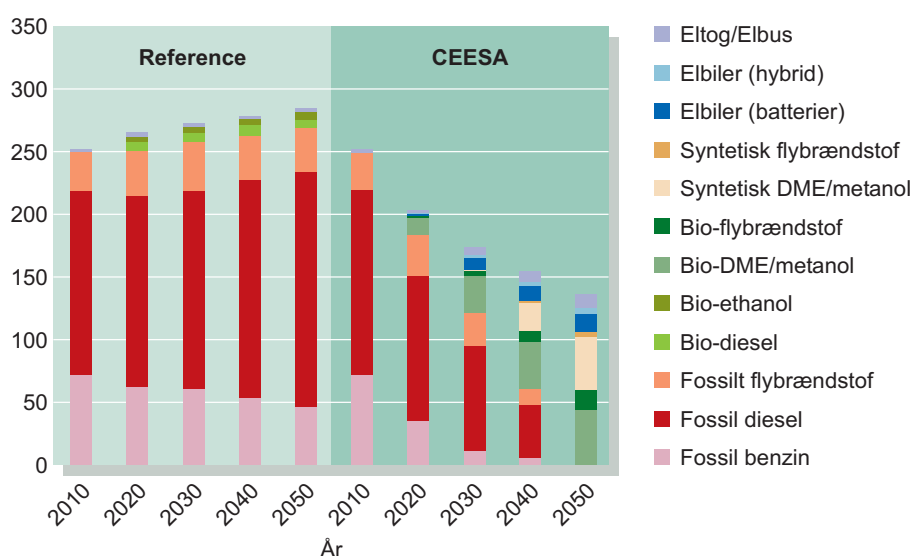
Løsningerne findes altså, men det kræver, at man satser på at begrænse stigningstakten inden for transporten og får så meget el som muligt ind i transportsektoren. Biomassen er en begrænset resurse, som der bliver rigeligt brug for.

*Brian Vad Mathiesen, Henrik Lund, David Connolly, Mads Pagh Nielsen, Erik Schaltz og Kenneth Hansen er alle ansat ved Det Teknisk-Naturvidenskabelige Fakultet, Aalborg Universitet.*

*Niclas S. Bentsen og Claus Felby er ansat ved Det Natur- og Biovidenskabelige Fakultet, Københavns Universitet.*

*Henrik Wenzel er ansat ved Det Tekniske Fakultet, Syddansk Universitet.* ■

**Figur 1** Energiforbrug i referenceforløbet og CEESA-forløbet



Det primære energiforbrug i referenceforløbet med en høj vækst i transportbehovet og det anbefalede scenarie i CEESA-projektet med en moderat vækst i transportbehovet.



Foto: DONNG Energy

*Inbicon:*

# Fra mark til marked

Med Inbicon-teknologien er det i dag muligt at omdanne halm til bioethanol, foder og brændsel. En unik forbehandlingsteknik resulterer i en højere energieffektivitet, end det er muligt med konkurrerende processer, og det forventes at de første fuldskalaanlæg vil blive opført inden for de næste 1-2 år.

*Af Claus Hviid Christensen og Niels Henriksen*

Inbicon er en teknologiplatform, der har til formål at udvikle et 2. generationsbioraffinaderi (2G).

I sin nuværende udformning gør Inbicon-teknologien det muligt at omsætte biomasse, primært halm, til 2G bioethanol, lignin og melasse med stor effektivitet. Den producerede bioethanol kan umiddelbart udnyttes som transportbrændstof, mens lignin kan anvendes som et fast brændsel på kraftvarmeværker. Melassen udgør et attraktivt dyrefoder, eller det kan bruges til at booste gasproduktionen i gyllebaserede biogasanlæg. På den måde kan samtlige ingredienser i restprodukter fra landbruget udnyttes til fremstilling af nyttige produkter.

Hidtil har der primært været fokus på hvedehalm som råstof og ethanol, lignin og melasse som slutprodukter, men teknologien kan let udvikles til at håndtere en stort set hvilken som helst tilgængelig etårig biomasseresurse; ligesom den kan modificeres til at producere en hel række andre vigtige slutprodukter. Det er denne fleksibilitet i såvel valg af råstof som i mulige slutprodukter, der er årsagen til, at Inbicon kan kaldes en teknologiplatform.

## Udfordringer

Der eksisterer i dag en meget lang række større og mindre produktionsanlæg, primært i USA og Brasilien, der omdanner stivelsesholdig biomasse til bioethanol ved fermentering efterfulgt af en passende destillation. Produktionen af transportbrændstoffer ud fra råvarer, der kan anvendes til fødevarer, har dog længe været kontroversiel og medført et ønske om at udvikle teknologier, der i stedet kan anvende restprodukterne fra landbruget.

Sådanne restprodukter vil overvejende indeholde cellulose og hemicellulose frem for stivelse, og det giver en række udfordringer: Cellulosen vil ofte være omgivet af ligninstrukturer, der vanskeliggør den enzymatiske hy-

drolyse, som er nødvendig for at fremstille kulhydrater til videre fermentering, og biomassen indeholder en række forskellige kulhydrater som C5 sukker, der kan være vanskelig at fermentere. Hydrolyse af stivelsesholdig biomasse som korn og majs giver derimod et relativt rent glukosesubstrat, der er let at fermentere ved brug af almindeligt tilgængelig gær.

Det er på denne baggrund, at DONG Energy har udviklet Inbicon-teknologiplatformen, der oprindeligt tog udgangspunkt i en række forsøg med at vaske halm ren for alkalisalte for at reducere risikoen for tæring på kraftvarmeværker.

## Høj energieffektivitet

Inbicon-teknologien, i den form den i øjeblikket demonstreres, er illustreret skematisk i figuren øverst til højre. I første omgang bliver halmen neddelte og kogt i 10-20 minutter ved en temperatur på 150-200 °C. Herved bliver alkalisalte og visse andre uønskede komponenter vasket væk.

Forbehandlingen gør biomassens indhold af cellulose tilgængelige for den efterfølgende hydrolyse. Derefter kan den glukoseholdige biomasse fermenteres til ethanol, der isoleres ved en destillation, mens lignin kan sepa-

reses fra fermenteringsblandingen ved en simpel filtrering, hvor der også fjernes eventuelle gærrester.

Den unikke og patenterede forbehandling resulterer i en meget højere koncentration af sukker i fermenteringsvæsken end det er muligt med konkurrerende processer. Det giver en højere energieffektivitet, blandt andet fordi der skal fjernes mindre vand ved destillationen.

Den producerede 2G bioethanol kan umiddelbart bruges som benzintiladditiv, mens ligninen er så ren, at den direkte kan benyttes som et fast bændsel på kraftvarmeværker til erstatning af kul. Molassen, der består overvejende af C5-sukre, er desuden et attraktivt dyrefoder.

### Fuldskalaanlæg om 1-2 år

Inbicon-teknologien demonstreres og videreudvikles i øjeblikket i et demonstrationsanlæg i Kalundborg med en kapacitet på fire tons halm i timen. Det svarer til cirka 30.000 tons halm om året, hvilket er omkring 10-40 procent af et fuldt kommercielt Inbicon-anlæg.

Demonstrationsanlægget blev sat i drift i forbindelse med COP15 i Kø-

benhavn 2009. Ved nominal last producerer anlægget 5,4 millioner liter 2G bioethanol, 11,4 tons ligninipiller og 13,9 tons C5 melasse om året. Anlægsomkostningerne beløber sig til omkring 400 millioner kroner og fuld-tidsdrift af anlægget beskæftiger cirka 30 personer.

På baggrund af den succesfulde demonstration er det i dag muligt at opføre og drive fuldt kommercielle Inbicon-anlæg og det forventes, at de første anlæg vil blive opført inden for de næste 1-2 år. Derfor er demonstrationsanlægget i Kalundborg nu overgået til kampagnedrift.

### Nye veje

Inbicon-teknologiplatformen kan udvikles i mange interessante spor. Der bliver løbende arbejdet med optimeringsstudier, der skal være med til at reducere anlægs- og driftsomkostningerne, men mulighederne for at udvikle processen i helt andre retninger har også høj prioritet.

Det handler blandt andet om at udvikle en mere fleksibel forbehandlingsproces, der vil gøre det muligt at håndtere helt andre typer biomasser, herunder blandinger, så man får mu-

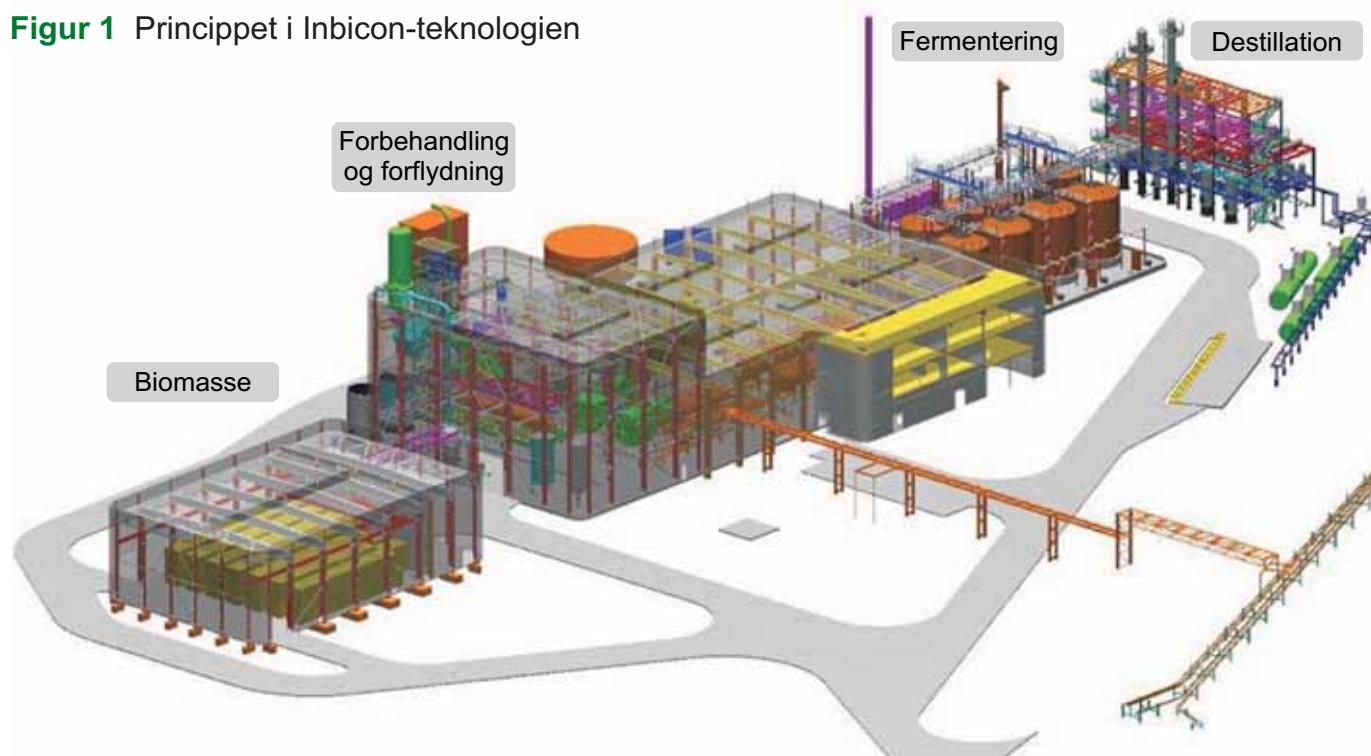
lighed for at udnytte den til enhver tid mest attraktive og tilgængelige biomasseresurse. Derudover undersøges mulighederne for at producere mere højværdige produkter end bioethanol og lignin.

Selvom både bioethanol og lignin er særdeles ønskværdige i energisektoren, så er det oplagt, at fremstillingen af en lang række industrielle kemikalier kan medføre en højere værdiskabelse, da de ofte kan sælges til priser, der er mere end dobbelt så høje som for biobrændstoffer. Det kræver selvfølgelig udvikling af nye processer, enzymer og katalysatorer, der effektivt kan omdanne sukker eller lignin til disse produkter. Netop derfor tales der undertiden om Inbicon-teknologien som en sukkerplatform, da man i princippet kan forestille sig hele den kemiske industri baseret på biomasse i stedet for kul, olie og naturgas, som den er i dag.

*Claus Hviid Christensen er seniormanager hos DONG Energy, Group R&D.*

*Niels Henriksen er teknologichef hos DONG Energy, New Bio Solutions. ■*

**Figur 1** Princippet i Inbicon-teknologien



Princippet i Inbicon-teknologien, hvor halm og andre restprodukter fra landbruget omdannes til bioethanol, foder og brændsel til blandt andet kraftvarmeværker.

Med REnescience-teknologien kan man populært sagt skille husholdningsaffald i tre fraktioner: Organisk affald som kan booste gasproduktionen i biogasanlæg, glas og metal som kan genanvendes, og en restfraktion der kan bruges som brændsel på kraftvarmeværker.

## REnescience:

# Fra affald til afkast

Af Claus Hviid Christensen og Niels Henriksen

REnescience-teknologien er udviklet for at sikre en effektiv udnyttelse af husholdningsaffald og tilsvarende typer affald fra industrien. Det sker gennem en proces, der inkluderer hele affaldsmængden, og som indledningsvis opkoncentrerer de bionedbrydelige elementer i en såkaldt biovæske.

Biovæsken udgør et særdeles velegnet råstof til fremstilling af for eksempel biogas, der kan anvendes til produktion af el og varme eller opgraderes og sendes ud i naturgasnettet. Den resterende del af affaldet kan separeres i forskellige dele, herunder metal og plast der kan genbruges og en restfraktion, der kan anvendes som brændsel på kraftvarmeværker.

På trods af at mængden af affald på globalt plan har været konstant stigende gennem mange år, og på trods af at affald efterhånden er bredt anerkendt som en potentiel resurse, findes der i dag kun begrænsede muligheder for at anvende affaldet på en omkostningseffektiv måde.

I Danmark eksisterer der allerede en lang tradition for effektiv udnyttelse af affald i form af moderne affaldsforbrændingsanlæg. På de 29 danske forbrændingsanlæg bliver der således omsat cirka fire millioner tons affald om året med en virkningsgrad på 82 procent. Det resulterer i en energiproduktion på omkring 40 mil-



Foto: DONG Energy

*Pilotanlæg op Amagerforbrænding, hvor usorteret husholdningsaffald bliver kogt og tilsat enzymer, så man får mulighed for at opdele affaldet i organisk og uorganisk materiale.*

lioner GJ, hvoraf hovedparten bliver til fjernvarme.

Det er dog en forventning om en endnu bedre udnyttelse af affaldet i fremtiden, hvilket for eksempel kan ske gennem mere rationel udnyttelse af energien i det biologiske affald og ved genanvendelse af de mere værdifulde ingredienser som metal og plast. Det er til dette formål, at DONG Energy har udviklet REnescience-teknologien.

### Erfaringer fra Inbicon

Den patenterede REnescience-teknologi er udviklet med udgangspunkt i



Foto: Torben Skott/BioPress

DONG Energy's erfaringer fra Inbicon (se artiklen på de to foregående sider). Her forbehandles biomassen i form af halm og gennemgår en enzymatisk hydrolyse, hvorved kulhydrater skilles fra lignin.

Figuren til højre illustrerer skematisk, hvordan REnescience-processen, der er kontinuert og fuld automatiseret, er sammensat af en række procestrin.

Affaldet, typisk husholdningsaffald, bliver indledningsvis varmet op til 100 °C ved atmosfærisk tryk. Derved bliver det muligt at nedbryde det biologiske affald til en såkaldt biovæske ved enzymatisk hydrolyse, der kræver en særlig enzymblanding. Ved denne proces opsamles cirka 95 procent af det bionedbrydelige affald.

Efterfølgende separeres den faste fraktion fra biovæsken, der med et tørstofindhold på omkring 20 procent er let at pumpe. Væsken består overvejende af diverse kulhydrater, der umiddelbart kan udnyttes som et vær-

*Pilotanlægget hos Amagerforbrænding har været i stabil drift siden december 2009. Anlægget har en kapacitet på ét ton affald i timen.*

difuldt råstof til produktion af biogas. Fra biovæsken kan der således produceres 90-100 m<sup>3</sup> metan per ton usorteret husholdningsaffald.

Det faste affald separeres herefter i to plastfraktioner: 2D (film, poser og lignende) og 3D (flasker og beholdere) samt en fraktion af metal, glas og grus. Disse fraktioner kan efter passende behandling genanvendes eller alternativt forbrændes. 2D-fraktionen

rengøres til slut i en særligt udviklet vaskemaskine, så det umiddelbart kan oparbejdes, og 3D-fraktionen skylles/håndteres efter behov.

På denne måde gør Renaissance-teknologien det muligt at producere fire separate og værdifulde produkter fra affaldet, nemlig biovæsken, 2D og 3D materiale samt genanvendelige materialer. Biovæsken indeholder også diverse salte, der efter produktion

af for eksempel biogas ender i en fast fraktion, der kan bruges som erstatning for kunstgødning.

### Næste skridt

Renaissance-teknologien er i øjeblikket i drift som et kontinuert pilotanlæg hos Amagerforbrænding. Anlægget har en kapacitet på ét ton affald i timen og har været i stabil drift siden COP15 i december 2009.

Det næste skridt for Renaissance-teknologien er opførelse af et kommercielt demonstrationsanlæg med en kapacitet på omkring ti tons/time. Det forventes opført inden for de næste cirka to år, og Renaissance-teknologien vil således kunne tilbydes på kommercielle vilkår i løbet af kort tid og derved bidrage til en mere rationel udnyttelse af affald, end det er muligt i dag.

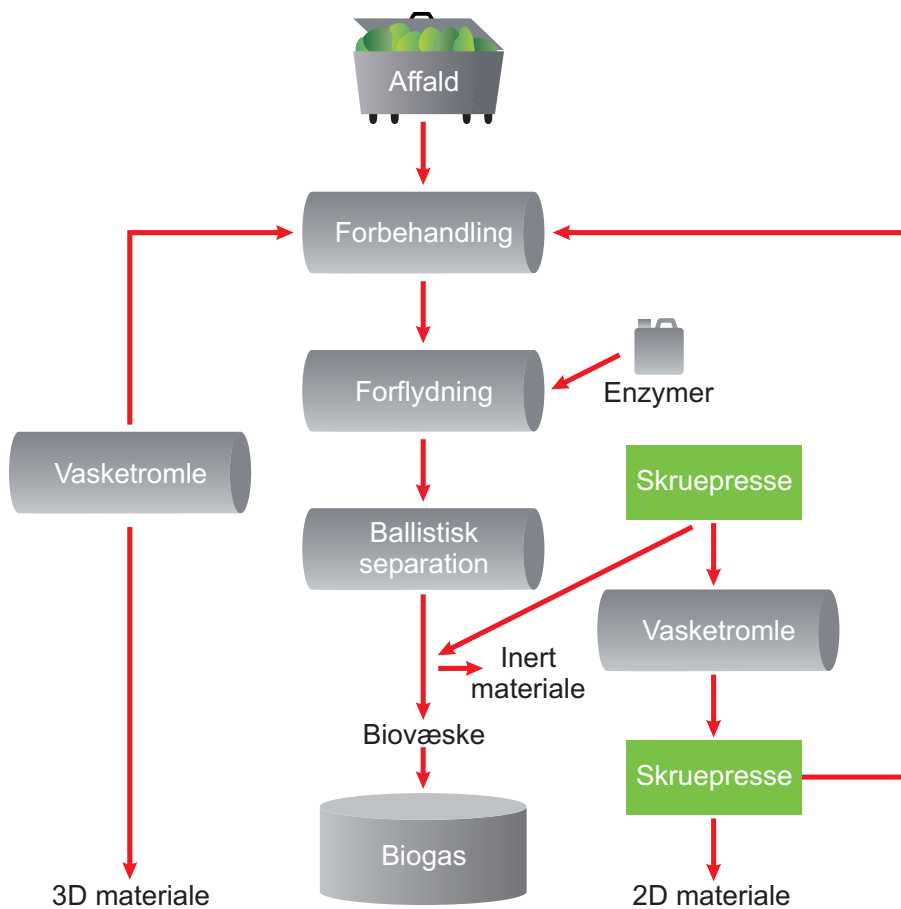
På længere sigt er det oplagt at se på, om biovæsken kan udnyttes mere effektivt til fremstilling af produkter, der er mere værdifulde end biogas. Det kunne være som råstof til produktion af bioethanol ved fermentering eller biodiesel ved superkritisk vandbehandling.

Med Renaissance-teknologien er det principielt ikke nødvendigt at kildesortere affald, men det vil i givet fald kunne føre til en endnu mere effektiv proces. Det vil på simpel vis være muligt at opnå endnu højere affaldsbehandlingskapacitet ved opstilling af parallelle linjer, der hver har en kapacitet på omkring ti tons affald i timen.

*Claus Hviid Christensen er seniormanager hos DONG Energy, Group R&D.*

*Niels Henriksen er teknologichef hos DONG Energy, New Bio Solutions. ■*

**Figur 1** Princippet i Renaissance-teknologien



Princippet i Renaissance-teknologien, hvor usorteret husholdningsaffald bruges til energiproduktion samtidig med at værdifulde stoffer som metal og plast genanvendes.

*Pyroneer:*

# Fra besværlig biomasse til grøn gas

Med Pyroneer-teknologien er det blevet muligt at omdanne besværlig biomasse til grøn gas. I dag anvendes gassen til el- og varmeproduktion, men på sigt vil gassen kunne bruges som råstof til fremstilling af flydende brændstof.

Foto: DONG Energy

Af Claus Hviid Christensen og Niels Henriksen

*Pyroneer-forgasseren, hvor den grønne gas i starten blev brændt af i en fakkel. I dag bruges gassen til produktion af el og varme på Asnæsværket.*

Pyroneer-teknologien gør det muligt at omdanne biomasse til grøn gas, som overvejende består af brint, kulilte, metan, kuldioxid og kvælstof.

Gassen har mange anvendelsesmuligheder. I dag kan den anvendes som brændsel på et kraftvarmeværk, men på længere sigt vil den også kunne bruges som råstof i den kemiske industri, herunder til produktion af metanol, benzin og diesel. Teknologien demonstreres i øjeblikket i stor skala, og de første kommercielle anlæg forventes etableret inden for de næste 3-4 år.

En meget stor del af den tilgængelige, uudnyttede biomasse kan karakteriseres som besværlig og er således vanskelig at omsætte i veletablerede

processer. Det kan for eksempel være fordi biomassen har et højt indhold af alkali, der giver anledning til tæring på kraftvarmeværker eller fordi biomassen har en kemisk sammensætning, der gør, at den ikke umiddelbart kan anvendes til fremstilling af for eksempel bioethanol.

Disse besværlige biomasser, såsom energijafrøder, gyllefibre, halm og diverse restprodukter, kan i stedet nyttiggøres gennem en såkaldt forgasning, hvor biomassen opvarmes til omkring 650 °C i en atmosfære med iltunderskud. Herved dannes en grøn gas, som kan opgraderes til syntesegas.

Syntesegas er allerede i dag af enorm betydning i den etablerede ke-

miske industri, men her produceres den typisk fra fossile resurser, særligt kul og naturgas, og den bruges som råstof til fremstilling af en lang række syntetiske kemiske produkter. Derfor er det selvfølgelig særdeles interessant at kortlægge potentialet for fremstilling af grøn syntesegas og udvikle nye konkurrencedygtige teknologier til formålet.

Gennem en længere årrække er der på globalt plan udviklet en række forskellige biomasseforgassere, hvoraf flere har nået demonstrationsstadiet. Der eksisterer dog endnu ikke kommercielt etablerede biomasseforgassere på markedet, hvis man ser bort fra enkelte træforgassere, der er ved at vinde indpas.

## Fra LT-CFB til Pioneer

Pyroneer-forgasserens virkemåde er illustreret skematisk i nedenstående figur. Oprindeligt er konceptet bag forgasseren udviklet af Peder Stoholm med assistance fra Risø/DTU. Teknologien blev dengang kaldt for LT-CFB. Det står for lavtemperatur, cirkulerende, fluid bed og beskriver således forgasserens særlige tekniske karakteristika.

De indledende forsøg blev gennemført på en 500 kW forgasser på DTU-Risø. DONG Energy købte i 2009 alle rettigheder til teknologien og forestår nu det fortsatte udviklingsarbejde.

I sin nuværende udformning opererer Pyroneer-forgasseren ved atmosfæretryk. Temperaturen er valgt tilpas højt for at sikre, at forgasningen forløber med tilstrækkelig hastighed, men samtidig så lav at asken ikke smelter.

Det har gennem en lang række praktiske forsøg vist sig, at teknologien kan benyttes til forgasning af stort set alle typer biomasse, så længe disse er tørre; men indtil videre har fokus primært været på brugen af halm som brændsel. I fuldskala Pyroneer-forgassere vil der kunne opnås virkningsgrader på over 95 procent.

I øjeblikket demonstreres teknologien på Asnæsværket i Kalundborg, hvor forgasningen af halm i en 6 MW Pyroneer-forgasser blev påbegyndt i foråret 2011. Den nominelle effekt opnås ved indføding af omkring 1,5 tons halm i timen.

Syntesegassen afbrændes i Asnæsværkets kedel. Afbrænding af den grønne syntesegas er fordelagtig, da diverse næringsstoffer fra halmen ikke føres ind i kedlen på værket, men i stedet kan udtages fra forgasseren. Det betyder, at risikoen for korrosion og belægningsdannelse reduceres markant.

Asken forventes at kunne føres tilbage til landbrugsjorden uden yderligere forarbejdning. Faktisk viser indledende forsøg, at asken fra forgasseren delvist kan erstatte indkøbt kunstgødning. Alt tyder således på, at demonstrationen vil være succesfuld, og forgasseren har gennem perioder uden vanskeligheder kørt med op til 135 procent nominal last.

## Kommercielle anlæg

På baggrund af den igangværende demonstration vil det blive muligt at konstruere kommercielle Pyroneer-forgas-

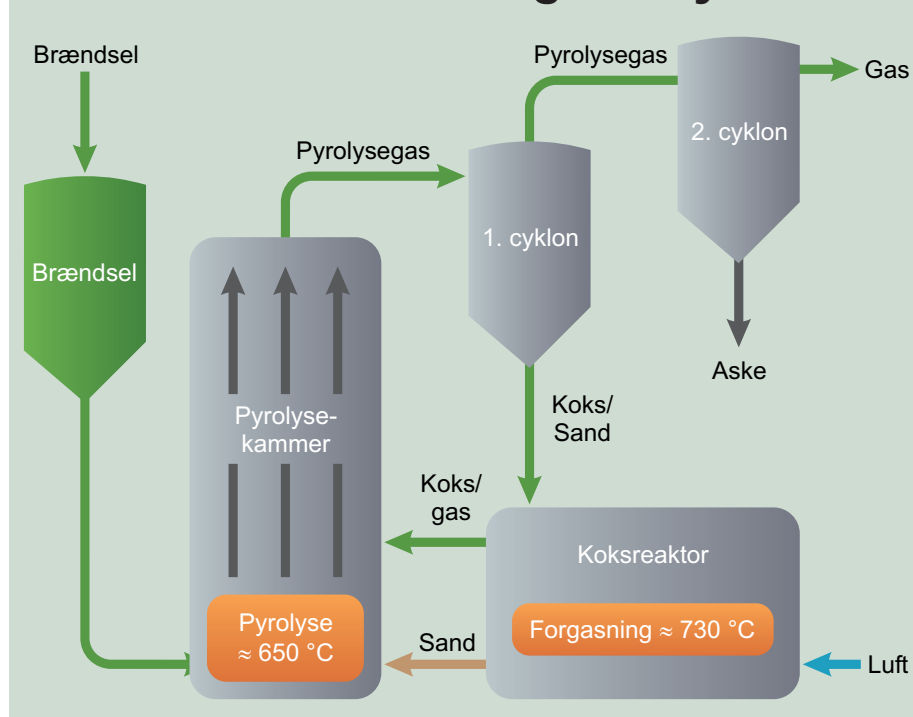
sere med en forventet effekt på omkring 50 MW (termisk). Indledningsvis vil teknologien være analog til den, der nu demonstreres på Asnæsværket. Det vil sige fremstilling af en grøn syntesegas og efterfølgende udnyttelse af gassen i et kraftvarmeværk til el- og varmeproduktion.

På længere sigt kan Pyroneer-forgassere med endnu større effekt blive interessante. De kan for eksempel bruges til at producere grøn syntesegas, der efterfølgende kan anvendes som råstof til fremstilling af metanol, syntetisk benzin (metanol til benzin) eller diesel (Fischer-Tropsch). Det vil formentlig kræve, at Pyroneer-forgasseren udvikles til at kunne operere ved højere tryk, og det vil desuden kræve, at særlige gasrensningssystemer udvikles, da anvendelsen i de petrokemiske processer forudsætter en meget ren syntesegas.

*Claus Hviid Christensen er senior-manager hos DONG Energy, Group R&D.*

*Niels Henriksen er teknologichef hos DONG Energy, New Bio Solutions. ■*

## Sådan bliver halm til gas i Pyroneer forgasseren



I forgasseren cirkulerer sand ved en temperatur på omkring 650 °C. Halmen føres ind i bunden af pyrolyse-kammeret, og så snart halmpartiklerne rammer sandet, frigives gassen og føres op til 1. cyklon, hvor sand og koks sorteres fra, mens gassen fortsætter til 2. cyklon.

Cirka 20 procent af halmens energiindhold bliver ikke omsat i første omgang, mens føres til koksreaktoren, hvor der tilsættes luft, og biomassen får lidt længere opholdstid. I koksreaktoren sker der en delvis forbrænding af koksen, hvorved sandet varmes op til 730 °C, og koksgassen føres tilbage til pyrolyse-kammeret.

Pyroneer-forgasseren kan omdanne cirka 95 procent af halmens energiindhold til gas, og næringsstofferne – der primært består af alkali og fosfor – kan føres tilbage til landbrugsjorden via asken.



# Fra organisk affald til olie

Når organisk affald kommer under høje tryk og temperaturer, omdannes biomassen til råolie, der efterfølgende kan raffineres og bruges i transportsektoren. Processen, der kaldes for HTL, er yderst robust i forhold til hvilke biomasser, der kan anvendes og fleksibel i forhold til hvilke typer brændstoffer, der kan produceres.

*Af Per Runge Christensen, Anders Juul Mørup, Jacob Becker, Aref Mamakhel, Lasse Rosendahl, Marianne Glasius, Bo Brummerstedt Iversen, Rudi P. Nielsen, Jessica Hoffmann, Saqib Toor, og Erik G. Søgaard*

Der kan være mange fordele ved at omdanne biomasse til flydende brændstof. Energitætheden er høj, der er mange anvendelsesmuligheder, og flydende brændstof kan bruges i transportsektoren, der er en af de helt store udfordringer, når det handler om at omstille energisystemet til bæredygtige løsninger.

Produktion af bioethanol via gæring af biomasse og fremstilling af bioolie ved pyrolyse er nogle af de teknologier, der er kommercielt tilgængelige, men også behæftet med visse ulemper, som begrænser deres anvendelighed.

Ved produktion af bioethanol indgår destillation, der er en yderst energikrævende proces, og anvendelse af traditionelle landbrugsafgrøder som råvarer er problematisk ud fra et etisk og økonomisk synspunkt. Det har ført til udvikling af 2. generationsbioethanol, der anvender halm og andre restprodukter som råvarer, men der mangler endnu et kommercielt gennembrud, da enzymer til nedbrydning af biomassen er forholdsvis dyre.

Ved produktion af bioolie gennem pyrolyse, hvor biomassen nedbrydes ved høje temperaturer i en iltfattig atmosfære, skal biomassen have et lavt vandindhold for at minimere dannelsen af aske. De fleste biomasser har imidlertid et højt vand-

indhold og derfor vil det ofte være nødvendigt med en energikrævende forbehandling. Derudover har olieproduktet et forholdsvis højt indhold af ilt, der først skal reduceres, før produktet kan opnå samme høje brændværdi som konventionel benzin og diesel.

## Omdannes til olie på minutter

HTL, der står for **Hydro Thermal Liquefaction**, er en alternativ omdannelsesproces, hvor restprodukter fra land- og skovbrug omdannes til råbioolie i et vandigt miljø ved høje temperaturer og tryk – typisk 250-400 °C og 100-300 bar.

Under disse forhold er vand i en såkaldt nærkritisk tilstand og får egenskaber, der er markant anderledes end ved atmosfærisk tryk og stuetemperatur. Det kan i kombination med katalysatorer udnyttes til at om-

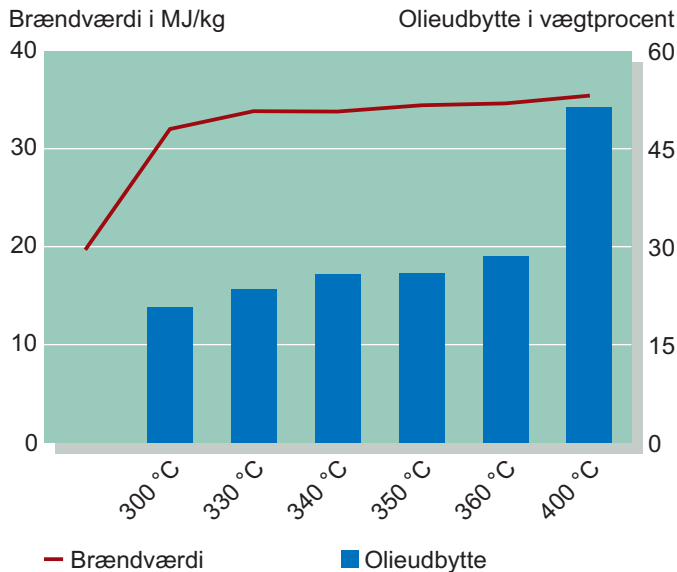
danne biomasse til olie inden for en reaktionstid på minutter. Da reaktionen foregår i vand, er det efterfølgende muligt at foretage en mekanisk separation af olie, salte, næringsstoffer og mineraler, hvorved behovet for destillation forsvinder.

HTL-processen er yderst robust med hensyn til hvilken biomasse, der anvendes. Det er uden betydning for processen, om der er potentielt skadelige stoffer i biomassen, og det åbner op for anvendelse af en lang række organiske affaldsstrømme fra industri og landbrug. Samtidig er processen yderst velegnet til våde organiske materialer, så der vil ikke være behov for energi til tørring af biomassen. Af oplagte muligheder kan nævnes alger, kloakslam, samt diverse affaldstyper fra kommunal renovation, industri og landbrug. HTL-processen kan således bruges til både at producere CO<sub>2</sub>-neutral bioolie



HTL-anlægget på Aarhus Universitet.

**Figur 1** Brændværdi og olieudbytte af DDGS



Udbytte og brændværdi for HTL-bioolie fremstillet af DDGS ved forskellige temperaturer.



HTL-anlægget på Aalborg Universitet, hvor biomasse i løbet af cirka 15 minutter kan omdannes til olie.

og til at minimere mængderne af affald.

### Anlæg på Aarhus Universitet

De høje tryk og temperaturer, som benyttes i processen, er ikke almen proces teknologi, og derfor er der på Aarhus Universitet blevet specialfremstillet et laboratorieanlæg, som kan bruges til forsøg.

Anlægget er opbygget som en såkaldt stop-flow reaktor, hvor biomasse pumpes ind i et tryksat og forvarmet reaktionskammer. Det giver en meget kontrolleret omdannelse af biomassen, der typisk har en opholdstid på 15 minutter i kammeret, hvorefter produktet pumpes ud.

Produktet består af en oliefase, en vandfase, en gasfase og et askeprodukt. Bioolien udvindes ved mekanisk separation og eventuelt ekstraktion af vandfasen. Olieudbyttet beregnes herefter ud fra et estimat af koncentrationen af biomasse i reaktionskammeret. Askeproduktet består primært af mineraler, som for eksempel kan benyttes til forbedring af landbrugsjord.

### Opvarmes på få sekunder

Hovedparten af de HTL-studier, der er omtalt i litteraturen, benytter sig af såkaldte autoklave-reaktorer, som i princippet er modificerede trykkogere. Her fyldes biomasse i autoklaven,

mens den er kold, hvorefter den opvarmes til den ønskede temperatur.

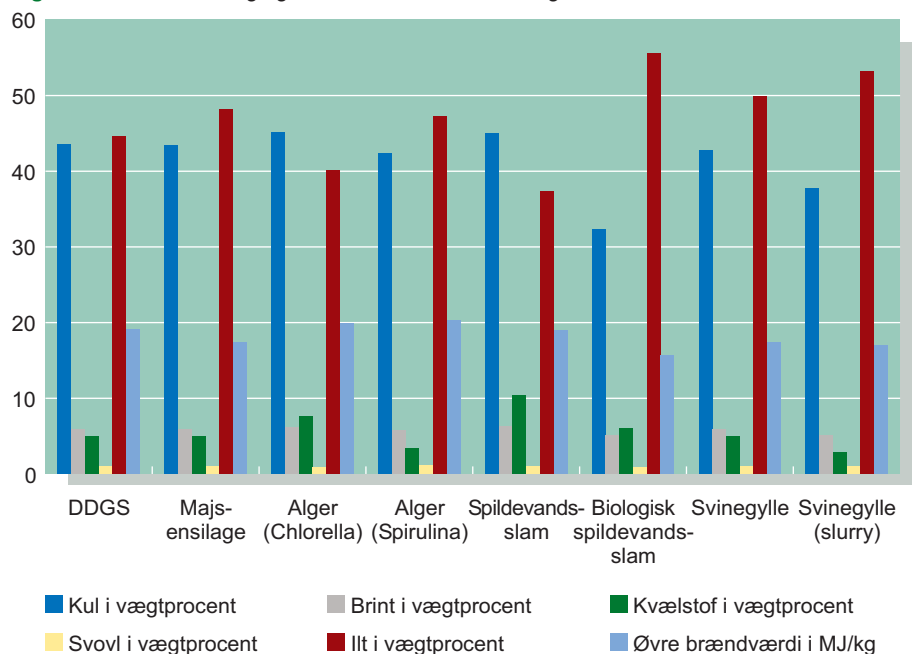
Trykket i autoklaven dannes under opvarmning, og kan forøges yderligere ved brug af højtrykspumper. På grund af varmekapaciteten af autoklavestålet er opvarmningen normalt en relativt langsom affære, der kan tage adskillige timer.

Ud fra et kemisk synspunkt er det problematisk, da vejen fra biomasse til bioolie går via mange samtidige reaktioner, som er indbyrdes afhæn-

gige men ikke alle aktive ved de samme temperaturer. En langsom opvarmning kan derfor medføre et slutprodukt, der minder mere om tjære end olie, ligesom en langsom opvarmning kan have en tendens til at give øget koksdannelse. Rent videnskabeligt er det største problem dog, at den manglende kontrol over processen bevirker, at disse forsøg sjældent kan reproducere.

I HTL-anlægget på Aarhus Universitet er det imidlertid muligt at opvarme

**Figur 2** Sammensætning og øvre brændværdi for udvalgte biomasser



► biomassen i løbet af ganske få sekunder og foretage flere eksperimenter i træk uden at skulle nedkøle reaktoren mellem eksperimenterne. Her ved øges reproducerbarheden af forsøgene markant, hvilket gør det muligt at foretage en systematisk undersøgelse af effekten af procesparametrene.

Sideløbende med HTL-fremstilling af bioolie foregår også en løbende udvikling af metoder til karakterisering af bioolier, og forskningsgruppen på Aarhus Universitet råder over omfattende faciliteter til analyse af kemisk arbejde.

### Fedt giver et højt olieudbytte

Flere forskellige typer biomasse er blevet omdannet til bioolie ved HTL-processen på Aarhus Universitet. Det drejer sig blandt andet om DDGS, der er et restprodukt fra bioethanolindustrien, brunkul, kaffeskaller, kaffegrums og alger. Fælles for disse biomasser er, at der er tale om restprodukter, som ikke konkurrerer med produktionen af fødevarer.

Olieudbyttet fra de nævnte biomasser varierer, da den kemiske sammensætning af biomasserne er forskellig (se tabel 1). Da olier normalt består af lange kulstofkæder, forventes biomasser med et højt fedt- og proteinindhold at give det største olieudbytte. Det forklarer det høje

Biomasse	Olieudbytte (vægtprocent)
Alger	38,2 ± 2,0
Kaffegrums	27,7 ± 6,1
DDGS	26,0 ± 0,9
Kaffeskaller	22,8 ± 6,2
Brunkul	21,9 ± 0,4

Tabel 1. Olieudbytter fra omdannelse af forskellige typer biomasse. Processen blev udført med 15 minutters reaktionstid ved 350 °C og 250 bar, på nær omdannelsen af brunkul som foregik ved 400 °C og 300 bar.

olieudbytte ved omdannelse af alger, der har et højt indhold af naturlige fedtstoffer.

Procestemperaturen har vist sig at have stor effekt på olieudbyttet og kvaliteten af bioolien (se figur 1). Brændværdien er beregnet på baggrund af oliens indhold af kulstof, brint, ilt, kvælstof og svovl.

Det er påvist, at højere temperaturer giver højere udbytte og højere brændværdi. Bioolie, der er produceret ved HTL-processen, har typisk en brændværdi på omkring 35 MJ/kg, hvilket er højere end brændværdien for bioethanol, der normalt ligger på 30 MJ/kg, men mindre end fossil diesel, der har en brændværdi på 45 MJ/kg. Ved at optimere HTL proces-

sen til omdannelsen af en given biomasse ventes olieudbytterne og kvaliteten af olien at kunne forbedres yderligere.

### Robust og fleksibel proces

Aalborg Universitet har ligeledes undersøgt sammensætningen og øvre brændværdi for en række biomasser, der har gennemgået HTL-processen. Biomasserne består primært af kulstof og ilt, samt mindre mængder brint, kvælstof og svovl (se figur 2).

Som det fremgår af figuren er der en vis variation i sammensætning af biomasserne, men der er ikke den store forskel på de øvre brændværdier. Det samme fremgår af figur 3, hvor den relativt store spredning i biomassen konverteres til et forholdsvist snævert spektrum af bioolier, der ligger forholdsvis tæt på eksisterende brændstoffer som diesel og tung fuelolie, der anvendes af skibe.

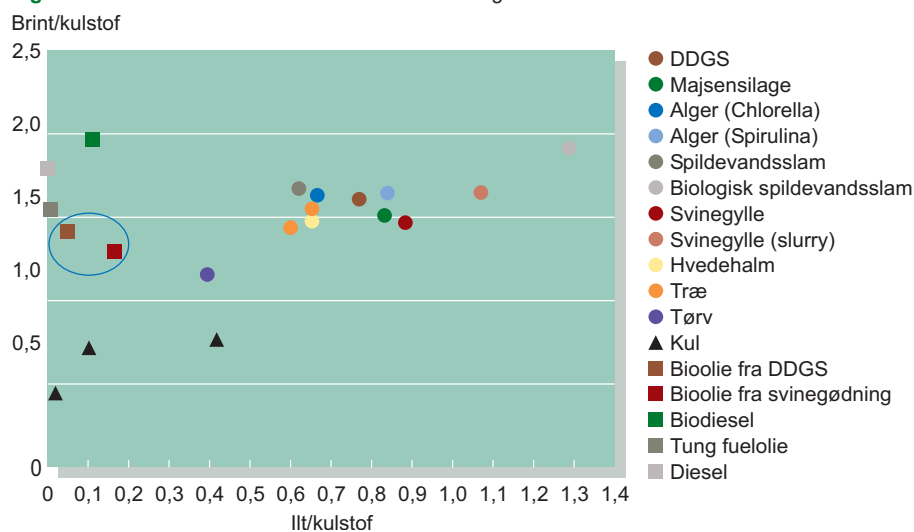
Ved forskellige grader af opgradering kan der således produceres brændstof, som kan anvendes i transportsektoren herunder skibstrafikken. Det indikerer, at HTL processen både er robust i forhold til hvilke biomasser, der kan anvendes, og fleksibel i forhold til hvilke typer brændstoffer, der kan leveres. Processen har således potentiale i områder, hvor der ikke er tilstrækkelig af en type biomasse, men hvor man har behov for at kunne variere mellem forskellige typer biomasse for eksempel på grund af sæsonvariationer.

*Per Runge Christensen, Anders Juul Mørup, Jacob Becker, Aref Mamakhel, Bo Brummerstedt Iversen og Marianne Glasius er ansat ved Aarhus Universitet, Institut for Kemi og iNANO.*

*Lasse Rosendahl og Jessica Hoffmann og Saqib Toor er ansat ved Aalborg Universitet, Institut for Energiteknik.*

*Rudi P. Nielsen og Erik G. Søgaard er ansat ved Aalborg Universitet Esbjerg, Institut for Kemi og Bioteknologi.* ■

Figur 3 Forholdet mellem henholdsvis brint/kulstof og ilt/kulstof



Forholdet mellem henholdsvis brint/ kulstof og ilt/kulstof. Biomasser ses i øvre højre hjørne, med en vis variation i forholdet mellem ilt og kulstof. HTL-olier er indrammet i en blå cirkel. Kul, tung fuelolie, biodiesel og diesel er vist som reference.

# Testanlæg til fremstilling af bioolie

Firmaet Steeper Energy arbejder målrettet på at skabe et kommercielt gennembrud for den såkaldte HTL-teknologi, der gør det muligt at omdanne biomasse og affald til råolie gennem en "superkritisk" proces. Firmaet har blandt andet fået støtte fra EUDP til at forberede etableringen af et demonstrationsanlæg, der kan producere knap 48.000 liter olie om dagen.

*Af Steen Brummerstedt Iversen, Tommy Larsen, Hans Rasmussen, Perry Toms, Bo Brummerstedt Iversen og Lasse Rosendahl*

Firmaet Steeper Energy har udviklet næste generation af den såkaldte HTL-teknologi Hydrofaction™, der er i stand til at omdanne organisk materiale som biomasse og affald til syntetisk råolie med høj brændværdi. Olien er i en kvalitet, som enten kan anvendes direkte i kraftværker eller kompressionsmotorer til el-produktion, eller kan opgraderes og anvendes i transportsektoren.

Omdannelsen sker ved "superkritiske" betingelser ved tilstedeværelse af forskellige katalysatorer. Superkritiske betingelser er en tilstand, der opnås, når en væske tryksættes og opvarmes til en temperatur over dets kritiske tryk og temperatur. For vand er det 221 bar og 374 °C. Når vand opvarmes til disse betingelser, får det nye egenskaber og bliver et kemisk aggressivt medie som sammen med katalysatorer fjerner ilt fra biomassen, og derved forbedrer energintensiteten og forholdet mellem brint og kulstof.

Hydrofaction™-teknologien gør det muligt at omdanne biomasse og affald med:

- Høj energieffektivitet. Processen foregår ved tryk, og der skal ikke

fordampes vand, hvilket eliminerer energikrævende processer. Hovedparten af den tilførte varme genvindes ved varmeveksling, og egetforbruget af el og varme udgør kun 5-20 procent af den energi, som tilføres i form af biomasse.

- Høj fleksibilitet ved valg af biomasse. Der kan tilføres en lang række forskellige typer biomasse og affald, ligesom det er mulig at blande "råvarerne" i forskellige forhold. Produktion af olie bliver således ikke påvirket af de sæsonvariationer, der ofte er tale om, når landbruget og industrien skal levere restprodukter og affald.
- Fleksibel olieproduktion med høj energidensitet og udbytte. Olien fra Hydrofaction™ har en øvre brændværdi på 35-39 MJ/kg, og olien kan distribueres, anvendes eller raffineres i den eksisterende infrastruktur. Olieudbyttet på energibasis ligger typisk på 80-90 procent af energiindholdet i de råvarer, som anlægget får tilført.
- Kosteffektiv. Foreløbige økonomiske estimater indikerer en fremstillingspris af Hydrofaction™-olien på 50-60 US\$/barrel med et anlæg, der kan producere 3.000 barrels om dagen. Det gør teknologien konkurrencedygtig med olieproduktion fra tjæresand, der er verdens næststørste olieresurse. Teknologien har således potentiale til at blive en attraktiv del af fremtidens energisystem og kan bidrage til en bedre forsyningssikkerhed og økonomisk stabilitet.

## Testanlæg i Aalborg

Steeper Energy har indgået en forsknings- og udviklingsaftale med Aalborg Universitet, der blandt andet indebærer, at Steeper Energy etablerer kontor og forskningsfaciliteter ved Institut for Energiteknik.

Endvidere etableres et kontinuert testanlæg, som vil kunne håndtere et

bredt udvalg af forskellige typer biomasse og affald. Anlægget vil få en kapacitet på op til 15 kg biomasse i timen, svarende til en produktionskapacitet på op til tre liter olie i timen. Det er designet med stor fleksibilitet og vil gøre det muligt at udføre forsøg med et bredt udvalg af parametre, herunder tryk på op til 350 bar og temperaturer op til 450 °C.

Anlægget vil udgøre et væsentligt trin i Steeper Energy's videre procesudvikling, dokumentation og kommercialisering af Hydrofaction™. Samtidig udgør anlægget et væsentligt aktiv for Aalborg Universitets fremadrettede satsning på forskning inden for HTL-teknologien.

## Støtte fra EUDP

HTL-teknologien er baseret på en betydelig forsknings- og udviklingsindsats i forskelligt regi over de seneste ti år. Dette har blandt andet resulteret i etablering af en betydelig infrastruktur på universiteterne i Aalborg og Århus.

Steeper Energy har sammen med Aalborg og Århus Universitet opnået medfinansiering fra EUDP 2012 til etablering af nøgledata for specifikke inputstrømme, samt at gennemføre udviklingsarbejde og økonomisk vurdering af et kommercielt demonstrationsanlæg med en daglig produktionskapacitet på 300 barrels. Det svarer til knap 48.000 liter råolie.

I EUDP-projektet vil de eksisterende faciliteter på Universiteterne i Aalborg og Århus blive anvendt og udbygget.

*Steen Brummerstedt Iversen, Tommy Larsen, Hans Rasmussen og Perry Toms er ansat ved Steeper Energy.*

*Bo Brummerstedt Iversen er ansat ved Aarhus Universitet, Institut for Kemi.*

*Lasse Rosendahl er ansat ved Aalborg Universitet, Institut for Energiteknik. ■*

Produktion og anvendelse af bioenergi indgår i strategien for det danske energisystem frem til 2050. Væk skal fossil energi, og ind skal sol, vind og biomasse. Vind og sol forventes at blive storleverandør af energi i midten af århundredet. Biomasse og organisk affald vil bidrage med en tredjedel af energiforsyningen, og vil være en vigtig forudsætning for at kunne skabe et stabilt energisystem, hvor der er balance mellem udbud og efterspørgsel.

**Robust og bæredygtig bioenergi** er en samling artikler om nye, spændende teknologier til produktion af bioenergi, der har modtaget støtte fra danske forskningsprogrammer. Publikationen er udarbejdet i forbindelse med et seminar om emnet, der bliver afholdt den 5. december 2012.

De grønne teknologier skal være bæredygtige, så kommende generationers muligheder for anvendelse af bioenergi ikke begrænses, og der skal være tale om robuste løsninger i forhold til forsyningsikkerhed, omkostninger og energiøkonomi.

I den forbindelse spiller forskningen en afgørende rolle. Der forskes især i at anvende restprodukter som bioaffald, halm, træ og husdyrgødning til energiformål, men der er også projekter om energiafgrøder, ligesom der forskes i, hvordan alger fra havet kan øge produktionen af biomasse.