



## **Teknologier til konvertering af biomasse til energi, kemikalier, foder og materialer baggrundsnotat til + 10 mio. tons planen**

Felby, Claus; Bentsen, Niclas Scott

*Publication date:*  
2012

*Document version*  
Også kaldet Forlagets PDF

*Citation for published version (APA):*  
Felby, C., & Bentsen, N. S., (2012). *Teknologier til konvertering af biomasse til energi, kemikalier, foder og materialer: baggrundsnotat til + 10 mio. tons planen*, 10 s.

# BAGGRUNDSNOTAT:

Teknologier til konvertering af biomasse til energi, kemikalier,  
foder og materialer

Claus Felby, Niclas Scott Bentsen

Skov & Landskab, Det Natur- og Biovidenskabelige Fakultet, Københavns Universitet

2012



## + 10 MIO. TONS PLANEN

muligheder for en øget dansk produktion  
af bæredygtig biomasse til bioraffinaderier



## Forord

Ønsket om at skabe bæredygtige løsninger inden for energisektoren har fået forskere på Københavns Universitet, Aarhus Universitet og forsknings- og udviklingsmedarbejdere fra DONG Energy til at indgå en samarbejdsaftale, der vil starte konkrete initiativer inden for forskning og uddannelse i grøn energi. En vigtig del af samarbejdet er en undersøgelse af, hvordan vi kan producere yderligere biomasse i forhold til i dag uden at det går ud over fødevareproduktionen, foderproduktionen eller miljøet.

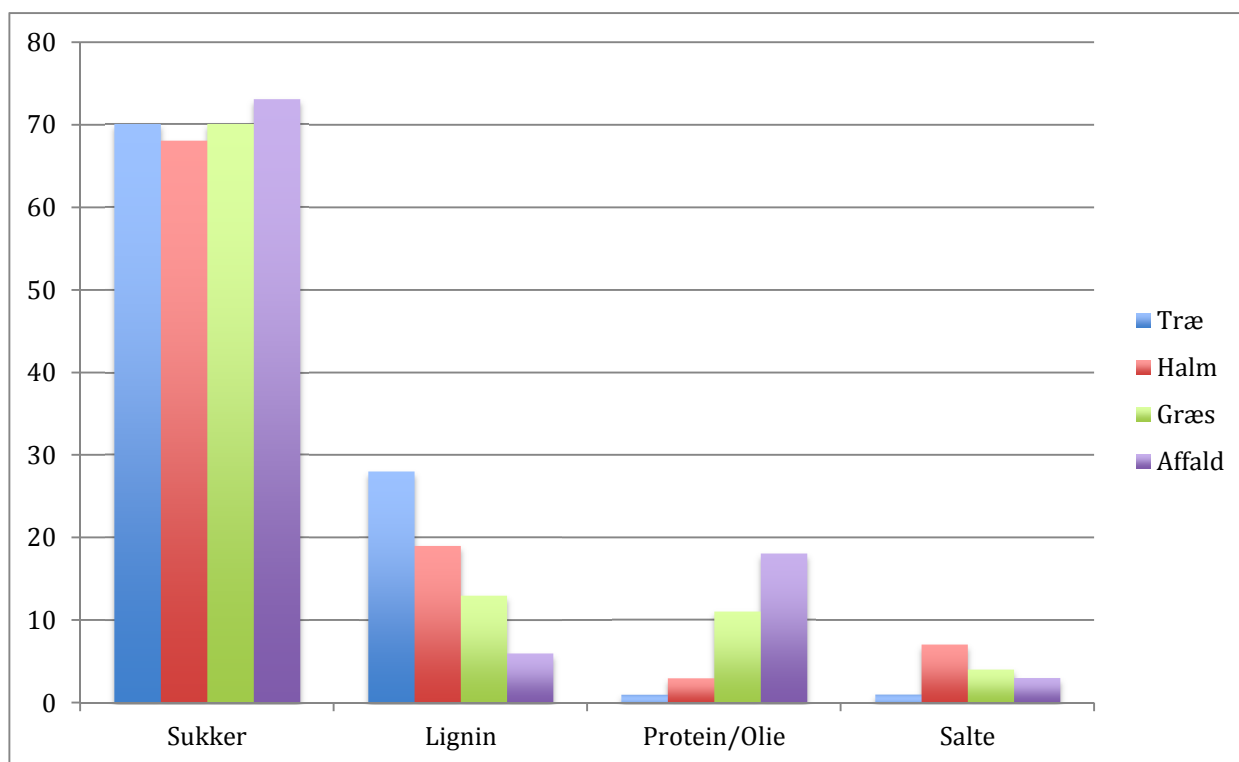
Dette notat beskriver de generelle principper for konvertering af biomasse til energi, materialer og kemikalier. Notatet er udarbejdet i forbindelse med projektet kaldet "10 millioner tons-planen". Projektet er del af den samarbejdsaftale, som Københavns Universitet, Aarhus Universitet og DONG Energy indgik i december 2011, der skal være med til at lancere konkrete initiativer inden for forskning og uddannelse i grøn energi.

## Teknologier til konvertering af biomasse til energi, kemikalier, foder og materialer

### *Generelt om biomasse dens konvertering*

Biomasse er hovedsageligt opbygget af kulhydrater og lignin. Kulhydraterne kan deles op i cellulose, hemicellulose, stivelse og sukker. Cellulosen og hemicellulosen findes i stængler og blade mens stivelse findes i kerner og frø. Lignin er en helt anden slags organisk stof, som er opbygget af phenoler. Funktionen af lignin er at tilføje planterne stivhed og modstandskraft mod angreb fra nedbrydende svampe. Derudover indeholder biomasse mindre mængder af proteiner og olier, men der er meget stor forskel på de forskellige typer af biomasse, og selv indenfor de samme arter kan der være en del variation. Dette giver en udfordring for de teknologier der skal bruges til at konvertere biomassen, men det giver også muligheder for en langt bredere anvendelse og tilpasning af biomasse og teknologi.

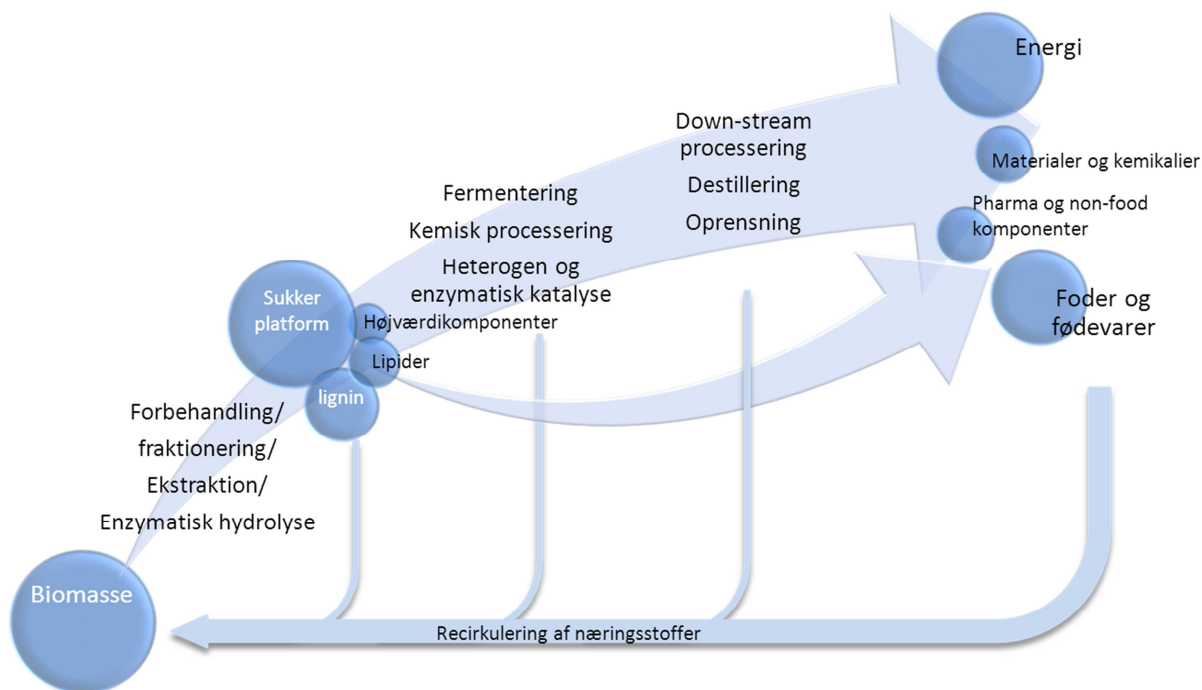
For affaldsbiomasse gælder at det er en blanding af flere forskellige typer af biomasse, hvor fødevarerester og papir udgør de største andele. Affald fra husdyrproduktion, bedre kendt som gylle, indeholder udover de almindelige indholdsstoffer også en del organiske syrer.



Figur 1. Typisk sammensætning af forskellige biomasser. Data fra ECN Phyllis (Energy Research Centre of the Netherlands (ECN) 2011).

Rent teknisk er det muligt at erstatte alle produkter baseret på fossilt olie, kul eller gas med tilsvarende produkter baseret på biomasse. Det drejer sig både om energibærere i flydende-, fast- eller gasform og om kemikalier og materialer.

I dag arbejdes der typisk med at udvikle egentlige bioraffinaderier som meget lig olieraffinaderier fremstiller både energi, kemikalier og materialer. Dertil kommer for biomasse muligheden for recirkulering af næringsstoffer samt foderproduktion. I figuren herunder er angivet værdikæden i et generisk bioraffinaderi.



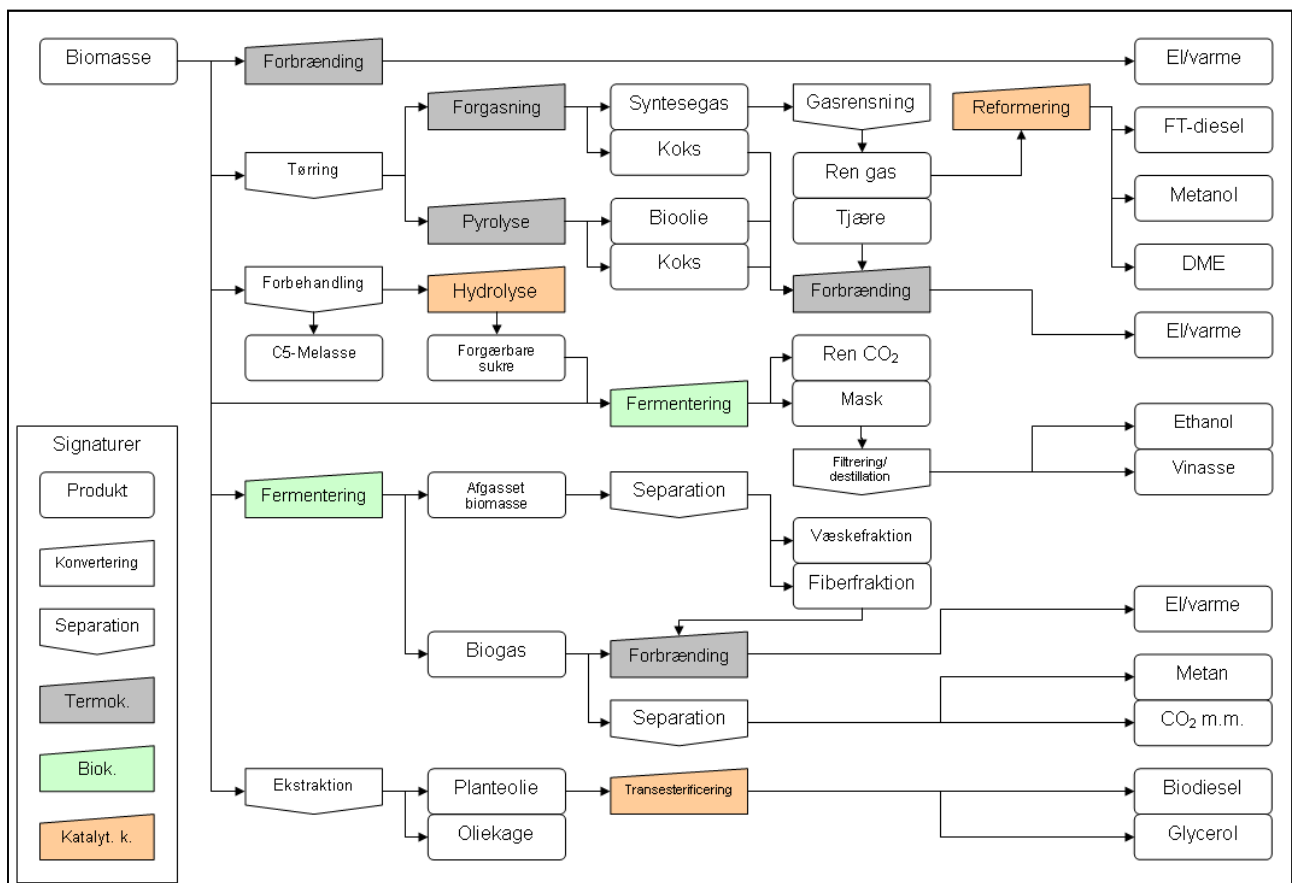
Figur 2. Værdikæde, processtrin og muligheder i et generisk bioraffinaderi.

Den teknologiske tilgang i et bioraffinaderi er at biomassen i første omgang fraktioneres ud i forskellige bestanddele så som sukkerstoffer (stivelse, cellulose, hemicellulose), lipider (olier/fedt), protein, lignin og eventuelle højværdikomponenter som aroma- og farvestoffer eller farmaceutisk aktive stoffer. Disse stoffer kan så indgå i en videre forarbejdning og oprensning. Grundlaget i bioraffinaderiet er at alle dele af biomassen udnyttes og at en så stor del som muligt af næringsstofferne kan recirkuleres.

I et bioraffinaderi indgår forskellige konverteringsteknologier, typisk både fermentering og termisk/kemisk konvertering. I forhold til at optimere de ydelser som der efterspørges som f.eks. energi til transport, el og varme samt kemikalier er der en stor synergieffekt ved at kombinere forskellige konverteringsteknologier.

## Konverteringsteknologier

For at omsætte biomasse til en service (energi, kemikalier, materialer) skal det konverteres på en eller anden måde. De mange forskellige konverteringsteknologier kan overordnet set kategoriseres som termokemiske, biokemiske eller katalytisk kemiske alt efter den primære katalysator for konverteringsprocesserne (figur 3).



Figur 3. Simplificeret repræsentation af typiske teknologspor for biomasse til energi.

Termok. = termokemisk konvertering; Biok. = biokemisk; Katalyt. k. = katalytisk kemisk.

### Termokemisk konvertering

Ved termokemisk konvertering af biomasse er varme den primære katalysator. Termokemisk konvertering omfatter forbrænding (ved stoichiometrisk iltoverskud), forgasning (begrænset ilttilførsel) og pyrolyse (ingen ilttilførsel). Ved forbrænding konverteres den kemisk bundne energi i biomassen til varme. Forgasning omsætter biomassen til en gas, kaldet producer gas, bestående af brint, kulilte, kuldioxid, metan, kvælstof og tjære, samt til koks (Bridgwater 1995). Ved pyrolyse konverteres biomasse til varierende fraktioner af bioolie, producergas og koks (Bridgwater 2003). Bioolie er en kompleks blanding af kulbrinter og vand, som kan anvendes i stationære anlæg eller videreforarbejdes til nemmere håndterbare forbindelser.

Ved konventionel forbrænding til produktion af el og varme er den totale virkningsgrad<sup>1</sup> på 90-105 % i forhold til biomassens lavere brændværdi (LHV) (Danish Energy Agency 2010). Højeste elvirkningsgrad<sup>2</sup> nås ved anvendelse af træ som brændsel, laveste ved anvendelse af halm. På grund af et højere mineralindhold i halm udvikles ved forbrænding en række korroderende gasser,

<sup>1</sup> Den andel af den kemisk bundne energi i biomasse, der omsættes til andre former for energi. I denne sammenhæng varmeenergi og elektrisk energi.

<sup>2</sup> Den andel af den kemisk bundne energi i biomassen, der konverteres til elektrisk energi.

hvorfor halmfyrede kraftvarmeværker opererer med lavere damptemperatur og dermed lavere virkningsgrad end træfyrede. Elvirkningsgrad ved kondensdrift (kun el produktion) er op til ca. 45 %. Ved maksimal varmeproduktion er elvirkningsgraden typisk 25-35 %. Forgasning af biomasse kombineret med gasmotor leverer en elvirkningsgrad på 35-45 % og en total virkningsgrad på 103-105 % (Danish Energy Agency 2010). Højere elvirkningsgrader kan opnås ved at kombinere forgasning af biomasse og gasturbine idet man her udnytter biomassens potentielle varmearbejde og volumenændringsarbejde. Det Internationale Energiagentur angiver potentielle elvirkningsgrader på 40-50+ % (International Energy Agency 2008). Fjernvarmeproduktion baseret på forbrænding af træ har en virkningsgrad på 108 % (Danish Energy Agency 2010). Det skal understeges at der i virkningsgraderne for varme og el produktionen ikke inkluderes transmissionstab, hvilket giver en noget skæv sammenligning til virkningsgrader for flydende brændsler. Transmissionstab for el på 2-3 % mens for det varme ligger i området 10-30 % afhængig af distributionsnettets længde udtaget af varme.

For termokemisk konvertering gælder generelt, at der sker et stort tab af næringsstoffer. ved forbrænding og højtemperatur forgasning tabes alt kvælstof, mens fosfor reduceres til en form der ikke er tilgængelig for planter. Fosfor kan bevares i en plantetilgængelig form ved lavtemperatur forgasning eller gøres plantetilgængelig ved efterbehandling af asken fra konvertering ved højere temperaturer.

### *Biokemisk konvertering*

Biokemisk konvertering forudsætter tilstedeværelsen af biologiske organismer eller enzymer som katalysator for konverteringsprocesserne. De biologiske organismer er som bakterier eller svampe og enzymerne er proteiner udvundet fra de samme typer af organismer. Biokemisk konvertering anvendes i kommerciel skala til produktion af biogas eller bioethanol. På forsøgsbasis arbejdes med nye mikroorganismer, som kan konvertere biomassens indhold af sukkerstoffer direkte til mere effektive diesel og jetfuels.

### **Biogas**

Biogasproduktion er særligt interessant ved konvertering af råvarer med et højt vandindhold som gylle, affald fra husholdning og industri, grøde, samt afgrøder, der høstes grønne som eks. græs. Biogasprocessen er anaerob (iltfri) nedbrydning af organisk stof til en gas bestående primært af metan ( $\text{CH}_4$ ) og kuldioxid ( $\text{CO}_2$ ). Nedbrydningen foretages af forskellige bakterier i tre trin. Hydrolyse, som omdanner polymere kulhydrater, proteiner og fedtstoffer til monomerer; fermentering, som omdanner monomererne til eddikesyre og kuldioxid; og metanogenese, der omdanner eddikesyre og kuldioxid til metan (Jørgensen 2009). Ingen af processerne er fuldkomne, så der sker ikke en fuldstændig omsætning af alt organisk stof til biogas. I gennemsnit konverteres 60 % af det organiske stof til biogas. Stivelse er lettest omsætteligt (94 % omsættes), herefter kommer cellulose, hemicellulose og fedtstoffer (65-69 %) og proteiner (47 %) (Jørgensen 2009). Lignin kan ikke umiddelbart omsættes ved biokemisk konvertering.

Metan udgør 55-70 % af biogassen afhængig af hvilket organisk materiale, der omsættes. Metanudbyttet er højest fra flotationsslam fra rensningsanlæg og mave-tarm affald fra slagterier. Lavere fra majs, græs, hønsemøg og minkgylle og lavest fra kvæggylle og dybstrøelse (Jørgensen 2009).

Elvirkningsgraden i centraliserede biogasanlæg med gasmotor er 40-45 % (Danish Energy Agency 2010).

Fra biogasprocessen kan alle næringsstoffer recirkuleres til marken i en form, som er tilgængelig for planterne. Der kan dog være problemer med indhold af bl.a. ftalater fra industri- og husholdningsaffald. Der kan ikke udvindes nogen form for foder fra en biogasproces. Derfor er anvendelsen af helsæds majs ufordelagtig da det gode protein i majsens ikke udnyttes til foder.

### **Bioethanol**

Ethanol og kuldioxid dannes ved fermentering af sukker. Fermenteringsprocessen er anaerob, men kan også finde sted under aerobe forhold. I kommercielle anlæg anvendes gær som biologisk organisme, ofte arten *Saccharomyces cerevisiae*, men der arbejdes eksperimentelt med at anvende andre mikroorganismer som kan tolerere højere temperaturer og kan omdanne flere sukkerarter.

Inden for forskningen, men også i den almene debat anvendes begreberne 1. eller 2. generation (1G eller 2G) om forskellige industrielle opsætninger af ethanolproduktion, uden at der i øvrigt nødvendigvis menes det samme. I den offentlige debat relateres 1. generation til omsætning af fødevarer til brændstof og 2. generation til omsætning af ikke-fødevarer. I videnskabelige kredse relaterer 1. generation sig til ethanolproduktion baseret på sukker eller stivelse og 2. generation på produktion baseret på cellulose eller hemicellulose, sammenfattet som lignocellulose da der som regel indgår lignin i plantevæv med cellulose eller hemicellulose.

For 1 generation gælder også at der fra majs og hvede er en betydelig produktion af proteinfoder, idet kvaliteten af proteinet i majs og hvede forbedres gennem processen. Dette giver et væsentligt økonomisk bidrag og reducerer såvel direkte som indirekte effekter på arealanvendelse.

Konverteringseffektiviteten i selve bioraffinaderiet, vurderet af Turkenburg et al. (Turkenburg, Beurskens et al. 2000.), er 50 % for 1. generations (baseret på stivelse) bioethanol og 60-70 % for 2. generation (baseret på lignocellulose). Studier af energibalancer som ovenstående skal tolkes med stor forsigtighed, da den rolle man tillægger råvareinputtet har stor betydning for resultatet. I mange internationale studier af 2. generations bioethanol opfattes råvaren (halm, træaffald m.m.) netop som affald eller rester, der ikke har (energi)værdi. I Danmark, hvor halm og affald i høj grad udnyttes til energiproduktion har råvaren en (energi)værdi som skal indregnes. I en analyse af bioethanol baseret på hvede helsæd (1+2G) eller på hvede halm (2G) fandt Bentsen et al. (Bentsen, Thorsen et al. 2009) en virkningsgrad for 2G på 40-50 % og for 1+2G på 70-80 %, altså



den modsatte konklusion af Turkenburg et al. Dette skyldes bl.a., at behovet for procesenergi er væsentlig højere ved 2. generations teknologi end ved 1. generation. Det skal understreges, at alle konverteringsprocesser, for fossile såvel som fornybare ressourcer, forbruger energi. Efterhånden som teknologierne udvikles og optimeres er det sandsynligt, at bioraffinaderier opnår en konverteringseffektivitet på niveau med de nuværende fossile teknologier. Ved analyser af konverteringsteknologi og deres mulige samspil med energisystemet er det væsentligt at inddrage den forventede teknologiske udvikling og optimering, frem for blot at basere sig på nuværende state-of-the-art.

Den globale produktion af bioethanol er helt overvejende baseret på 1G teknologi. Den største producent, USA, samt Kina baserer produktionen på majsstivelse. I Brasilien anvendes sukkerrør. Bioethanolproduktion i Europa er fortrinsvist baseret på hvede. Der forskes og udvikles i 2G teknologier i mange lande, men der er meget få eksempler på kommerciel produktion. Et eksempel er Borregaard i Norge, der er verdens største producent af 2G ethanol.

I en bioethanol proces vil der for 1 generation processer baseret på majs og hvede kunne ske en fuld recirkulering af næringsstofferne gennem foderfraktionen. For 2 generation er der også muligheder for at recirkulere dele af næringsstofferne gennem biogas eller foderprodukter. Fosfor vil i en 2 generationsproces ende i ligninfraktionen efter destillering. Muligheden for recirkulering af dette afhænger af hvordan lignin konverteres efterfølgende, men recirkulering vil være mulig.

### **Katalytisk-kemisk konvertering**

Ved katalytisk-kemisk konvertering af biomasse til energi anvendes forskellige materialer som katalysator. Det kan være syrer, baser, metaller, enzymer m.m. Katalytisk-kemisk konvertering indgår som regel i en sammenhæng med andre konverteringsteknologier. Undtagelsen herfra er produktionen af raps biodiesel (RME<sup>3</sup>) (figur 3). Katalytisk-kemisk konvertering i relation til bioenergi omfatter bl.a. 1) hydrolyse af polymeriserede sukker til simple sukker ved hjælp af syrer eller enzymer, 2) konvertering af metanol til el og varme i brændselsceller, hvor forskellige metaller virker som katalysator, 3) reformering af syntesegas til produkter som metanol, ethanol, metan eller FT-diesel<sup>4</sup>, hvor også metaller virker som katalysator, eller 4) transesterificering af rå planteolie til metyl-estere, hvor metanol medvirker til metylering og baserne natriumhydroxid eller kaliumhydroxid fungerer som katalysator (Demirbas 2007). Også for katalytisk-kemisk konvertering gælder, at der ikke findes fuldstændige teknologier og processer. I praksis er der altid et tab af energi ved konvertering.

---

<sup>3</sup> Raps Methyl Ester

<sup>4</sup> Fischer-Tropsch Diesel blev opfundet i Tyskland i 1923. Processen omdanner ved en katalytisk-kemisk reaktion metan (f.eks. fra biogas) eller brint og kulilte (f.eks. fra termisk forgasning af biomasse) til diesellignende kulbrinter.

## Separationsteknologier

En lang række separationsteknologier indgår i konverteringen af biomasse og en stor del af de teknologiske flaskehalse ligger i separationsteknologierne eller mangel på samme. Separation omfatter f.eks. tørring, ekstraktion af olie, filtrering, destillation, ekstraktion af protein, gasrensning m.m. I de biologiske processer er der behov for bedre adskillelse af proteiner og salte, og for forgasningsteknologier til fremstilling af flydende brændstoffer er der behov for en yderligere udvikling og forbedring af teknologier til røggrensning.

### **CCS/CCR**

Efterbehandling af røggasser for at opfange og nyttiggøre CO<sub>2</sub> har vundet stigende interesse. En måde at nyttiggøre CO<sub>2</sub> er ved at undgå emission til atmosfæren. CCS (Carbon Capture and Storage) sigter mod at opfange og ekstrahere CO<sub>2</sub> fra kraftværkers røggas og gemme det i stabile geologiske formationer, evt. tømte olielagre i undergrunden (Gibbins and Chalmers 2008). CCS er oprindeligt tænkt som en måde at reducere CO<sub>2</sub> udledningerne fra den fossile energiindustri, men i kombination med bioenergi kan CCS fungere som et permanent reservoir for atmosfærisk kulstof og således reducere atmosfærens indhold af CO<sub>2</sub> (Azar, Lindgren et al. 2006). Der er selvfølgelig en energimæssig og økonomisk omkostning ved anvendelsen af CCS. Man kan kun opfange ca. 90 % af CO<sub>2</sub> i røggasserne (Azar, Lindgren et al. 2006; Olah, Prakash et al. 2011). Ekstraktion, kompression og transport af CO<sub>2</sub> antages at reducere den termiske effektivitet i kraft/varmeværker med 10 % -point. I el produktion falder virkningsgraden fra 40 til 30 % i varmeproduktion fra 90 til 80 % (Azar, Lindgren et al. 2006). Gibbins et al. (Gibbins and Chalmers 2008) angiver tilsvarende effektivitet for fossile energisystemer.

En anden form for nyttiggørelse af CO<sub>2</sub> sigter mod genbrug også kaldet Carbon Capture and Recycling (CCR) (Olah, Prakash et al. 2011). CCR bygger grundlæggende på samme teknologi som CCS, men i stedet for at gemme CO<sub>2</sub> hydrogeneres det til nye materialer. CO<sub>2</sub> kan hydrogeneres til metan (Centi and Perathoner 2011) eller til metanol (Jessop, Ikariya et al. 1995). Begge reaktioner er exotermiske (afgiver varme/energi), men forudsætter tilstedeværelsen af rent brint. Ren brint forekommer ikke naturligt, men kan bl.a. produceres ved elektrolyse af vand. En mulighed er at anvende overproduktion af elektricitet fra f.eks. vindmøller til at lave elektrolyse og derved sikre genbrug af kulstof i energisektoren.

For både CCS og CCR gælder, at den væsentligste energiomkostning følger af ekstraktion af CO<sub>2</sub> fra røggas. Olah et al. (Olah, Prakash et al. 2011) vurderer energiomkostningen til 11 - 80 kWh(e)/lb. CO<sub>2</sub> ekstraheret, svarende til 24,3 - 176,7 kWh el pr kg CO<sub>2</sub>. CO<sub>2</sub> kan også ekstraheres fra atmosfæren og CCS/CCR er ikke nødvendigvis knyttet til afbrænding eller konvertering af fossilt eller biologisk materiale. Det er dog en teknologisk udfordring, at CO<sub>2</sub> koncentrationen i atmosfæren er meget lavere end i røggasser (Olah, Prakash et al. 2011). En helt tredje mulighed som kun har været meget lidt efterforsket er anvendelsen af CO<sub>2</sub> fra biogas og bioethanol. Som et resultat af fermenteringen dannes der CO<sub>2</sub> i høj koncentration som nemt kan oprenses.

Centi et al. (Centi and Perathoner 2011) vurderer, at genbrug af CO<sub>2</sub> i energisektoren rummer store muligheder for at reducere CO<sub>2</sub> belastningen af atmosfæren. Udviklingen på dette område er

endnu på teoretisk eller laboratoriestadie. Der kan derfor ikke gives nogen konkrete tal for energieffektivitet og reduktion i udledning af drivhusgasser for CCS/CCR anvendt i forbindelse med bioenergi. Tænk tanken Concito har udsendt en rapport om CCR (Wenzel 2010), der argumenterer for, at den bedste anvendelse af begrænsede biomasseressourcer opnås ved forgasning efterfulgt af hydrogenering og anvendelse af de producerede kulbrinter i kraftværker eller som transportbrændsel. Der gives dog ingen estimer for energibalancen i et sådant energisystem. Anvendes kulbrinterne i kraftværker kan CO<sub>2</sub>'en i princippet recirkuleres 10 gange da, der normalt kan ekstraheres 90 % af CO<sub>2</sub> i røggas. Med den nuværende udviklingstendens retter interessen for CCS/CCR sig primært mod store og stationære installationer som kraftværker og industrier. Indsamling af CO<sub>2</sub> fra små individuelle emissioner (fx. boliger) og transportsektoren synes ikke økonomisk eller teknisk realistisk (Olah, Prakash et al. 2011). Der er også andre kilder til CO<sub>2</sub> i høj koncentration. Ved fermentering af biomasse til ethanol dannes ren CO<sub>2</sub> og ethanol i forholdet næsten 1:1. Da denne CO<sub>2</sub> forekommer i ren form vil energiforbruget til CCS/CCR følgelig være lavere. Også fermentering til biogas resulterer i en gas med CO<sub>2</sub> i høj koncentration, 30-45 % (Jørgensen 2009).

## **Konvertering af marin biomasse – alger, tang**

Der er i ovennævnte ikke medtaget nogen overvejelser og teknologier som vedrører marin biomasse. Internationalt og i enkelte tilfælde Danmark er der forskningsprojekter omkring produktionen af mikro- og makroalger, som kilde til produktion af sukker- og olieholdig biomasse. Globalt er der stor interesse for at udnytte mikroalgernes potentiale til produktion af biodiesel. Det er dog forsat et område, hvor der er endog meget store tekniske barrierer for produktion og processering. Dette skyldes den meget anderledes kemiske og fysiske struktur af algerne og manglen på effektiv stor-skala produktion. Det må vurderes, at stor-skala produktion og anvendelse af alger til bioraffinering på et kommercielt relevant niveau ikke vil være muligt indenfor de næste 25 års tidshorisont. Der kan dog være et potentiale indenfor militære anvendelser.

## Referencer

- Azar, C., K. Lindgren, et al. (2006). "Carbon Capture and Storage From Fossil Fuels and Biomass – Costs and Potential Role in Stabilizing the Atmosphere." Climatic Change **74**(1): 47-79.
- Bentsen, N. S., B. J. Thorsen, et al. (2009). "Energy, feed and land-use balances of refining winter wheat to ethanol." Biofuels, Bioproducts and Biorefining **3**(5): 521-533.
- Bridgwater, A. V. (1995). "The technical and economic feasibility of biomass gasification for power generation." Fuel **15**(5): 631-653.
- Bridgwater, A. V. (2003). "Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass." Chemical Engineering Journal **91**(2-3): 87-102.
- Centi, G. and S. Perathoner (2011). "CO<sub>2</sub>-based energy vectors for the storage of solar energy." Greenhouse Gases: Science and Technology **1**(1): 21-35.
- Danish Energy Agency (2010). Technology Data for Energy Plants. Copenhagen, DK, Danish Energy Agency / Energinet.dk.
- Demirbas, A. (2007). "Progress and recent trends in biofuels." Progress in Energy and Combustion Science **33**(1): 1-18.
- Energy Research Centre of the Netherlands (ECN) (2011). PHYLLIS: The composition of biomass and waste, Energy Research Centre of the Netherlands (ECN).
- Gibbins, J. and H. Chalmers (2008). "Carbon capture and storage." Energy Policy **36**(12): 4317-4322.
- International Energy Agency (2008). Energy Technology Perspectives 2008. Paris, FR, International Energy Agency.
- Jessop, P. G., T. Ikariya, et al. (1995). "Homogeneous Hydrogenation of Carbon Dioxide." Chemical Reviews **95**(2): 259-272.
- Jørgensen, P. J. (2009). Biogas – grøn energi. Århus, Denmark, University of Aarhus.
- Olah, G. A., G. K. S. Prakash, et al. (2011). "Anthropogenic Chemical Carbon Cycle for a Sustainable Future." Journal of the American Chemical Society.
- Turkenburg, W. C., J. Beurskens, et al. (2000.). Renewable Energy Technologies. World Energy Assessment. J. Goldemberg. New York, NY, United Nations Development Programme.
- Wenzel, H. (2010). Breaking the biomass bottleneck of the fossil free society. Copenhagen, Concito.