



Reduktion af landbrugets klimaaftryk ved hjælp af pyrolyse

August 2019

Af Ulrik Birk Henriksen og Jesper Ahrenfeldt, DTU Kemiteknik.

Indledning:

Dansk landbrug udleder drivhusgasser svarende til 10,5 mill. tons CO₂ ækvivalenter pr. år. Dette andrager 22% af Danmarks samlede drivhusgasudledning. Imidlertid kan der kompenseres for dette ved hjælp af pyrolyse af landbrugets biomasse-rester (halm, gyllefibre, biogasfibrester mm).

Når planterne vokser op, optager de vha. fotosyntese kulstof i form af CO₂ fra atmosfæren.

Ved pyrolyse deles biomassen i en koksfraktion (biokul) som indeholder ca. halvdelen af kulstoffet, og en gas-fraktion der indeholder resten.

Biokul-fraktionen er stabil og kan opbevares i mange hundrede år uden at den nedbrydes og hvis man gør dette (man kan tænke sig at opbevare det i nedlagte kulminer) har man hermed fjernet CO₂ fra atmosfæren.

I stedet for at opbevare det i nedlagte kulminer er det dog en langt bedre ide at anvende det som jordforbedringsmiddel på landbrugsjorde, da dette har mange fordele (se appendiks 2).

Ser man på de tilgængelige biomasse-ressourcer fra landbruget, er det ved ophobning af biokul muligt at kompensere for ca. halvdelen af landbrugets klimaaftryk (se appendiks 1).

Opsummerer man alle de klimagas-reducerende effekter inkl. anvendelse af de flygtige pyrolyseprodukter til produktion af flydende brændstof (f.eks. jetfuel) er potentialet at kompensere for 20-25% af Danmarks samlede klimagas-emissioner.

På lang sigt, når Danmark er blevet fossilfrit og klima- neutralt, vil fortsat anvendelse af biokul kunne fjerne over 5 mill tons CO₂ fra atmosfæren om året.

Landbruget har altså her mulighed for ikke blot at blive drivhusgas- neutral, men decideret at bidrage til fjernelse af CO₂ fra atmosfæren.

Man kan sige at pyrolyse af biomasse er en teknologi der står på 4 ben (se appendiks 2)

Reducerede drivhusgasemissioner:

Ved pyrolyse af biomasse fra landbruget, produceres biokul som kan nedmuldes og derved ophobes kulstof i jorden. Kulstoffet blev taget fra atmosfæren som CO₂ da planten voksede op.

En yderligere reduktion sker ved pyrolyse af gylle idet man undgår emissioner af drivhusgasserne metan og lattergas i forbindelse med oplagring og transport af gyllen.

Reduceret miljøpåvirkning:

Pyrolyseres gylle reduceres ammoniak-udslippet og lugt-gener fjernes. Samtidig fjernes eller reduceres en lang række miljøfremmede stoffer, såsom patogener, medicinrester, hormoner og tungmetaller. Dette gælder også ved anvendelse af biogasrestfibre.



Recirkulering og re-distribution af næringsstoffer:

Næringsstofferne i de pyrolyserede materialer tilbageføres til jorden sammen med biokullet.

Dette er yderst gunstigt idet f.eks. fosfor er ved at blive en begrænset ressource.

Næringsstofferne bliver opkoncentreret i biokullet således at de kan lagres og transporteres over længere afstande end tidligere.

Økologisk jordbrug får mulighed for at kunne tilbageføre næringsstoffer uden at skulle modtage husdyrgødning fra konventionel landbrug eller lignende.

Produktion af bioenergi og biobrændstoffer:

De flygtige pyrolyseprodukter anvendes som energi (fjernvarme og flydende brændstoffer f.eks. jet fuel) hvorved der substitueres fossil olie.

For uddybning henvises til de to appendiks.

Appendiks 1: Klimapotentialet for biokul.

Dette appendiks behandler bl.a. ressourceopgørelsen.

Forfattet af forskere fra DTU Kemiteknik.

Appendiks 2: Reduktion af landbrugets klimaaftryk ved termisk pyrolyse af afgrøderester og organiske gødningsfraktioner.

Dette appendiks behandler bl.a. de fordele der er ved anvendelsen af biokul i landbruget samt uddyber de 4 ben.

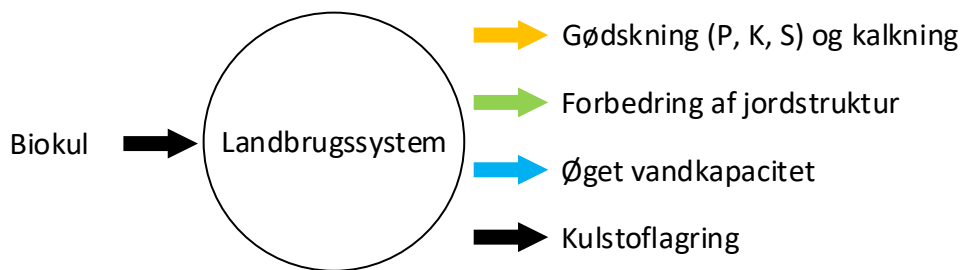
Forfattet af forskere fra en række danske universiteter.

Klimapotentiale for biokul

Af Rasmus Ø. Gadsbøll (post.doc, DTU KT), Tobias P. Thomsen (adjunkt, RUC), Jesper Ahrenfeldt (seniorforsker, DTU KT) og Ulrik B. Henriksen (seniorforsker, DTU KT)

Klimaudfordringerne tager fortsat til. Og selv om der er et stigende fokus, efterlader omstillingens hastighed endnu noget at ønske sig. Flere større rapporter og interessenter (herunder IPCC) har da også slået fast, at det nu er essentielt, at der ikke bare udfases fossil energi, men også at der ophobes kulstof uden for atmosfæren. Dette kan gøres på flere måder: mest simpelt kan beplantningen øges og mest avanceret kan CO₂ fra luft eller røggas indfanges og lagres. En tredje teknik er produktion af biokul (på engelsk *biochar*), der populært sagt er trækul bestående af fikseret kulstof og aske.

Der er blevet forsket i biokul de seneste 10-20 år og diskussioner om dets anvendelse er fortsat på højdepunktet. Biokul har en række potentielle anvendelser, men dets potentiale er størst indenfor landbrugssektoren. Her kan udspreddning på marker have en række positive effekter – de mest essentielle er skitseret på Figur 1. Målet for dette skrift er derfor at præsentere en kvalificeret overslagsberegning over det danske klimapotentiale for biokul og diskutere udvalgte effekter heraf. Som vi vil vise nedenfor, kan biokul fra halm og gylle i sig selv binde kulstof svarende til halvdelen af landbrugets samlede udledning af drivhusgasser.



Figur 1 – Tilførsel af biokul og landbrugets mulige gevinster

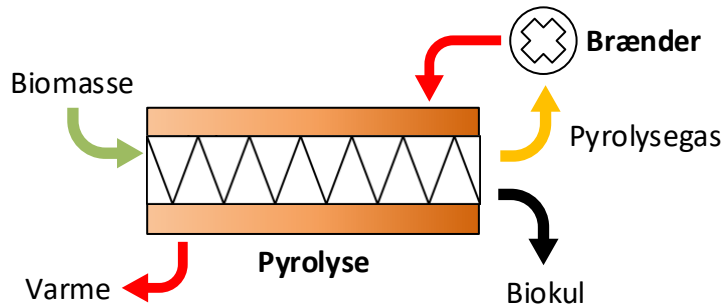
Pyrolyse og biokul

Ganske kort, fremstilles biokul ved at opvarme biomasse i en iltfri atmosfære til 500-600°C. Herved sker der en termisk nedbrydning af den organiske struktur i materialet og der frigives pyrolysegas (en blanding af bl.a. H₂, CO, CO₂, CH₄, tjære). Ca. ¼ af den oprindelige masse er tilbage som biokul efter processen, hvilket svarer til en energifraktion ift. den oprindelige biomasse på ≈30-45%. Kullet indeholder i størrelsesordenen halvdelen af biomassens kulstofindhold.

Pyrolyse er kendt teknologi og er blevet brugt i lang tid til fremstilling af trækul til en lang række formål. Basis teknologien er kommerciel til trækul fremstilling og relativt simpel. En af de helt store attraktioner ved teknologien er at alle slags biomasser kan anvendes fra træ til halm til slam til tang – dette primært pga. at temperaturen er tilpas lav til at undgå eventuelle askeproblematikker. En af de processer der er blevet anvendt på DTU i årtier og som er hyppig i industrien er illustreret på Figur 2: biomassen fødes ind i en transportsnegl, hvor den via varmeoverførsel gennem en metalkappe opvarmes. Den

Appendiks 1.

producerede gas kan bruges til energiformål f.eks. produktion af flydende brændstoffer eller brændes af og varmen bruges til at drive processen og fjernvarme. Teknologien er fleksibel ift. reaktorteknologier og kan, for så vidt, skaleres op til trecifrede megawatt-størrelse under de rette betingelser.



Figur 2 – Eksempel på pyrolyseteknologi baseret på simpel transportsnegl med indirekte varmeoverførsel

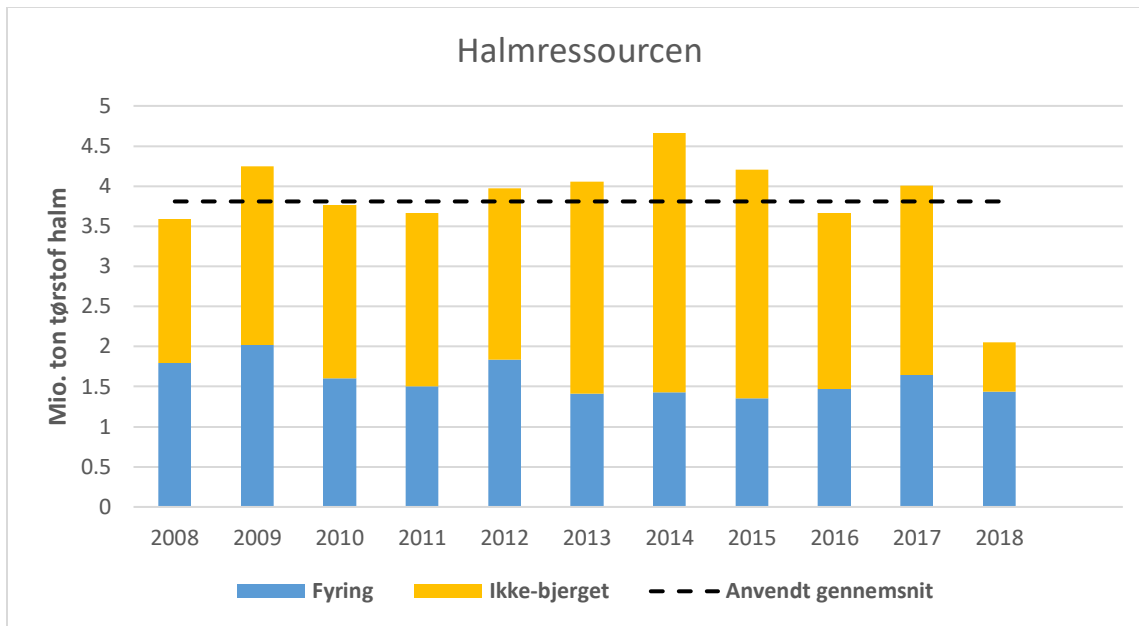
Estimat af potentialerne

Baseret på en række gængse studier og egen forskning har vi sammensat en beregning, der kan give et estimat af klimapotentialet for biokul i form af kulstofbinding. Det antages i første scenarie (Gennemsnitspotentialet) at hele den danske biomasse ressource pyrolyseres i en langsom pyrolyseproces (som eksempelvis den vist på Figur 2) og at biokulen spredes ud på det samlede landbrugsareal. Vi estimerer bl.a. et kuludbytte (vægt) på 23-33%, at 90-95% af kulstoffet i biokulen er stabilt. Beregning er lavet på et gennemsnitlige biomassepotentiale i størrelsesordenen med det der regnes med i det store studie ”+ 10 mio. tons planen”¹ i 2020 (Business as usual-scenariet).

Vores estimater har nogle begrænsninger i at det er så generaliserende som det er, herunder biomassers høje heterogenitet. Bl.a. har vi antaget, at biomassen har egenskaber svarende til 50% halm og 50% træ.

Dertil har vi opstillet et andet scenarie (Halm-gyllepotentialet) med potentialet for konvertering af halm og gylle, da disse udgør størstedelen af dansk biomasse og da disse ville kunne recirkuleres internt i landbrugssektoren med den foreslåede løsning. Pga. de afledte positive effekter biokullet kan have på landbrugsjorden, ser vi en klar mulighed for at implementere teknologien her inden for en kortere årrække. Til dette scenarie har vi anvendt specifikke og præcise data for halm og gylle. Vi har estimeret halmpotentialet via data Danmarks Statistik over de sidste 11 år og antager, at der ikke røres ved halm til foder og dybstrøelse, samt at al den ikke-bjergede halm kan anvendes – et overblik over potentialet er vist på Figur 3. Dette ender med et gennemsnit på 3,8 mio. ton tørstof af halm (med standardafvigelsen anvender vi et spænd på 3,2 til 4,4 mio. ton tørstof). Gyllepotentiale er estimeret via litteratur til 3,7 mio. ton tørstof (heraf 1 mio. ton dybstrøelse) og det antages ligeledes at hele potentialet kan udnyttes.

¹ ”10 mio. tons-planen”; Københavns Universitet, Aarhus Universitet, DONG Energy; opdateret 2016. Kan hentes på link: <http://cbio.au.dk/dyrkning-og-haandtering-af-groen-biomasse/10-mio-tons-planen/>



Figur 3 – Halmpotential og dets anvendelse, samt det anvendte gennemsnit

Store perspektiver

Hovedresultaterne er vist i Tabel 1. For "Gennemsnitspotential" ses det at der vil kunne indfanges kulstof svarende til størstedelen af landbrugets udledninger. Halm-gylle potential for biokul ligger på op til halvdelen af landbrugets samlede udledning af klimagasser (landbrugets samlede udledning regnes til 10,5 mill tons CO₂ ækvivalenter pr år).

Som en ekstrem, har vi også lavet et overslag på det maksimale potential for et halm-gylle scenariet, hvor vi inkluderer ekstra "grøn biomasse" (græsser f.eks.) produceret i landbruget. Her estimerer vi via tal fra 'Biomasse-scenariet' i "10 mio. tons planen", at der kan skaffes yderligere ca. 5 mio. ton tørstof udover de halm- og potentialer der er beskrevet ovenfor. Det antages at de 5 mio. ton har egenskaber svarende til halm. Herved opnås et biokulpotential svarende til 66-81% af landbrugets samlede udledninger.

	Gennemsnits-potentiale	Halm-gylle-potentialet	
Biomassepotential	163	121 – 145	PJ/år
Biomassepotential	9,2	6,9 – 8,2	mio. ton/år (tør)
Biokulproduktion	2,6	2,4 – 2,8	mio. ton/år
Biokulproduktion	2,0	1,6 – 1,9	GW
Tidsrum indtil landbrugsjordens kulstofindhold er fordoblet	144	247 – 293	år
Biokul CO ₂ -ækvivalent	7,1	3,9 – 5,2	mio. ton-CO ₂ -ævk./år
Biokul CO ₂ -ækvivalent ift. landbrugets udledning	68	38 – 50	%

Tabel 1 – Nøgleresultater for beregningerne.

Appendiks 1.

Disse potentialer, og den mulige løsning det repræsenterer på indfangning af atmosfærisk kulstof, har en række effekter. Vi vil ikke komme ind på dem i dybden her, men blot nævne nogle af de mest centrale.

Det viste klimapotential her er udelukkende relateret til det stabile kulstof i biokulet. Effekten af dette forslag vil dog også have andre positive effekter på CO₂-regnskabet relateret til energiproduktionen fra pyrolysegassen og gyllehåndteringen. Energien i gassen (ca. halvdelen af biomassens oprindelige energi) kan anvendes mest simpelt til fjernvarme og mere komplekst til bio-olie eller flybrændstof (og produktion af fjernvarme). En reduktion i CO₂-udledning fra transportsektoren (fly, skibe m.fl.) vil være værdifuld, og vi ser muligheden for at leverer CO₂-neutral brændstof til hele flysektoren inkl. tilsætning af elektrolytisk fremstillet brint. Dette svarer til ca. 40% af landbrugets udledning.

Der er også et stort potentiale for forbedret gyllehåndtering, idet store mængder metan i dag slippes ud i atmosfæren. Kan dette undgås ved at indsamle og omsætte gyllen med det samme i pyrolysesystemet, er potentialet en yderligere reduktion svarende til ca. 20% af landbrugets samlede CO₂-udslip.

At pyrolysere det meste af den danske biomasse og grave omtrent halvdelen af kulstoffet ned har dog også nogle markante konsekvenser. Energisystemet, sektoren og logistikken skal justeres. De nuværende biomassefyrede værker vil dog kunne omstilles til pyrolyseværker, hvor der vil blive produceret biokul, biobrændstof og varme. Pga. udnyttelsen af den store uudnyttede biomasseresource vil den nuværende varme produktion fra biomasse kunne opretholdes.

Jorden bliver varmere og vi har nu krydset en skillelinje, der dikterer at vi også skal til at hive kulstof ud af atmosfæren. Biokul kan leverer netop dette i stor skala med en kendt, simpel og robust teknologi. Dertil ser vi et klart potentiale for at starte implementeringen i landbrugssektoren, da der findes et stort uudnyttet halmpotentiale, en erfaring med håndtering af de relevante ressourcer og ikke mindst en kraftig synergieffekt mellem biokul og landbrugsjord.

REDUKTION AF LANDBRUGETS KLIMAAFTRYK VED TERMISK PYROLYSE AF AFGRØDERESTER OG ORGANISKE GØDNINGSFRAKTIONER

Skrevet af forskere fra:

Danmarks Tekniske Universitet, Institut for Kemiteknik^a, Institut for Mekanik^b og Institut for Vindenergi^c:

Seniorforsker Ulrik Birk Henriksen^a (ubhe@kt.dtu.dk | tlf.: 2132 5010), seniorforsker Jesper Ahrenfeldt^a (jeah@kt.dtu.dk | tlf.: 2132 5344), postdoc Rasmus Gadsbøll^a (rgad@kt.dtu.dk | tlf.: 6066 8815), lektor Lasse Røngaard Clausen^b (lrc@mek.dtu.dk | tlf.: 2071 2778) og adjungeret Professor Henrik Stiesdal^c (hst@stiesdal.com | tlf.: 2090 4323)

Roskilde Universitet, Institut for Mennesker og Teknologi: Adjunkt Tobias Pape Thomsen (tpapet@ruc.dk | tlf.: 2235 4425) og professor Henrik Hauggaard-Nielsen (hnie@ruc.dk | tlf.: 2133 0785)

Københavns Universitet, Institut for Plante- og Miljøvidenskab: Adjunkt Dorette Sophie Müller-Stöver (dsst@plen.ku.dk | tlf.: 3020 9065) og lektor Sander Bruun (sab@plen.ku.dk | tlf.: 3533 3481)

Aarhus Universitet, Institut for Miljøvidenskab: Seniorforsker Anne Winding (aw@envs.au.dk | tlf.: 3025 4675)

INDLEDNING

Landbrugssektoren i Danmark udleder i omegnen af 10.5 millioner tons CO₂-ækvivalenter per år svarende til 22% af Danmarks samlede indenlandske drivhusgasudledning. Landbrugets opgjorte emissioner består stort set udelukkende af metan og lattergas, da biogene CO₂-emissioner ikke indgår i opgørelsen, og emissioner fra omsætning af fossile brændstoffer tillægges energisektoren. Omkring 89% af Danmarks samlede lattergasemissioner og 78% af Danmarks samlede metanemissioner stammer fra landbrugssektoren. Af landbrugets opgjorte emissioner stammer ca. 3.5 millioner tons CO₂-ækvivalenter per år fra drøvtyggerses fordøjelsessystemer, 3 millioner ton fra produktion, behandling og opbevaring af organiske gødningsfraktioner (gylle, biogasfibre, slam, organisk affald osv.) og 4 millioner ton direkte fra landbrugsjorden f.eks. lattergasemissioner forbundet med udbragt kvælstofgødning [1].

Formålet med dette dokument er at introducere nogle af de potentialer, der kan være ved en omfattende implementering af termisk pyrolyse af afgrøderester og organiske gødningsfraktioner for reduktion af drivhusgasudledning fra dansk landbrug. Pyrolyse vil have til formål 1) at lagre biogent kulstof i landbrugsjorden, 2) at øge produktionen af dansk bioenergi, 3) at reducere de direkte emissioner af lattergas og metan fra behandling, opbevaring og anvendelse af organiske gødningsfraktioner, og 4) at foranledige en række yderligere emissionsreduktioner og dyrkningsmæssige fordele via jordforbedring. Notatet vil beskrive disse fire formål og give en kvalitativ vurdering af de relaterede reduktionspotentialer.

Mange af de omtalte potentialer kan realiseres både i og uden for Danmark. Substrater som halm, slam og gyllefibre er globale ressourcer og de fordele der ligger i en optimeret behandling af disse er ligeledes globale.

I Figur 1 illustreres de tre hovedtrin, som organisk materiale gennemgår ved opvarmning uden tilstedeværelse af ilt. Temperaturangivelserne er typiske procestemperaturer. Efter figuren følger en nærmere beskrivelse af de tre processer:



Figur 1: Illustration af de processer som organisk materiale gennemgår ved opvarmning uden tilførsel af ilt. Typiske procestemperaturer angivet.

- 1) Når opvarmning af et organisk materiale begynder, vil materialet først tørre. Dette er en energikrævende proces, som har et stort specifikt varmebehov per enhed vand, der skal fordampe. Ved termisk pyrolyse af relativt tør biomasse kræver dette ikke særlig opmærksomhed, og tørringen vil foregå i den første del af pyrolysereaktoren. Konverteres i stedet våd biomasse, øges systemets energieffektivitet voldsomt ved integration med en damptøringsproces. I Danmark har der generelt ikke været noget stort fokus på separate tørringsteknologier, da det har været anset for dyrt og besværligt. De sidste par år har teknologien imidlertid gennemgået en markant udvikling, og med nye dampbaserede tørringsteknologier på et kommercielt udviklingsniveau er der i dag helt andre muligheder for rentabel tørring. Termisk integration af damptørring og pyrolyse i systemer med mulighed for at afsætte restvarme som fjernvarme eller lavtemperatur procesvarme er uhyre effektivt og har et meget lille nettotab af energi. Halm, avner og lignende tørre eller halvtørre biomassefraktioner vil kunne pyrolyseres uden forudgående behandling af materialet. Ved mere frisk grøn biomasse som slet fra naturplejearealer, efterafgrøder eller græsmarksafgrøder kan en damptøringsproces integreres. Ved meget våde fraktioner som slam eller gylle vil pyrolyse og damptørring kunne kombineres med mekanisk afvandning. Som alternativ eller supplement til tørring kan våde fraktioner blandes op med tørre fraktioner (f.eks. halm og spildevandsslam) i et optimalt forhold.
- 2) Når overfladevand og fugt er fordampet, begynder materialet at riste eller torreficere. Ved denne proces fordampes også cellebundet vand, og en række simple organiske molekyler frigives. Dette er ligesom tørring en proces, som kræver tilførsel af varme. Stoppes processen på dette trin, kan den bruges til produktion af f.eks. kaffe eller til varmebehandling af træ. For at opnå et energiudbytte og producere biokul skal processen imidlertid fortsættes, og temperaturen skal øges yderligere.
- 3) Når alt vand og materialets meget flygtige komponenter er dampet af, begynder den termiske pyrolyse. Pyrolyse er en paraplybetegnelse for en række kemiske processer, som alt organisk materiale spontant undergår ved opvarmning til mere end 300 °C. Under pyrolysen går en række store, organiske molekyler på dampform, og materialet ændrer sin kemi og struktur som beskrevet nedenfor. Pyrolysen er typisk fuldendt ved temperaturer på 500-600 °C, men kan i princippet foretages ved meget højere temperaturer, så længe der ikke er ilt til stede. Under pyrolysen splittes materialet i to fraktioner - en fast biokulfraktion og en flygtig pyrolysegas. I den faste biokul kan man genfinde omkring halvdelen af materialets oprindelige kulstof, op til en tredjedel af kvælstoffet samt de ikke-flygtige uorganiske bestanddele. I pyrolysegassen genfindes den

anden halvdel af kulstoffet sammen med næsten alt ilt og brint, det meste kvælstof og de flygtige uorganiske bestanddele. Ved typiske pyrolysetemperaturer på omkring 550-650 °C vil de fleste uorganiske elementer (f.eks. fosfor, kalium, calcium og magnesium) blive i biokullet mens dele af klor- og svovlindholdet typisk vil findes i gasfasen. Den præcise fordeling af, hvor meget af de forskellige elementer der ender i henholdsvis kul- og gasproduktet, afhænger både af materialets kemi og struktur og af processens temperaturprofil (f.eks. opvarmningshastighed, opholdstid og maksimumtemperatur). Pyrolysegassen kan efterfølgende køles ned, hvorved tjærefractionen vil kondensere ud i en let og en tung fraktion, og den resterende gas vil således komme til at bestå udelukkende af ikke-kondenserbare komponenter, f.eks. CO₂, CO, CH₄, H₂ osv. Varmebehovet til pyrolyseprocesserne kan stort set bestemmes ud fra materialernes varmekapacitet.

Tørring og torrefaction ved lave temperaturer kan foregå under iltrige forhold (i f.eks. luft), mens torrefaction ved højere temperaturer og pyrolyse kræver iltfrie forhold for at undgå, at materialet oxideres, så der går ild i det. Dette klares proces teknisk ved at undgå tilførsel af luft under processen. Den smule luft, der er til stede i materialet, bliver hurtigt opbrugt, og dannelse af pyrolysegas forhindrer luft i at trænge ind i anlægget.

Termisk pyrolyse af træ har været kendt og anvendt i hundreder af år til produktion af trækul og træ tjære. Det er en fleksibel og robust proces, der i dag finder anvendelse inden for mange forskellige områder f.eks. til produktion af varme, olie, gas, aktivt kul og biokul samt til behandling af organisk affald, husholdningsaffald, dæk og plastik. I Danmark foregår pyrolyse i stor skala til demonstration af behandling af plastikaffald og dæk samt i kombination med damp tørring til behandling af spildevandsslam, fiskeslam og andre problematiske, våde, organiske ressourcer.

TERMISK PYROLYSE SOM KLIMAVIRKEMIDDEL OG JORDFORBEDRINGSTILTAG I LANDBRUGET

Under optimale betingelser kan pyrolyse af biomasse i landbruget blive en teknologi der står på fire ben med hver deres bidrag til den samlede samfundsgevinst:

REDUCEREDE DRIVHUSGASEMISSIONER

Termisk pyrolyse af afgrøderester og organiske gødningsfraktioner kan komme til at spille en afgørende rolle i reduktion af landbruges klimaaftryk. Det sker blandt andet igennem direkte reduktion af landbrugets emissioner samt ved reducerede produktionsinput og øget produktivitet fra marker med biokul:

- Ved pyrolysen bindes ca. halvdelen af det kulstof, der er i afgrøderester og organiske gødningsfraktioner, i en fast biokulfraktion [2,3]. Grundet den kraftige reduktion af materialets indhold af ilt og brint samt biokullets kemiske struktur er det meget svært for mikroorganismer i jorden at mineralisere dette kulstof. Der er således i stabilitetsforsøg observeret en meget begrænset omdannelse af biokul-kulstof, og det forventes at størstedelen af kulstoffet vil blive i jorden i hundreder eller tusinder af år [4,5]. Derved kan man effektivt trække CO₂ ud af atmosfæren år efter år via fotosynteseaktivitet i f.eks. korn og græs og akkumulere kulstof i jorden. Ved pyrolyse af planterester fra etårige afgrøder, f.eks. halm, vil beregninger af klimaeffekten være simple og mere entydig, end det er tilfældet fra systemer med termisk omsætning af træ, hvor diskussioner af beregningens tidsmæssige afgrænsning har ført til debat om, hvor stor den reelle klimaeffekt er.
- Metan-, lattergas-, kuldioxid- og ammoniakudslip fra oplagring og transport af organisk gødning og organiske gødningsfibre reduceres. Organisk gødning er biologisk højaktivt ved produktionen. Dette fører til massive udledninger af drivhusgassene metan, lattergas og kuldioxid samt ammoniak og lugtstoffer. Emissionerne fortsætter under lagring, transport og udbringning. Eksisterende virkemidler som gylleseparation, gyllenedkøling og/eller gylleforsuring kan reducere emissionerne, men ikke på et niveau, der kan

sammenlignes med effekten fra en kombineret afvanding, damptørring og termisk pyrolyse [6–9]. En termisk behandling vil gøre materialet fuldstændig sterilt, og det vil efterfølgende kunne transporteres, lagres og bringes i anvendelse uden risiko for betydelige drivhusgasemissioner, ammoniakfordampning eller lugtgener. Det er væsentligt i denne henseende at afdampet ammoniak kan føre til dannelse af lattergas.

- Lattergasemissioner fra marken kan reduceres, selv hvis der kompenseres for tabt kvælstof med tilsætning af mineralsk kvælstofgødning. Det er ved et inkubationsforsøg påvist, at emissioner fra jord tilsat mineralsk kvælstofgødning var markant lavere sammen med biokul fremstillet af gyllefibre end med enten rå eller komposterede fibre [8]. Det er også vist, at visse former for biokul generelt inhiberer lattergasproduktion fra forskellige dyrkningssystemer med mere end 30 % [10,11]
- Tilførsel af biokul til landbrugsjord kan også føre til indirekte emissionsreduktioner via reduceret kalkningsbehov (biokul har høj pH) og lettere jordbearbejdning [12]. I sandet jord vil tilførsel af biokul øge jordens evne til at holde på vandet og derved reducere behovet for kunstvanding i tørre perioder [13].
- Endelig kan tilførsel af biokul til landbrugsjord reducere den specifikke drivhusgasemission pr. produceret afgrøde ved at øge jordkvaliteten og jordens produktivitet og robusthed. Dette kan blandt andet ske som en afledt effekt af jordens vandholdningsevne og evne til at fastholde næringsstoffer. Samtidig skabes bedre vilkår i jorden for de jordlevende organismer, hvilket kan øge jordens, og derved dyrkningssystemets, biodiversitet og robusthed [13–17].

REDUCERET MILJØPÅVIRKNING

Termisk pyrolyse af afgrøderester og organiske gødningsfraktioner både fra landbruget og byer vil medføre fjernelse af en lang række organiske forureninger samt reducere problematiske ammoniakemissioner og lugtgener:

- Den termiske pyrolyse af organiske fraktioner som slam, madaffald, gylle- eller biogasfibre kan bruges til at fjerne en række skadelige stoffer, inden materialet recirkuleres til landbruget med de vigtige næringsstoffer (se næste afsnit). Organiske miljøfremmede stoffer (f.eks. medicinrester, væksthormoner, mikroplastik og pesticidrester) bliver nedbrudt ved de høje temperaturer i løbet af processen [18]. Desuden vil det meget flygtige tungmetal kviksølv også gå på gasform, mens cadmium, zink og visse andre problematiske tungmetaller i stort omfang damper ud af biokullet hvis pyrolyse-temperaturen øges til 700-800 °C [19].
- Pyrolyse reducerer ammoniakudslip og lugtgener. Udledningen af ammoniak har negative effekter på miljøet, og der er meget fokus på at reducere ammoniakfordampning i dansk landbrug. Ved pyrolyse af fiberresten umiddelbart efter afvanding elimineres ammoniakemissioner og lugtgener fra den efterfølgende opbevaring, transport og anvendelse af denne fraktion. Det er blevet påvist, at biokul kan binde op imod halvdelen af ammonium i urin fra kvæg og bevare kvælstoffet i en plantetilgængelig form [20–22]. Anvendes det producerede biokul f.eks. under staldgulve eller som flydelag i gylletanke, kan dette muligvis udnyttes til både at øge indholdet af plantetilgængeligt kvælstof i kullet og til at reducere ammoniakfordampningen i landbruget.
- Når termisk pyrolyse anvendes på fraktioner med en høj andel af organisk bundet kvælstof som gylle- eller biogasfibre, kan det medføre en reduktion i systemets samlede nitratudvaskning. Det skyldes, at kvælstof i organisk form ikke kan udnyttes direkte af planterne, men skal mineraliseres først, hvilket ikke nødvendigvis er synkroniseret med planternes behov og derfor kan medføre udvaskning [23]. Desuden kan tilførelse af

biokul reducere udvaskning af nitrat fra anvendelse af mineralsk kvælstofgødning med mere end 10 % grundet kullets evne til at holde på vand og næringsstoffer [10].

RECIRKULERING OG REDISTRIBUERING AF NÆRINGSSTOFFER

Årligt tilføres de danske jorde store mængder næringsstoffer i form af kvælstof, fosfor og kalium samt mindre mængder svovl, magnesium og en række mikronæringsstoffer. Et økonomisk og miljømæssigt bæredygtigt dansk landbrug kræver øget genanvendelse og recirkulering af næringsstoffer. I denne betragtning skelnes der imellem fornybare og ikke-fornybare næringsstoffer. Det eneste reelt fornybare næringsstof er kvælstof, der udgør knap 80% af Jordens atmosfære, mens fosfor, kalium, svovl, magnesium osv. tilhører gruppen af ikke-fornybare næringsstoffer. Disse næringsstoffer er begrænsede, men med store forskelle i deres begrænsning. Fosfor er i dag det mest kritiske af makronæringsstofferne. Fosfor importeres i både Danmark og EU i meget store mængder - både direkte som mineralsk gødning og indirekte via foder, og det optræder på EU's liste over kritiske råmaterialer [24,25]. Samtidig er fordelingen af fosfor i landbrugsjorden meget ujævn så der i visse områder er et stort overskud af tilført fosfor i forhold til afgrødernes behov og i andre områder tilsvarende underskud. Udbredelse af separation- og pyrolyseprocesser i dansk landbrug vil give en lang række fordele i denne henseende hvilket dog også vil medføre nogle begrænsede ulemper i forbindelse med tab af kvælstof:

- Ikke-flygtige næringsstoffer som f.eks. fosfor og kalium bliver i biokullet og bringes med dette tilbage på marken, men der kan være store forskelle i gødningsværdien af de forskellige elementer i biokul. Mens kalium fra biochar generelt øger den plantetilgængelige pulje i jorden markant [26,27] er vurderingen af plantetilgængelighed af fosfor i biokul typisk mindre entydig og gødningskvaliteten vil afhænge både af biokullets specifikke karakteristika (hvad det er produceret af og hvordan det er produceret), jordtypen, klimaet og dyrkningssystemet. Pyrolyse af fosforholdige substrater har derfor i nogen studier været påvist at føre til en reduktion i plantetilgængeligheden mens det i andre er vurderet at biokul kan have en umiddelbar fosfortilgængelighed sammenlignelig med udgangsmaterialet og en langtidsgødningseffekt sammenlignelig med superfosfat [28–30]. Dette vil derfor skulle undersøges nærmere for at kunne lave mere generelle og anvendelsesorienterede konklusioner.
- Mange aktører inden for økologisk jordbrug viser interesse for termisk oprensede gødningsfraktioner som madaffald og spildevandsslam som pt ikke må anvendes i ubehandlet form pga usikkerheder forbundet med ukendte risici og miljøpåvirkninger. En termisk oprensning af disse fraktioner vil derimod give mulighed for at agere ud fra et forsigtighedsprincip og fjerne alle organiske miljøfremmede stoffer før de ikke-fornybare næringsstoffer tilbageføres fra samfundet til den økologiske fødevarerproduktion. På den måde kan pyrolyse bidrage til at lukke næringsstofkredsløb omkring denne produktionsform. Ønskes et forsat bidrag af fosfor og kalium fra det konventionelle til det økologiske jordbrug, kan dette med pyrolyse ske uden risiko for at overføre rester af medicin og sprøjtemidler. Anvendelse af biokul fra pyrolyseret organisk affald og organiske gødningsfraktioner vil dog kræve visse ændringer i den nuværende regulering inden for økologisk jordbrug.
- En anden fordel i forbindelse med recirkulering af næringsstoffer er, at de ikke-flygtige bestanddele i biokullet koncentrerer betragteligt i forhold til både gylle og fibre. Dette gør det langt mere fordelagtigt at transportere disse næringsstoffer over større afstande. Kombinationen af forbedrede transportmuligheder og adskillelse mellem kvælstof og fosfor er desuden relevant i områder hvor stor husdyrproduktion medfører et behov for omfordeling af næringsstoffer i husdyrgødning. I områder med mange dyreenheder vil der ofte være et samtidigt ønske om at recirkulere kvælstof og udskibe fosfor for både at gennudnytte næringsstoffer og imødekomme regulering om gødskningslofter. Gylleseparation kombineret med termisk pyrolyse er i denne forbindelse interessant på grund af en høj kvælstofgødningsværdi af væskefraktionen og fordele ved transport og omfordeling af især fosfor i den faste fraktion, så de lovmæssige bindinger imellem husdyrproduktion og nødvendige jordarealer kan kompenseres. Ved pyrolyse koncentrerer de ikke-flygtige

Appendiks 2.

næringsstoffer langt mere end ved konventionel tørring og åbner for nye muligheder for at distribuere og anvende disse næringsstoffer optimalt.

- Koblingen af separationsteknikker og pyrolyse giver nye muligheder for at lave målrettede gødnings-substrater (designergødning), der kan være de rå organiske gødninger overlegne i f.eks. fosfor-kalium forhold eller frigivelsesrater. Blanding af forskellige materialer, separation og termiske processer kombineret med partikelstørrelsesmanagement kan være en lavteknologisk vej at imødekomme disse ønsker [19].
- Langt størstedelen af det kvælstof, der er til stede i organisk materiale, som pyrolyseres ved typiske temperaturer omkring 600 °C, vil tabes som atmosfærisk kvælstof i gasfasen [31,32]. Dette er en ulempe ved den termiske behandling, da landmanden ofte er meget interesseret i at recirkulere så meget kvælstof som muligt. Problemstillingen er primært relevant ved pyrolyse af fraktioner med lavt kulstof:kvælstof forhold (f.eks. gylle- og gødningsfibre), hvilket er med til at forskubbe forholdet mellem fordelene ved kulstof-sekvestrering og energiproduktion på den ene side og ulemperne ved højt kvælstoftab på den anden. Der er dog imidlertid flere grunde til at kvælstoftabet selv i disse tilfælde sjældent vil være en afgørende ulempe:
 - o Afvanding af våde, kvælstofrige substrater som gylle og biogasdigestat vil føre til opdeling mellem fosfor og kvælstof, hvor størstedelen af fosfor vil blive i fiberresten og størstedelen af kvælstof vil blive i væsken. Væsken kan recirkuleres direkte, mens fiberresten pyrolyseres og tilføres jorden som biokul.
 - o Anaerob udrådning i et biogasanlæg kan føre til en yderligere styrkelse af splittelsen mellem fosfor og kvælstof i den efterfølgende separation. Dette kan være et argument for i visse tilfælde at kombinere biogasanlæg og termisk pyrolyse.
 - o Kvælstoftabet kan der delvis kompenseres for med dyrkning af kvælstoffikserende enårige eller flerårige afgrøder som ærter og hestebønner eller forskellige kløverarter og lucerne, som afhængig af lokale jordbundsforhold og sædskifter kan være selvforsynende med kvælstof fra atmosfæren, og som desuden efterlader kvælstof i jorden til de efterfølgende afgrøder [33,34].
 - o Der forskes i dag intenst i decentral produktion af ammoniak ved anvendelse af grøn strøm fra f.eks. vindmøller. Både Siemens og Vestas er involveret i forsknings- og udviklingsprojekter af denne art, og typisk er det en meget lille del (omkring 2% ved pyrolyse af halm og 7% ved pyrolyse af gyllefibre, egne beregninger) af den energi, der frigives ved pyrolyse, som ville skulle bruges til at genproducere det tabte kvælstof.
- Reguleringen af produktion og anvendelse af biokul i landbruget skal afklares, før en omfattende udbredelse kan finde sted. Ved recirkulering af næringsstoffer i form af biokul vil der efter alt at dømme skulle tages højde for gældende regulering i enten *Bekendtgørelse om anvendelse af bioaske til jordbrugsformål* (BEK nr. 732 af 09/07/2019), *Bekendtgørelse om miljøregulering af dyrehold og om opbevaring og anvendelse af gødning* (BEK nr. 722 af 09/07/2019) og/eller *Bekendtgørelse om anvendelse af affald til jordbrugsformål* (BEK nr. 1001 af 27/06/2018). Bioaskebekendtgørelsen omtaler ikke pyrolyse, men definerer bioaske som "aske fra forgasning eller forbrænding" og er dermed sandsynligvis også relevant i forhold til udbringning af biokul fra pyrolyse af træ, halm og andre restafgrøder og etårige afgrøder (f.eks. græs eller energiafgrøder). Pyrolyse nævnes heller ikke i husdyrbekendtgørelsen, men her inkluderes aske fra forbrænding af husdyrgødning i definitionen af bioaske: "Bioaske: Gødningstyper, der hidrører fra forgasning eller forbrænding af organisk materiale, herunder de asketyper, der er omfattet af bekendtgørelse om anvendelse af bioaske til jordbrugsformål, og forbrændt husdyrgødning". Affaldsbekendtgørelsen nævner hverken

pyrolyse eller aske, men omfatter ”affald fra husholdninger, institutioner og virksomheder, herunder biologisk behandlet affald, processpildevand og spildevandsslam, i det omfang affaldet påtænkes anvendt til jordbrugsformål”. Det kan dermed blive relevant at følge denne bekendtgørelse i forbindelse med pyrolyse af spildevandsslam, slam fra recirkulerende dambrug, visse former for biogasfibre o. lign. Det er muligt, at det også er denne bekendtgørelse, der skal følges ved pyrolyse af f.eks. en slam-halm blanding.

Bekendtgørelserne definerer blandt andet en række grænseværdier, der skal overholdes. Disse er i visse tilfælde pr kg tørstof og i andre per fosforenhed. Pyrolyse af organiske gødningssubstrater vil altid have en ulempe i forhold til direkte anvendelse af ikke-behandlede fibre, når grænseværdierne er pr kg tørstof, men vil tilsvarende ofte have en fordel, når grænseværdierne er pr fosforenhed. Med den nuværende lovgivning er det dermed ikke en entydig fordel af pyrolysere f.eks. spildevandsslam og gyllefibre i forhold til de gældende grænseværdier på trods af, at man i pyrolysen kan reducere tungmetallindholdet pr fosforenhed, og det er det der udbringes efter.

PRODUKTION AF BIOENERGI OG BIOBRÆNDSTOFFER

Termisk pyrolyse er en fleksibel og robust proces, der kan fødes med en lang række forskellige substrater fra plastik over biomasse til spildevandsslam. Energiprodukterne fra processen vil variere i kvalitet og kvantitet med beskaffenheden af det omsatte materiale og pyrolysesystemets design. Der er imidlertid en række samlende aspekter, der karakteriserer termisk pyrolyse som energiproducerende anlæg:

- Grundet fleksibiliteten i processen er der et meget stort energipotential i de fraktioner, der egner sig til pyrolyse. Op imod 200 PJ vil være det teoretiske maksimumpotential for dansk produceret biomasse, som kan omsættes i egnede pyrolyseprocesser. Tallet er baseret på en række beregninger, som tager udgangspunkt i studiet ”+10 mio. ton”, der sammenfatter mulighederne for at øge udnyttelsen af den danske biomasseressource til energiformål [35,36]. I Danmark har der de sidste 3 år været et registreret faktisk energiforbrug på ca. 750 PJ pr år.
- Ca. 50% af energien i det omsatte materiale vil kunne trækkes ud af processen som en kombination af overskudsvarme, gas og olie. Langt størstedelen af den resterende halvdel af energien forbliver bundet i biokullet, mens en mindre del (omkring 2-5%) tabes i form af varme fra processen til omgivelserne. Den præcise energibalance for processen afhænger både af anlægsdesign, driftsindstillinger og af, hvilket materiale der pyrolyseres.
- I systemer, hvor der konverteres tør biomasse, vil der være et stort energioverskud fra processen, som vil kunne ekstraheres som gas og/eller bioolie. De flygtige pyrolyseprodukter kan anvendes som energi i form af enten fjernvarme eller flydende brændstoffer, hvorved der substitueres fossile brændstoffer.
- I systemer, hvor meget våde fraktioner ønskes behandlet, vil en stor del af det samlede energioutput være i form af knap 100 °C varmt vand, som er egnet til brug i for eksempel fjernvarmesystemer. Ved integration af en dampkompressor til damptørringen kan dette dække energibehovet til tørring. Pyrolysegasserne kan i stedet anvendes til produktion af flydende brændstoffer.
- Anvendelse af overskudsvarme fra damptørring og pyrolyse til produktion af proces- eller fjernvarme er kendte teknikker. Det er også muligt at koble pyrolyse af halm til en kraftværkskedel og føde pyrolysegassen ind i kedlen til substitution af kul eller træpiller i produktion af el og varme [2,37].

Appendiks 2.

- En mindre mængde bioolie fra pyrolyse forventes uden den store omstilling at kunne erstatte fossil olie i eksisterende olieraffinaderier og erstatning af heavy fuel oil med bio-olie til at drive skibsmotorer forventes ligeledes at være en effektiv anvendelse, der ikke vil kræve meget omfattende udvikling.
- Raffinering af større mængder pyrolyse-produceret bioolie til produktion af højkvalitets biobrændstof og jetfuel forudsætter fornyet fokus på den igangværende udvikling indenfor blandt andet hydrotermisk/katalytisk deoxygenering, hydrogenering og hydrocracking af disse olier.
- Fordelingen mellem kulstof og brint i den pyrolyse-producerede syntesegas og bioolie kan ikke forventes at svare til den ønskede fordeling i eksempelvis jetfuel, og for at opnå en høj udnyttelse af det biogene kulstof til dette formål vil det generelt være nødvendigt at tilføre en større mængde brint [38]. Denne brint kan med fordel produceres ved elektrolyse af vand under anvendelse af overskudsstrøm fra vindmøller. Det er også muligt at producere brint direkte i vindmøller, hvorved man går fra elektrisk transmission af den producerede energi til rørbaseret transmission. Siemens Gamesa arbejder for tiden med udvikling af denne teknologi.
- Ved en omfattende implementering af termisk pyrolyse af dansk biomasse vil der være tilfælde, hvor dele af denne biomasse tages fra eksisterende energiprocesser f.eks. ristefyret afbrænding af halm. I 2018 var omkring halvdelen af det forventet realistiske potentiale for halm anvendt til energiformål, hvilket ville betyde at omtrent 20 PJ halm ville mangle rundt omkring i varme- og kraftvarmeværkerne. Opgørelsen for gylle og gødningsfibre er mindre entydig men det kan forventes at der ved fuld implementering af pyrolyse af disse fraktioner ville mangle 10-15 PJ i de danske biogasanlæg. Det vil i mange af sådanne tilfælde være muligt at udnytte dele af den eksisterende infrastruktur til fortsat energiproduktion enten ved at integrere processerne med pyrolyse eller erstatte kerneprocesserne hermed.

BEHOV FOR FORSKNING, UDVIKLING OG FORMIDLING I FORBINDELSE MED UDBREDELSE AF TERMISK PYROLYSE I DANSK LANDBRUG

Termisk pyrolyse af f.eks. halm er en ukompliceret, robust og relativ billig proces. Det vil ikke kræve meget udviklingsarbejde at opstille termiske pyrolyseanlæg til at omsætte dansk overskudshalm til proces- eller fjernvarme og biokul. På en lang række områder er biokullets kvaliteter allerede veldokumenterede, og det kan med en systematisk tilgang til pyrolyse af halm i Danmark derfor allerede i dag realiseres at landbruget både får mulighed for at bidrage yderligere til omstilling af energisektoren, mens der trækkes store mængder CO₂ ud af atmosfæren, som nemt og sikkert kan langtidslagres i jorden. De første mange forsøg med effekter på jorden fra forskellige typer af halmbaseret biokul er allerede blevet udført, og arbejdet skal videreføres for at sikre, at biokullet anvendes, hvor effekten på jordkvalitet og planteproduktion er størst.

Den største del af udviklingsarbejdet ligger i de følgende tre aspekter:

- 1) Produktion af raffinerede biobrændstoffer og jetfuel fra pyrolysegas og bioolie. Denne produktion kan sandsynligvis med fordel opdeles i to trin, hvor det direkte produkt af pyrolyseprocessen er metanol, og hvor den videre konvertering af denne metanol til de ønskede produkter sker på eksisterende raffinaderier. De relevante processer omfatter bl.a. hydrotermisk/katalytisk deoxygenering, hydrogenering og hydrocracking. Arbejdet på optimering af disse processer er påbegyndt for mange år siden, og man er på mange områder kommet meget tæt på målet, men der udestår dog stadig et betydeligt udviklingsarbejde, før det på en robust og økonomisk måde kan produceres jetfuel fra pyrolysegas og bioolie. [39–42].
- 2) Inddragelse af nye restafgrøder og organiske gødningsfraktioner. Mens der har været forsket intenst i pyrolyse af træ og halm er erfaringen med andre restafgrøder og de organiske gødningsfraktioner noget

mindre. Optimal udnyttelse af disse fraktioner vil derfor kræve optimering af den termiske proces i form af integration med dampørringsanlæg samt optimering af biokul-anvendelsen. Biokullets karakteristika vil ændre sig med beskaffenheden af det materiale, der pyrolyseres. Der er derfor behov for undersøgelser der afdækker funktionen af biokullet i jorden. Der er rigtig mange muligheder for at optimere disse systemer, og nogle enorme potentialer relateret dertil.

- 3) Udbredelse af de teknologiske løsninger i den danske landbrugs- og energisektor vil kræve et omfattende forsknings-, udviklings- og implementeringsarbejde. Der er en bred palette af relevante aktører, der skal inddrages og udfordres på en konstruktiv og fremadskuende manér for at skabe en fælles forståelse – og realisering, af de potentialer, der kan ligge heri. Landmænd, forbrugere, landbrugsorganisationer, konsulenter, politikere på kommunalt, nationalt og internationalt niveau, anlægsproducenter og -operatører, olieraffinaderier, forskere og mange andre. Det er vigtigt at påbegynde denne proces tidligt i forløbet, da det er en tidskrævende opgave at implementere nicheudviklinger i veletablerede, og til tider fastlåste, systemer.

REFERENCER

- [1] Albrechtsen R, Mikkelsen MH, Gyldenkærne S. Danish emission inventories for Agriculture - Inventories 1985-2015. Denmark: 2017.
- [2] Kern S, Halwachs M, Kampichler G, Pfeifer C, Pröll T, Hofbauer H. Rotary kiln pyrolysis of straw and fermentation residues in a 3 MW pilot plant - Influence of pyrolysis temperature on pyrolysis product performance. *J Anal Appl Pyrolysis* 2012;97:1–10. doi:10.1016/j.jaap.2012.05.006.
- [3] Thomsen T, Hauggaard-nielsen H, Bruun EW, Ahrenfeldt J. The potential of Pyrolysis Technology in climate change mitigation-influence of process design and-parameters, simulated in SuperPro Designer Software. vol. 1764. Roskilde, Denmark: 2011.
- [4] Bruun S, Jensen ES, Jensen LS. Microbial mineralization and assimilation of black carbon: Dependency on degree of thermal alteration. *Org Geochem* 2008;39:839–45. doi:10.1016/j.orggeochem.2008.04.020.
- [5] Bruun S, El-Zahery T, Jensen L. Carbon sequestration with biochar - stability and effect on decomposition of soil organic matter. *Clim. Chang. Glob. Risks, Challenges Decis.*, n.d.
- [6] Holly MA, Larson R, Powell J, Ruark MD, Aguirre-Villegas H. Greenhouse gas and ammonia emissions from digested and separated dairy manure during storage and after land application. *Agric Ecosyst Environ* 2017;239:410–9. doi:10.1016/j.agee.2017.02.007.
- [7] Chadwick D, Sommer S, Thorman R, Fanguero D, Cardenas L, Amon B, Misselbrook T. Manure management: Implications for greenhouse gas emissions. *Anim Feed Sci Technol* 2011;166–167:514–31. doi:10.1016/j.anifeedsci.2011.04.036.
- [8] Zhu K, Christel W, Bruun S, Jensen L. The different effects of applying fresh, composted or charred manure on soil N sub(2)O emissions. *Soil Biol Biochem* 2014;74:61–9. doi:10.1016/j.soilbio.2014.02.020.
- [9] Olesen JE, Petersen SO, Lund P, Jørgensen U, Kristensen T, Elsgaard L, Sørensen P, Lassen J. Virkemidler til reduktion af klimagasser i landbruget. Tjele, Denmark: 2018.
- [10] Borchard N, Schirrmann M, Cayuela ML, Kammann C, Wrage-Mönnig N, Estavillo JM, Fuertes-Mendizábal T, Sigua G, Spokas K, et al. Biochar, soil and land-use interactions that reduce nitrate leaching and N2O emissions: A meta-analysis. *Sci Total Environ* 2019;651:2354–64. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.10.060.
- [11] Cayuela M, van Zwieten L, Singh B, Jeffery S, Roig A, Sanchez-Monedero MA. Biochar's role in mitigating soil nitrous oxide emissions: A review and meta-analysis. *Agric Ecosyst Environ* 2014;191:5–16. doi:10.1016/j.agee.2013.10.009.
- [12] Blanco-Canqui H. Biochar and Soil Physical Properties. *Soil Sci Soc Am J* 2017;81:687–711. doi:10.2136/sssaj2017.01.0017.
- [13] Bruun EW, Petersen CT, Hansen E, Holm JK, Hauggaard-Nielsen H. Biochar amendment to coarse sandy subsoil improves root growth and increases water retention. *Soil Use Manag* 2014;30:109–18. doi:10.1111/sum.12102.
- [14] Imperato V, Hansen V, Santos S, Nielsen T, Giagnoni L, Hauggaard-Nielsen H, Johansen A, Renella G, Winding A. Gasification biochar has limited effects on functional and structural diversity of soil microbial communities in a temperate agroecosystem. *Soil Biol Biochem* 2016;99:128–36. doi:10.1016/j.soilbio.2016.05.004.
- [15] Gaunt JL, Lehmann J. Energy Balance and Emissions Associated with Biochar Sequestration and Pyrolysis Bioenergy Production. *Environ Sci Technol* 2008;42:4152–8.

Appendiks 2.

- [16] Lehmann J, Rillig MC, Thies J, Masiello C a., Hockaday WC, Crowley D. Biochar effects on soil biota - A review. *Soil Biol Biochem* 2011;43:1812–36. doi:10.1016/j.soilbio.2011.04.022.
- [17] Hansen V, Hauggaard-Nielsen H, Petersen CT, Mikkelsen TN, Müller-Stöver D. Effects of gasification biochar on plant-available water capacity and plant growth in two contrasting soil types. *Soil Tillage Res* 2016;161:1–9. doi:10.1016/j.still.2016.03.002.
- [18] Godheja J, SK S, Siddiqui SA, DR M. Xenobiotic Compounds Present in Soil and Water: A Review on Remediation Strategies. *J Environ Anal Toxicol* 2016;6. doi:10.4172/2161-0525.1000392.
- [19] Thomsen TP, Ahrenfeldt J, Henriksen UB, Hauggaard-Nielsen H, Holm JK. Closing the Loop - Utilization of Secondary Resources by Low Temperature Thermal Gasification. Technical University of Denmark, 2016.
- [20] Kizito S, Wu S, Kipkemoi Kirui W, Lei M, Lu Q, Bah H, Dong R. Evaluation of slow pyrolyzed wood and rice husks biochar for adsorption of ammonium nitrogen from piggery manure anaerobic digestate slurry. *Sci Total Environ* 2015;505:102–12. doi:10.1016/j.scitotenv.2014.09.096.
- [21] Taghizadeh-Toosi A, Clough TJ, Sherlock RR, Condrón LM. A wood based low-temperature biochar captures NH₃-N generated from ruminant urine-N, retaining its bioavailability. *Plant Soil* 2012;353:73–84. doi:10.1007/s11104-011-1010-9.
- [22] Taghizadeh-Toosi A, Clough TJ, Sherlock RR, Condrón LM. Biochar adsorbed ammonia is bioavailable. *Plant Soil* 2012;350:57–69. doi:10.1007/s11104-011-0870-3.
- [23] Olesen JE. Miljø- og energimæssige gevinster ved afbrænding af fiberfraktionen eller den ubehandlede husdyrgødning. *Plantekongres 2006 - 251 Gødskning 2006*:92–3.
- [24] The European Commission. Communication from the Commission to the European Parliament, The Council, The European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions on the 2017 List of Critical Raw Materials for the EU. Brussels: 2017.
- [25] Klinglmair M, Lemming C, Jensen LS, Rechberger H, Astrup TF, Scheutz C. Phosphorus in Denmark: National and regional anthropogenic flows. *Resour Conserv Recycl* 2015. doi:10.1016/j.resconrec.2015.09.019.
- [26] Hansen V, Müller-Stöver D, Imperato V, Krogh PH, Jensen LS, Dolmer A, Hauggaard-Nielsen H. The effects of straw or straw-derived gasification biochar applications on soil quality and crop productivity: A farm case study. *J Environ Manage* 2017;186:88–95. doi:10.1016/j.jenvman.2016.10.041.
- [27] Buss W, Graham MC, Shepherd JG, Mašek O. Risks and benefits of marginal biomass-derived biochars for plant growth. *Sci Total Environ* 2016;569–570:496–506. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.06.129.
- [28] Christel W, Bruun S, Magid J, Kwapinski W, Jensen LS. Pig slurry acidification, separation technology and thermal conversion affect phosphorus availability in soil amended with the derived solid fractions, chars or ashes. *Plant Soil* 2016;401:93–107. doi:10.1007/s11104-015-2519-0.
- [29] Thomsen TP, Sárossy Z, Ahrenfeldt J, Henriksen UB, Frandsen FJ, Müller-Stöver DS. Changes imposed by pyrolysis, thermal gasification and incineration on composition and phosphorus fertilizer quality of municipal sewage sludge. *J Environ Manage* 2017;198:308–18. doi:10.1016/j.jenvman.2017.04.072.
- [30] Uchimiya M. Changes in Nutrient Content and Availability During the Slow Pyrolysis of Animal Wastes. In: He Z, Zhang H, editors. *Appl. Manure Nutr. Chem. Sustain. Agric. Environ.*, Dordrecht: Springer Netherlands; 2014, p. 53–68. doi:10.1007/978-94-017-8807-6_3.
- [31] Wu D, Xiao L, Ba Y, Wang H, Zhang A, Wu X, Niu M, Fang K. The recovery of energy, nitrogen and phosphorus from three agricultural wastes by pyrolysis. *Energy Procedia* 2017;105:1263–9. doi:10.1016/j.egypro.2017.03.445.
- [32] Meesuk S, Cao J, Sato K, Hoshino A. Nitrogen Conversion of Pig Compost during Pyrolysis. *J Chem Eng Japan* 2013;Advance Pu:1–7. doi:10.1252/jcej.12we262.

Appendiks 2.

- [33] Jensen E, Peoples M, Hauggaard-Nielsen H. Faba bean in cropping systems. *F Crop Res* 2010;115:203–16. doi:10.1016/j.fcr.2009.10.008.
- [34] Jensen E, Hauggaard-Nielsen H. How can increased use of biological N₂ fixation in agriculture benefit the environment? *Plant Soil* 2003;252:177–86. doi:10.1023/A:1024189029226.
- [35] Gylling M, Jørgensen U, Bentsen NS. + 10 mio. tons planen – muligheder for en øget dansk produktion af bæredygtig biomasse til bioraffinaderier. Frederiksberg, Danmark: 2012.
- [36] Thomsen TP, Ahrenfeldt J. Scenario based assessment of domestic biomass potential and technical application for energy production in Denmark – now and near future. Roskilde, Danmark: 2013.
- [37] Kern S, Halwachs M, Pröll T, Kampichler G, Hofbauer H. Rotary kiln pyrolysis - First results of a 3 MW pilot plant. 18th Eur. Biomass Conf. Exhib., ETA-Florence Renewable Energies; 2010, p. 950–5.
- [38] Hillestad M, Ostadi M, Alamo Serrano GD, Rytter E, Austbø B, Pharoah JG, Burheim OS. Improving carbon efficiency and profitability of the biomass to liquid process with hydrogen from renewable power. *Fuel* 2018;234:1431–51. doi:10.1016/j.fuel.2018.08.004.
- [39] Jahirul MI, Rasul MG, Chowdhury AA, Ashwath N. Biofuels production through biomass pyrolysis- A technological review. *Energies* 2012;5:4952–5001. doi:10.3390/en5124952.
- [40] Mortensen PM, Grunwaldt JD, Jensen P a., Knudsen KG, Jensen a. D. A review of catalytic upgrading of bio-oil to engine fuels. *Appl Catal A Gen* 2011;407:1–19. doi:10.1016/j.apcata.2011.08.046.
- [41] Veses a., Puértolas B, Callén MS, García T. Catalytic upgrading of biomass derived pyrolysis vapors over metal-loaded ZSM-5 zeolites: Effect of different metal cations on the bio-oil final properties. *Microporous Mesoporous Mater* 2015;209:189–96. doi:10.1016/j.micromeso.2015.01.012.
- [42] Chang CC, Wu SR, Lin CC, Wan HP, Lee HT. Fast pyrolysis of biomass in pyrolysis gas: Fractionation of pyrolysis vapors using a spray of bio-oil. *Energy and Fuels* 2012;26:2962–7. doi:10.1021/ef201858h.