

Pyrolyse og biokul

HENRIK STIESDAL, hst@stiesdal.com

Klimaforandringernes virkninger er allerede alvorlige, og selv i en ideel situation, hvor udledningen af CO₂ bliver stærkt reduceret inden for få år, står vi stadig over for et stort problem med det CO₂-overskud, der allerede er udledt til atmosfæren. Hvis vi skal lykkes med den grønne omstilling, er det derfor ikke nok at reducere CO₂-udledningerne. Vi skal også i gang med at fjerne CO₂ fra atmosfæren. Her kommer *pyrolyse* og produktet *biokul* ind i billedet.

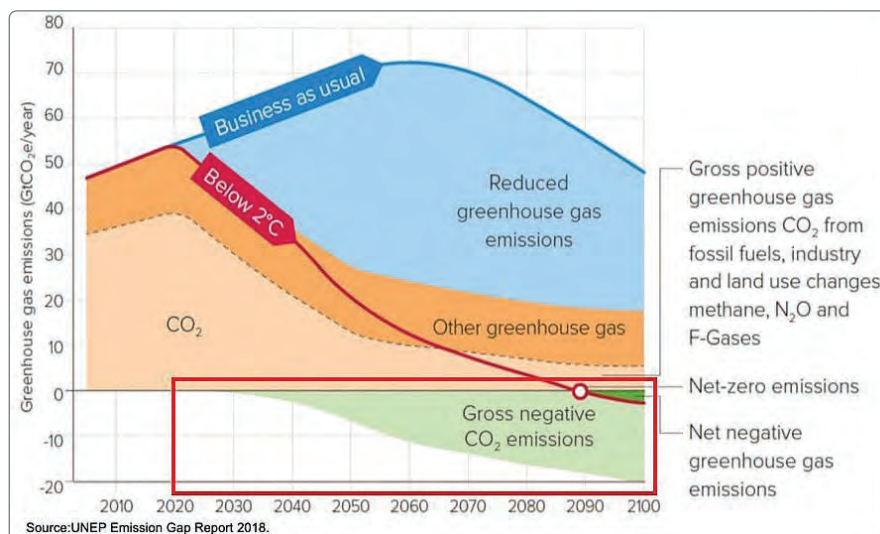
Metoder til at fjerne CO₂ fra atmosfæren

Der findes mange forskellige tilgange til at fjerne CO₂ fra atmosfæren. Ifølge IPCC's sjette hovedrapport spænder mulighederne fra naturbaserede løsninger til avancerede teknologiske processer.

De mest kendte naturbaserede metoder er skovrejsning og forbedret skovforvaltning. Begge kan fange og lagre betydelige mængder kulstof, helt op til over 20 gigaton CO₂ årligt på globalt niveau, samtidig med at de styrker biodiversiteten. Der er dog også udfordringer, primært fordi arealkravene er store, og fordi lagringen kan vise sig midlertidig, hvis skovene senere fældes eller brænder.

Også binding af kulstof i jord gennem ændrede dyrkningsmetoder rummer et stort potentiale, samtidig med at jordens frugtbarhed kan blive forbedret. Principperne er velkendte, men effekten er vanskelig at kvantificere og sikre på lang sigt.

I den modsatte ende af spektret finder vi direkte kulstoffangst fra atmosfæren (*Direct Air Capture*, DAC). Her ledes luft hen over en absorbent, der binder CO₂. Når absorbenten er mættet, frigives CO₂ ved en kombination af vakuum og varme og komprimeres derefter til væskeform. I princippet kan DAC fjerne ubegrænsede mængder CO₂, men de nuværende systemer er både dyre og energikrævende, og mange steder mangler der sikre lagringsmuligheder. Teknologien udvikles hurtigt, men det vil formentlig



Figur 1

Vi er nødt til at komme i gang med negative udledninger.

vare længe, før DAC får en væsentlig rolle i klimaarbejdet.

En mellemform mellem naturbaserede og teknologiske løsninger er fangst af CO₂ fra biomassefyrede kraftværker eller fra rå biogas. Her står naturen for den første fangst af kulstof, mens teknologien sikrer lagringen. I begge tilfælde fjernes CO₂ med samme metoder, som kendes fra fossile kraftværker, og komprimeres til flydende form. Teknologien er velafprøvet, men omkostningstung og forbundet med usikkerhed, især omkring lagringen.

Endelig er der kulstoffangst ved pyrolyse, som vi vil se nærmere på i de følgende afsnit.

Kulstofkredsløbet, som ligger til grund for kulstoffangst med pyrolyse og biokul

Planter opbygger deres skelet ved hjælp af kulstof, som de optager i form af CO₂ fra luften. Optaget sker gennem små regulérbare porer i bladene, spalteåbningerne, hvor CO₂ diffunderer ind, mens vanddamp og ilt diffunderer ud.

I planternes grønkorn foregår fotosyntesen, hvor solenergi dels bruges til at spalte CO₂ til kulstof og ilt, dels bru-

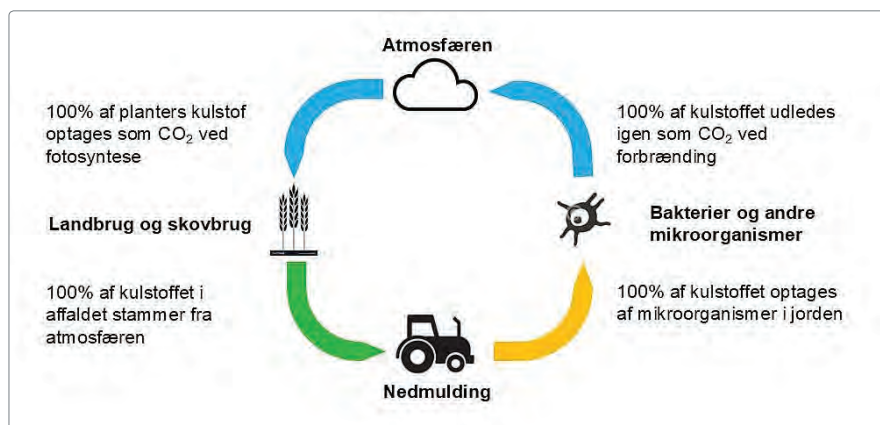
ges til at danne kemisk energi i form af energibærende molekyler. I en efterfølgende proces bruges energien til at indbygge kulstoffet i sukkerstoffer som glukose og fruktose. Der bliver også dannet andre kulhydrater, lipider og aminosyrer via forskellige biosynteseveje.

Sukkerstofferne kan lagres direkte i planternes frugter eller kan omdannes til stivelse, som er hovedbestanddelen i korn. Størsteparten bruges dog i mange planter til at danne materialerne til planteskelettet, navnlig cellulose, hemicellulose og lignin.

Cellulose er en lineær polymer af glukoseenheder, der danner mikrofibriller med stor trækstyrke. Hemicellulose består af forskellige sukkerarter, som danner kortere og mere forgrenede kæder end i cellulose og derved frembringer en matrix, som binder cellulosefibrillerne sammen. Lignin er en kompleks aromatisk polymer, der aflejres i sekundære cellevægge og giver stivhed og modstandsdygtighed mod nedbrydning.

Tilsammen giver cellulose, hemicellulose og lignin stængler, blade og planteved den mekaniske stabilitet, som vi kalder planternes skelet.

Figur 2
Kulstofkredsløbet i landbruget.



Planternes stofskifte omfatter ikke kun opbygningen af organiske forbindelser ved fotosyntese, men også nedbrydningen ved respiration for at frigøre energi, når lys ikke er tilgængeligt, eller når der er behov for energi og byggesten. Ved respirationen omdannes en del af planternes kulstof til CO_2 . Balancen mellem fotosyntese og respiration bestemmer nettotilvæksten i biomasse.

Når plantematerialet senere nedbrydes ved at blive spist af dyr eller mennesker, brændt eller rådnet, omdannes alt det resterende kulstof i plantematerialet til CO_2 . I aerobe jordmiljøer står svampe og bakterier for en stor del af nedbrydningen ved at udskille enzymer, der kan klippe cellulose og lignin i mindre enheder, som mikroorganismene kan respirere. Under anaerobe forhold kan nedbrydning føre til metan (CH_4), en kraftig drivhusgas. På den måde er der i naturen og i landbruget et CO_2 -neutralt kredsløb, hvor alt det kulstof, som planterne har optaget i form af CO_2 , mens de voksede, igen går tilbage til luften som CO_2 , når planterne nedbrydes, i visse tilfælde med en del af det returnerede CO_2 erstattet af metan (CH_4). Med tiden bliver metanen i de øvre dele af atmosfæren omdannet til CO_2 .

Ved afsluttet nedbrydning er cirklen sluttet. Planterne fik under væksten alt deres kulstof fra atmosfæren i form af CO_2 , og når planten til slut er død og alt plantematerialet nedbrudt, er alt det optagne kulstof igen gået tilbage til atmosfæren i form af CO_2 .

Pyrolyseprocessen

Med pyrolyse kan vi stabilisere plantematerialet, så en del af planternes kulstof ikke går tilbage til atmosfæren i form af CO_2 , når plantematerialet nedbrydes.

Pyrolyse er den tekniske betegnelse for en proces, hvor plantemateriale og anden biomasse opvarmes til høje temperaturer i en pyrolysereaktor uden adgang til ilt. Pyrolysetemperaturerne er som regel i området 500 – 700 °C. Hvis der var ilt til stede, ville plantematerialet selvantænde ved så høje temperaturer, men i den iltfri atmosfære i pyrolysereaktoren sker der i stedet en termokemisk omdannelse af biomassen. De komplekse organiske forbindelser som cellulose, hemicellulose, lignin, proteiner, lipider og forskellige sekundære metabolitter bliver spaltet og omdannes til en blanding af gasser og et fast restprodukt: biokul.

Når biomassen langsomt varmes op, gennemløber den flere faser.

I første fase, tørringsfasen, drives fri fugt og bundet vand ud af biomassen. Denne proces foregår under 150 °C og kræver energi, men ændrer ikke selve kulstofstrukturen.

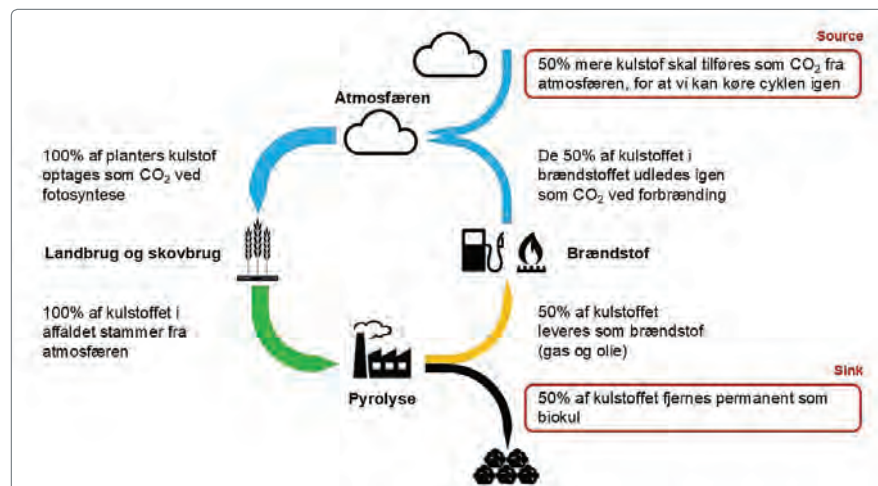
Ved højere temperaturer, typisk over 200 °C, begynder de egentlige pyrolyseprocesser. De tre hovedkomponenter i biomassen, hemicellulose, cellulose og lignin, nedbrydes ved forskellige temperaturintervaller og med forskellige reaktionsmekanismer. Hemicellulose er den mest reaktive, og allerede ved 200 – 300 °C begynder den at frigive flygtige gasser og organiske syrer.

Cellulose spaltes i intervallet 300 – 350 °C, mens lignin, som er mere kompleks, nedbrydes over et bredere temperaturområde, 250 – 500 °C. Nedbrydningsprodukterne er en række brændbare gasser som CO , CO_2 , CH_4 , en kompleks blanding af pyrolyseolie og tjære, og et fast restprodukt. Ved endnu højere temperaturer fordamper alle flydende forbindelser, og sammen med de mere flygtige gasser udgør de den såkaldte pyrolysegas.

Når temperaturen når 400 – 600 °C, dominerer forkulningsfasen. Her foregår en dybtgående omstrukturering af de faste, kulstofholdige forbindelser. Kulhydraterne bliver kondenseret og rekonfigurerer sig til aromatiske, grafitlignende netværk. Disse strukturer er karakteriseret ved, at kulstofatomerne er bundet i ringe med dobbeltbindinger, der giver materialet høj kemisk stabilitet. Biokullets stabilitet skyldes netop denne aromatisering for mikroorganismer har svært ved at nedbryde de komplekse, kondenserede strukturer, og derfor kan kulstoffet blive liggende i jorden i århundreder, årtusinder eller endda millioner af år, uden at det omsættes tilbage til CO_2 .

Udbyttet af pyrolyse afhænger af temperaturen og processen. Ved lavere temperaturer (450 – 500 °C) produceres der mere biokul og mindre gas, mens højere temperaturer (over 600 °C) øger andelen af gas, men reducerer udbyttet af biokul. Årsagen er den grundlæggende termodynamik: højere energiinput driver flere molekyler over i flygtig fase. En typisk fordeling ved 600 °C er, at halvdelen af kulstoffet i den tørre biomasse-

Figur 3
Kulstofkredsløbet med pyrolyse og biokul.



masse ender i biokullet, mens resten ender i pyrolysegassen.

Det er biokullets permanens, der ligger til grund for klimagevinsten i pyrolyse og biokul. Vi afbryder det CO₂-neutrale kredsløb i naturen og i landbruget, hvor alt det kulstof, som planterne har optaget i form af CO₂, mens de voksede, igen går tilbage til luften som CO₂, når planterne nedbrydes. Ved at føre plantematerialet gennem pyrolyse, tilbageholdes halvdelen af kulstoffet som biokul. Den anden halvdel kommer ud som pyrolysegas, der kan anvendes som brændstof. Når dette brændstof bliver forbrændt, udløses kulstoffet naturligvis som CO₂, men kombinationen med biokul gør, at nettoresultatet bliver, at vi fjerner halvdelen af kulstoffet fra kredsløbet. Gør vi det i tilstrækkelig stort omfang, kan vi reducere mængden af CO₂ i atmosfæren i et omfang, som kan give et væsentligt bidrag til at afbøde de værste virkninger af klimaforandringerne.

Råvarer til pyrolyseprocessen

Stort set alle typer af biomasse kan pyrolyseres til produktion af biokul og grønne brændstoffer. I Danmark omfatter de relevante typer biomasse alle restprodukter fra land- og skovbrug, herunder overskudshalm, afgasset biomasse fra biogasanlæg, pressekager fra produktion af planteprotein, træflis mv., og derudover også grønt affald fra haver, parker og vejsider, affald fra fødevarerproduktion osv.

Træflis, nøddeskaller og andre hårde typer biomasse kan typisk pyrolyseres uden forbehandling. Halm, gødning og andre løse typer biomasse fra landbruget vil normalt kræve pelletering før pyrolyse. Ved pelletering presses materialet sammen til hårde piller på størrelse med ærter. Hvis ikke man pelleterer biomassen, bliver en stor del af materialet til støv under processen. Det betyder ikke noget for klimaeffekten, men det gør det besværligt at håndtere biokullet efterfølgende.

Biogasfibre og andre typer biomasse med højt vandindhold kræver både tørring og pelletering før brug. Forskellige tørringsteknologier kan anvendes, alt efter hvilken type biomasse der er tale om.

Når man anvender biomasse fra landbruget til produktion af biokul, bliver de fleste næringsstoffer bevaret ved at hæfte sig til biokullet. På den måde bliver næringsstofferne recirkuleret, når biokullet bliver udbredt på markerne. Her er særligt stoffet fosfor vigtig, da de globale forekomster af fosfor er knappe. Biomassens indhold af fosfor ender i biokullet, og det samme gælder kalium og magnesium. Kvælstof og i mindre grad svovl vil i pyrolyseprocessen havne i pyrolysegassen og føres derfor ikke tilbage til marken. Det specifikke indhold af de enkelte typer næringsstoffer i biokullet afhænger af, hvilke næringsstoffer der er i den biomasse, som pyrolyseres.

I dag er der en stor, uudnyttet ressource af biomasse i Danmark, især inden-

for landbruget, og det er muligt at forøge mængden væsentligt. Forskere fra Aarhus Universitet vurderer i *Knowledge synthesis on biochar in Danish agriculture* (Elsgaard et al., 2022), at der i 2030 vil være et potentiale på 6,6 millioner ton tørstof, hvis den nuværende landbrugspraksis fastholdes. Heraf forventes 2 millioner ton tørstof anvendt til produktion af bioenergi. Videnssynthesen inkluderer scenarier med biomassepotentiale i 2030 på 9,5 – 14,6 millioner tons tørstof. Selv med andre anvendelser af biomasse er der altså et meget stort potentiale for pyrolyse af restprodukter og affald fra landbruget.

Produkterne fra pyrolyseprocessen

Som nævnt ovenfor kan man indrette pyrolyseprocessen, så halvdelen af kulstoffet i den tørre biomassemasse ender i biokullet, mens resten ender i pyrolysegassen.

Biokul består næsten udelukkende af kulstof og mineralisk aske. Kulstoffet foreligger i form af aromatiske, kondenserede strukturer, som er yderst modstandsdygtige over for biologisk nedbrydning. Det betyder, at biokul ikke rådner eller omsættes i jordmiljøet på samme måde som frisk plantemateriale. Biokul kan godt brænde, og hvis man bruger træ som råvare til pyrolyseprocessen, får man fint, rent grillkul, der ved forbrænding udløser al den lagrede CO₂. Hvis man lader være med at brænde biokullet og i stedet gemmer det af vejen, er halvdelen af planternes kulstof permanent fjernet fra atmosfæren.

Figur 4
Biokul.



Den mest oplagte måde at ”gemme biokullet af vejen” på er ved at udbrede det på landbrugsjord. Biokul i pilleform er velegnet til at blive spredt på marker ved hjælp af de sædvanlige maskiner, som landmænd benytter, såsom kalkspredere, gødningsspredere, møgspredere og gyllespredere. For at undgå, at pillerne går i stykker, når de håndteres, skal de være stærke nok til at modstå et vist tryk. Stærke piller sikrer også, at spredningen bliver jævn og ikke i sig selv skaber for meget støv.

Udbredt på jorden har biokullet en række landbrugsmæssige fordele: Det kan forbedre jordens struktur, øge vandholdende evne, reducere næringsstofudvaskning og binde ammoniak i husdyrgødning. Desuden kan asken i biokullet fungere som gødning med fosfor og andre næringsstoffer.

Biokul kan også findeles og anvendes som tilslag til beton. Betonproduktion er en af de største industrielle kilder til CO_2 -udledning, fordi fremstilling af cement frigiver store mængder kuldioxid fra kalksten. Når biokul tilsættes beton eller letbetonblokke, kan det lagrede kulstof mere end opveje den CO_2 , der udledes i cementprocessen. På den måde får man et materiale, der ikke bare er klimaneutralt, men kulstofnegativt. Samtidig forbedrer biokullets porøse struktur betonens isoleringsevne og fugtstyring. På den må-

de kan byggebranchen hurtigere og mere effektivt tilbyde klimavenligt byggeri.

Der er mange andre anvendelsesmuligheder for biokul, bl.a. opgradering til aktivt kul. Opgraderingen sker ved opvarmning til $800 - 1000^\circ\text{C}$ med overhededt damp. Derved bliver overfladen af biokullet meget større end i den rå udgave, og på den måde får man den meget store overflade, som karakteriserer aktivt kul. På globalt niveau er der et stort marked for aktivt kul, der som bekendt har en meget stor evne til at adsorbere molekyler fra gas eller væske, fx forurenende stoffer, organiske forbindelser, tungmetaller og lugtmolekyler. Her forudsætter klimavirkningen dog, at det aktive kul depонерer efter brug.

Pyrolysegassen består af en blanding af dels letflygtige gasser, primært CO , CO_2 , H_2 og CH_4 , dels tungere organiske forbindelser, herunder længere kulbrinter, syrer, alkoholer, aldehyder, ketoner og fenoler. Alle bestanddelene er på gasform, når de ved en temperatur på ca 450°C forlader pyrolysereaktoren.

Pyrolysegassen kan anvendes på tre forskellige måder – ved direkte afbrænding, olie-kondensering og cracking.

Ved direkte afbrænding kan pyrolysegassen drive højtemperaturprocesser, som ikke uden videre kan udføres med elek-

tricitet. Af praktiske grund er man nødt til at holde pyrolysegassen varm på dens vej hen til brænderen, for ellers kondenserer tjære- og oliebestanddelene på indersiden af rørene. Man bruger derfor isolerede rør, der holdes på samme temperatur som den, gassen havde, da den forlod pyrolysereaktoren.

Ved olie-kondensering nedkøles pyrolysegassen til lidt over 100°C . Her fortættes de tungere organiske forbindelser, mens de letflygtige gasser som CO , CO_2 , H_2 og CH_4 forbliver på gasform.

Fortætningsproduktet, der normalt betegnes som pyrolyseolie, er en tyk, sort væske med en stærk lugt af tjære. Olien har et højt energiindhold, men kan være temmelig ustabil rent kemisk, fordi den indeholder mange iltede forbindelser. Uden viderebehandling har den derfor en tendens til at polymerisere og danne bundfald under lagring. Ved opgradering, som normalt sker ved hydrogenering, altså tilførsel af brint, kan pyrolyseolien stabiliseres, så den bliver lagerfast. Den kan derpå enten anvendes som brændstof til skibsmotorer eller raffineres til andre flydende brændstoffer som fx dieselolie.

Når man ikke køler pyrolysegassen ned til en temperatur under 100°C , er forklaringen, at der så kommer for meget vand med over i pyrolyseolien. Det går

ud over brændværdien og lagerstabiliteten. Ved at begrænse nedkølingen til lidt over 100 °C, forbliver langt det meste af vandet i gasfraktionen, hvor det ganske vist sænker brændværdien en smule, men ellers ikke gør skade.

Gasfraktionen kan anvendes til forskellige formål, fx afbrændes i en gasmotor til produktion af elektricitet.

Ved cracking går man den modsatte vej end ved oliecondensering og opvarmer pyrolysegassen til ca. 1000 °C. Her spaltes de tungere organiske forbindelser på grund af de termiske bevægelser ved den høje temperatur. Resultatet er en såkaldt syntesegas eller syngas, der efter tilsætning af lidt supplerende brint kan bruges til fremstilling af en lang række kulbrinter. En af disse kulbrinter er metanol, der er en meget anvendt råvare til plastmaterialer, som også kan anvendes til produktion af flybrændstof.

Udfordringer ved pyrolyseprocessen

Ved selve pyrolyseprocessen dannes der forskellige former for tjærestoffer, som kan være skadelige for miljøet. Det er derfor vigtigt, at processen tilrettelægges, så tjærestofferne ikke hænger ved biokullet, men i stedet ledes ud med pyrolysegassen, så tjærens energiindhold kan udnyttes.

Forskere på DTU Kemiteknik har udviklet en særlig variant af pyrolyseprocessen, som giver helt tjærefrit biokul. Det er denne proces, der anvendes i moderne pyrolyseanlæg i Danmark.

Man kunne også rejse spørgsmålet, om der dannes andre giftstoffer som dioxin eller PCB ved varmebehandlingen af biomassen. Også her viser det sig, at biokul produceret på moderne pyrolyseanlæg er fri for disse stoffer.

Et andet vigtigt spørgsmål er, om processen, der indebærer opvarmning til høj temperatur, i sig selv forbruger det meste af den energi, der produceres. Det er ikke tilfældet. Pyrolyseprocessen bruger kun omkring 5 % af energiindholdet

i biomassen til egen drift, resten udnyttes i biokul og energi.

En praktisk udfordring, der ofte nævnes i forbindelse med pyrolyse, er tørringen af biomasse. Mange typer biomasse, herunder den afgassede fiberfraktion fra biogasanlæg og vådt haveaffald, har et meget højt vandindhold. Når sådant materiale skal tørres, frigives store mængder vanddamp, der kan bære lugtstoffer med sig. Disse lugtgener kan være generende for både naboer og driftspersonale, hvis tørringen ikke foregår i et lukket system. Særligt organiske syrer, ammoniak og svovlholdige forbindelser kan give en karakteristisk ubehagelig lugt.

Løsningen på dette problem vil normalt være at udkondensere en del af vandindholdet fra tørreluften og derpå lade resten passere et stort kulfilter før udledning.

Gunstige miljøpåvirkninger fra biokul

Pyrolyseprocessen har den fordel, at miljøfremmede stoffer, som anvendes i moderne landbrug og industri, nedbrydes ved opvarmning til de høje temperaturer i pyrolyseovnen.

Når biomassen udsættes for 500 – 700 °C under iltfri forhold, spaltes ikke alene de naturlige bestanddele, herunder cellulose, hemicellulose og lignin, men også de mange kemikalierester, der kan være akkumuleret i biomassen. Det betyder, at biokullet, der kommer ud af processen, er fri for rester af pesticider, antibiotika, hormonlignende stoffer, mikroplastik og andre problematiske forbindelser. Selv de såkaldte ”evighedskemikalier”, PFAS (per- og polyfluorerede alkylstoffer), som ellers er kendt for at være næsten umulige at nedbryde i naturen, kan destrueres under de ekstreme pyrolysebetingelser.

Resultatet er et produkt så rent, at biokul fra moderne pyrolyseanlæg i flere europæiske lande kan godkendes som gødning i økologisk landbrug, selv når råvarerne stammer fra konventionelle driftsformer, hvor pesticider og andre tilsætningsstoffer er blevet anvendt.

Det at pyrolyseprocessen nedbryder pesticider, antibiotika, hormonlignende stoffer, mikroplastik og andre problematiske forbindelser, har oplagte fordele. Når restprodukterne fra konventionelt landbrug i form af halm, gyllefibre, planterester m.v. bliver spredt direkte på marker, ville en del af de problematiske stoffer ende i jorden. Over tid kan dette ændre jordbundens mikrobiologi, skade bestøvere og øge risikoen for resistensudvikling. Med pyrolyse elimineres disse stoffer, og det, der spredes, er et rent, stabilt kulstofmateriale med positive effekter på jordens struktur og næringsstofbalance.

I vandmiljøet er gevinsten lige så klar. Når biokul bruges til at binde næringsstoffer og forhindre udvaskning, betyder det også, at eventuelle kemikalierester ikke længere kan transporteres med udvaskningen. Det reducerer risikoen for algeopblomstring, hormonforstyrrelser hos fisk og forurening af drikkevand.

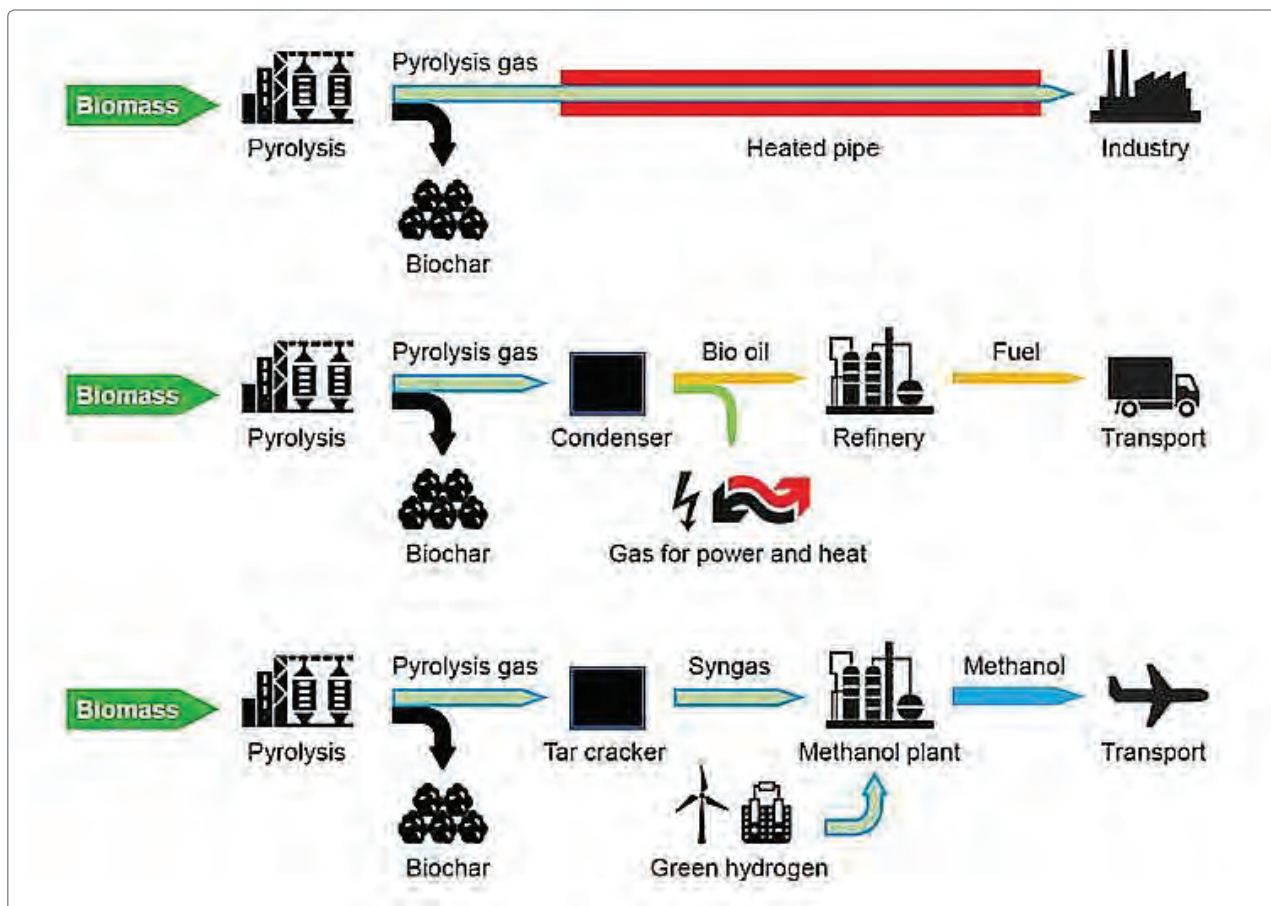
Klimaregnskabet

Typen af biomasse, som anvendes til pyrolyse, har en vis betydning for mængden af kulstof, som lagres i biokullet, og for energiproduktionen. Uanset typen af biomasse ender fordelingen af klimaeffekten dog med stort set at være den samme. I runde tal opstår to tredjedele af klimaeffekten ved lagring af biokul, mens den sidste tredjedel opstår ved fortrængning af fossile brændsler. Dertil kommer visse andre sideeffekter.

Fordelingen ser således ud:

- 0,7 – 0,75 ton CO₂ fjernes permanent ved kulstoflagring i biokul
- 0,3 – 0,45 ton CO₂ spares ved at erstatte fossile brændsler med pyrolysegas og flydende brændstoffer
- Op til 0,1 ton CO₂ spares ved reduktion af metanemissioner fra biomasse, der ellers ville rådne.

Der er meget, som tyder på, at der også er en betydelig klimavirkning fra forebyggelse af udledning af lattergas fra jorden, men det er endnu for tidligt at sætte præcise tal på denne effekt.



Figur 5
Anvendelse af pyrolysegas.

De fremtidige perspektiver

Der har i den offentlige debat været en vis bekymring for, at CO₂-fjernelse kan fungere som en slags "fripas" til fortsat udledning, at virksomheder og lande kan fortsætte med at brænde fossile brændsler af, så længe de samtidig betaler for at trække kulstof ud af atmosfæren. Dette er imidlertid en falsk modsætning. For at stabilisere klimaet er vi nødt til at arbejde på begge fronter samtidig: Vi skal både stoppe med at udlede nye mængder CO₂ og begynde at fjerne noget af det overskud, der allerede befinder sig i atmosfæren. Den ene strategi udelukker ikke den anden, tværtimod er de gensidigt afhængige. Uden drastiske reduktioner af udledningerne vil fjernelse aldrig kunne følge med. Uden fjernelse vil de historiske udledninger fortsat presse klimaet i århundreder.

Rent økonomisk tyder alt på, at pyrolyse og biokul er den samfundsøkonomisk

mest fordelagtige teknologi til CO₂-fjernelse. I nogle tilfælde kan pyrolyse endda give et reelt økonomisk overskud for samfundet, en fordel, som ingen andre CO₂-fjernelsesteknologier i dag kan matche.

Pyrolyseindustrien er stadig under udvikling, men biokul som klimavirkemiddel er allerede den mest anvendte teknologi til certificeret CO₂-fjernelse. I 2023 var 94 % af alle godkendte mængder af CO₂-fjernelse baseret på biokul.

I Danmark arbejder seks virksomheder med pyrolyse og biokul. Det største anlæg herhjemme kan behandle 40.000 tons biomasse om året og har en samlet klimavirkning på omkring 45.000 tons CO₂ i form af biokul og fortrængt fossilt brændstof.

Sammenfattende er pyrolyse og biokul et effektivt og lavrisiko værktøj til at trække kulstof ud af atmosfæren og samtidig pro-

ducere grøn energi. Vi får brug for mange andre metoder til fjernelse af CO₂ fra atmosfæren, men pyrolyse og biokul er en af de vigtigste, mest økonomiske og mest udviklede.

Vi står med en teknologi, der forener det bedste fra flere verdener: en løsning, der tager udgangspunkt i naturens eget kredsløb, men som med moderne ingeniørkunst kan forstærke og stabilisere det; en løsning, der samtidig skaber værdi for landbruget, energisektoren og industrien; og en løsning, der kan opskaleres globalt i løbet af få årtier.

Hvis vi griber denne mulighed, kan Danmark ikke blot nå sine egne klimamål, men også hjælpe verden med at nå de globale mål. Ligesom vindmøllerne blev symbolet på den første store danske klimainnovation, kan pyrolyse og biokul blive symbolet på den næste.