

SkyClean

PYROLYSE AF HALM OG NEDMULDNING AF
BIOKUL SOM KLIMAVIRKEMIDDEL



December 2020



Ea Energianalyse

Udarbejdet af:

Ea Energianalyse
Gammeltorv 8, 6. tv.
1457 København K
T: 60 39 17 16
E-mail: info@eaea.dk
Web: www.eaea.dk

Indhold

1	Baggrund og opsamling.....	4
1.1	Halmpyrolyse SkyClean.....	4
1.2	Hovedresultater og konklusioner	5
2	Teknologibeskrivelse	8
2.1	Masse og energibalance	10
3	Økonomi	12
3.1	CAPEX.....	12
3.2	OPEX	12
3.3	Halmprisen.....	13
3.4	Opsummering af vigtigste beregningsforudsætninger.....	13
4	Halmanvendelse og kulstofkredsløb.....	15
4.1	Nedmuldning af halm	17
4.2	Forbrænding af halm	18
4.3	Halm i biogasproduktion	18
4.4	Halm i SkyClean-anlæg	19
5	Produkterne	21
5.1	Gas- og oliefraktionerne	21
5.2	Værdien af olie	23
6	Beregningsresultater og følsomheder.....	26
6.1	Samfundsøkonomiske produktionsomkostninger	26
6.2	Følsomheder.....	29
6.3	Anlæg 1.....	30
6.4	Sammenligning med halm til biogas.....	31
7	Referencer	34

1 Baggrund og opsamling

EU og en række medlemslande har vedtaget ambitiøse klimamålsætninger for 2030 og 2050 for at leve op til Parisaftalen. I Danmark er målet 70% reduktion af klimagasser i 2030 sammenlignet med 1990 og klimaneutralitet i 2050. EU-kommissionen har peget på, at en intensiv elektrificering i kombination med energieffektivisering og en vis grad af kulstoflagring er nødvendige virkemidler for at nå målet i 2050.

Det danske Klimaråd peger i rapporten "Kendte veje og nye spor til 70 procents reduktion" fra marts 2020 på, at der skal nye teknologier til for at nå hele vejen til 70% i 2030. Forskellige teknologier til kulstoflagring, herunder pyrolyse til biokul og produktion af brændsler udgør over halvdelen af det samlede reduktionspotentiale i udviklingssporet.

Selvom biomasse ved afbrænding er klimaneutralt i henhold til FN's opgørelsesmetoder, er der stigende fokus på udfordringerne ved at øge biomasseanvendelsen til energiformål. Udfordringerne er dels knaphed på bæredygtige biomasseressourcer, dels usikkerhed om tidsperspektivet for CO₂¹-gevinsten. Kritikere peger på, at klimagevinsten i en årrække ligefrem kan være negativ når visse typer biomasse erstatter fossile brændsler.

I de fleste danske og udenlandske reduktionsscenarier, udgør tung transport, flytransport, skibsfart, landbrug og dele af den energiintensive industri de største udfordringer for at nå målene. CO₂-reduktionsomkostningerne kan endvidere være betydelige.

Fx arbejdes der i IEA's World Energy Outlook med en marginal CO₂ fortrængningsomkostning over 2000 kr./ton CO₂, hvilket også er tilfældet i baggrundsberegninger til anbefalingerne fra flere af regeringens klimapartnerskaber. Klimarådet peger i "Kendte veje og nye spor til 70 procents reduktion" på en generel drivhusgasafgift på 1500 kr./ton CO₂ som et effektivt, men ikke tilstrækkeligt virkemiddel til at nå 70% målet.

1.1 Halmpyrolyse SkyClean

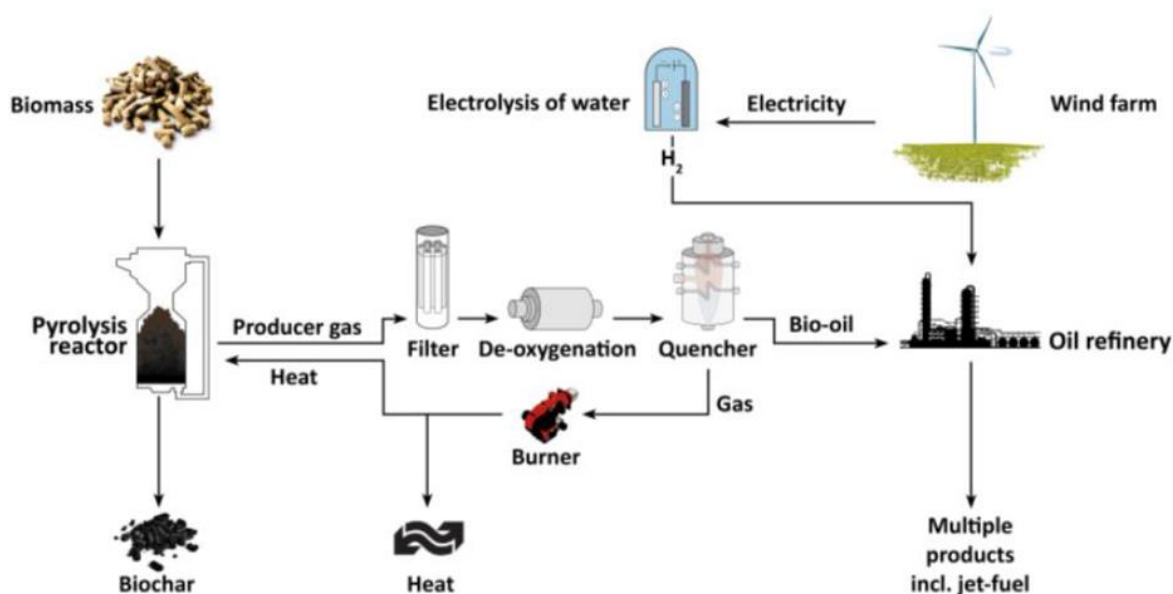
Ved teknologien omsættes biomasse til biokul, gas og olie. Biomasse i form af halmpiller eller anden biomasse opvarmes i en reaktor til 500-600 grader, hvorved der sker en omsætning til biokul, gas og olie. Biokul kan tilføres landbrugsjord som jordforbedringsmiddel og som kulstoflagring, og gas og olie kan viderebehandles

¹ I dette notat betyder "CO₂" som hovedregel "CO₂ ækvivalenter".

eller anvendes direkte som vedvarende energi (VE) brændstoffer, alt efter kvalitet (se Figur 1).

SkyClean-teknologien kan altså potentielt bidrage til at løse fire betydelige udfordringer i den grønne omstilling i transportsektoren og landbruget ved at:

- Leverer kulstoflagring.
- Leverer CO₂ neutralt flydende brændstof til tung transport, der også kan videreforarbejdes til flybrændstof.
- Leverer CO₂ neutral syngas, der kan anvendes i energi- eller industrisektoren eller videreforarbejdes til fx PtX metanol.
- Effektivt nyttiggøre halm i energisektoren og samtidig bidrage til jordforbedring ved at øge kulstofindholdet i jorden



Figur 1. Illustration af en af flere mulige konfigurationer af SkyClean-processen. Kilde: Stiesdahl Fuel Technologies 2020.

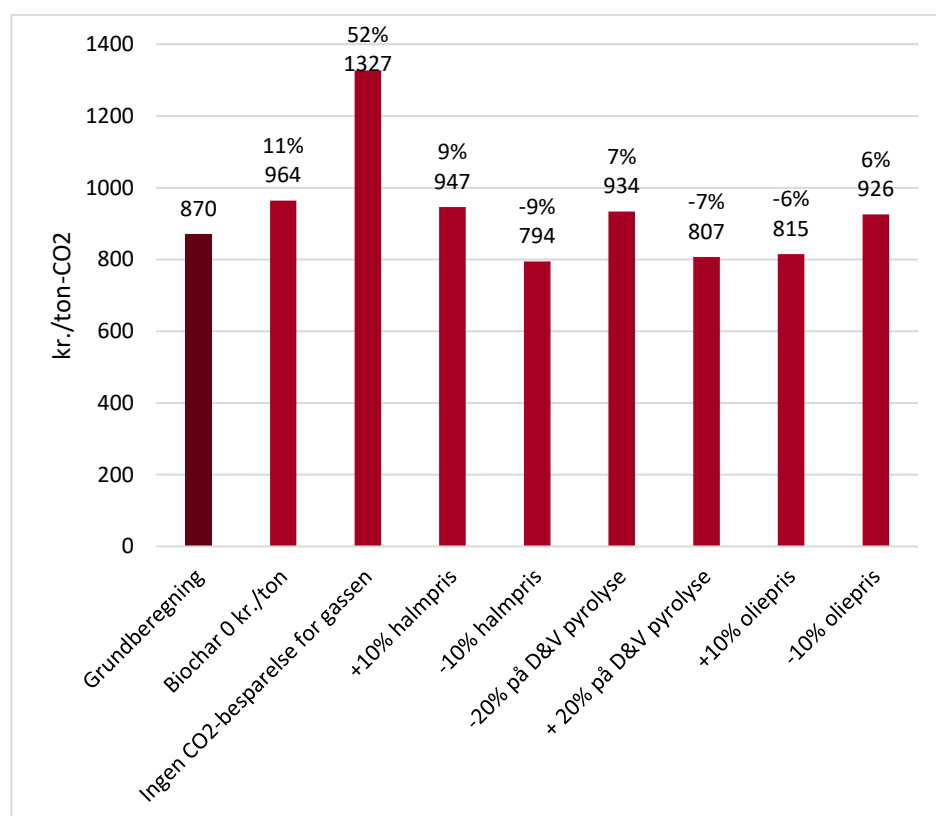
Ved at anvende halm eller andre restprodukter, og ved at tilbageføre biokul til jorden, imødegås en væsentlig del af kritikken mod at anvende biomasse i energisektoren.

1.2 Hovedresultater og konklusioner

Der er i analysen gennemført en beregning af den samlede CO₂-fortrængningsomkostning ved teknologien. Værdien af grøn omstilling kan dog være forskellig i forskellige sektorer i samfundet. Fx kan der værre større værdi ved grøn omstilling i transportsektoren end i elsektoren. Derfor er der som supplement

gennemført en beregning af omkostningerne ved at lagre CO₂ som biokul under forudsætning af, at den producerede olie fortrænger 2. generations biodiesel. Det kan fremføres, at den reelle samfundsnytte ligger et sted imellem disse to yderpunkter for værdisætning af SkyClean produkterne.

Teknologien planlægges etableret i anlæg der modtager ca. 4,4 ton halm per time, ca. 40.000 tons halm/år. Et turnkey anlæg ventes at kunne etableres til ca. 112 mio. kr. Pyrolyseprocessen ændrer 100% halm til ca. 42% biokul, 23% VE-olie og 34% VE-gas.



Figur 2. Samlet CO₂ fortrængningsomkostning ved SkyClean på halmpiller (anlæg 5) og følsomheder af centrale inputparametre.

- Teknologien vurderes at kunne levere CO₂ reduktion til ca. 870 kr./ton i de vanskelige landbrugs- og transportsektorer. Uden indregning af jordforbedrende virkning for biokul på 300 kr./ton biokul er omkostningen knap 960 kr./ton CO₂.
- Beregningerne er betinget af, at gassen nyttiggøres ved fortrængning af fossile brændsler, fx naturgas. Det kan være udfordrende at finde lokaliteter hvor det er muligt, på den anden side af 2030.
- Såfremt der er et marked for VE-olien i transportsektoren, og til samme priser som forventede produktionsomkostninger for 2. generations

biodiesel, og gassen fortrænger CO₂, kan biokul lagre CO₂ til en omkostning på ca. 480 kr./ton CO₂.

Udfordringerne for teknologiens økonomi kan især ligge i den kommercielle prissætning af produkterne, indtil der er skabt overensstemmelse mellem de samfundsøkonomiske omkostninger ved grøn omstilling og kommerciel prissætning af løsningerne.

Biokul: Har med udgangspunkt i klimarådets rapport en samfundsøkonomisk værdi på ca. 1500 kr./ton CO₂ (3200 kr./ton koks). Der er dog endnu ikke nogen veludviklet kommerciel prissætning på biokul som kulstoflager i Danmark.

Bioolie: I det omfang bioolien bruges til vejtransport, medfører iblandingskravet en prissætning med biobrændstof som reference. Prissætningen kunne opnås gennem certifikater/biotickets som det sker for biogas.

Pyrolysegas: Pyrolysegassen kan afbrændes og fortrænge olie eller gas. Ved anvendelse til rumvarme, kan der endvidere spares afgifter. Det kan dog være udfordrende at finde lokaliteter med et konstant forbrug af olie/gas til rumvarme på 5-7 MW, hvor gassen kan nyttiggøres. Ved nyttiggørelse i større fjernvarmeområder er en opnåelig pris måske 60 kr./GJ.

2 Teknologibeskrivelse

SkyClean-teknologien er en pyrolyseproces, hvorved der dannes biokul, olie og gas. SkyClean-anlægget er en integreret halmpillefabrik og pyrolyseanlæg, hvor den tilførte halm omdannes til halmpiller og indføres i pyrolysereaktoren. I pyrolysereaktoren opvarmes halmpillerne til 500-600 °C, hvor en del omdannes til pyrolysegas og den resterende del forkuller til biokul med et højt kulstofindhold. Pyrolysegassen køles og omdannes til en gas- og en oliefraktion.

Stiesdal Fuel Technologies arbejder lige nu på at igangsætte et demonstrationsanlæg på 2 MW-indfødet effekt. Erfaringerne fra dette anlæg skal bruges til at bygge det første større anlæg med en indfødet kapacitet på ca. 20 MW.

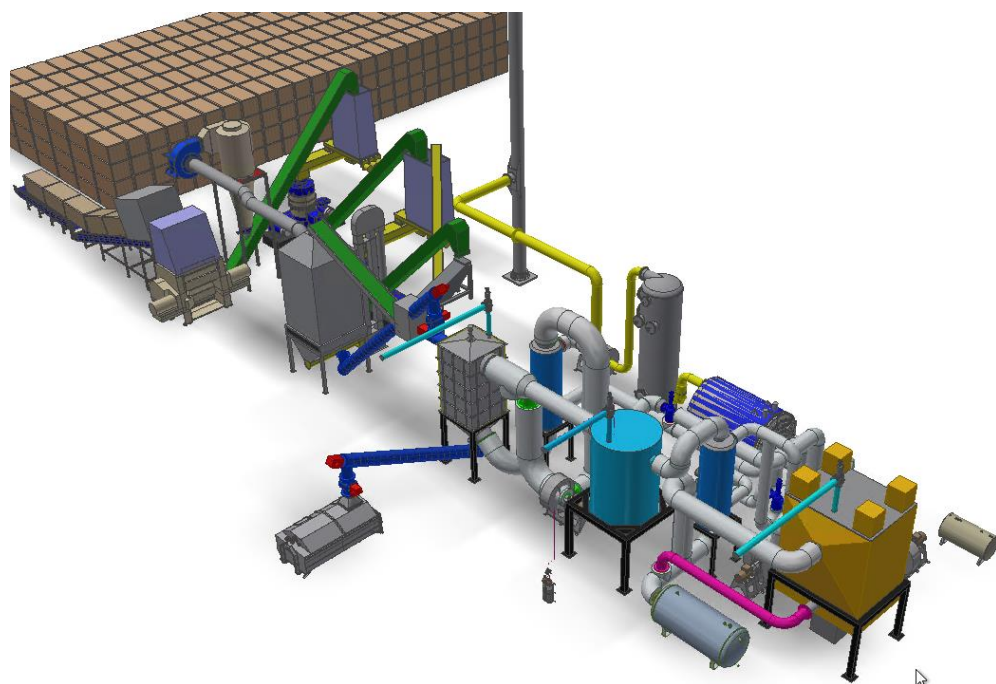
Anlægskonfigurationen til det første større anlæg er vist i Figur 4, Figur 4 og Figur 5. Der er en forventning om, at SkyClean-anlæggene kan udbygges i større skala med mange anlæg. Derfor regnes der både på anlæg 1 (det første større anlæg) og et senere anlæg betegnet som anlæg 5, hvor omkostningerne ventes reduceret pga. erfaringsopbygning, effektivisering mm.

Her følger en kort opsummering af input for SkyClean-teknologien, som danner baggrund for de samfundsøkonomiske beregninger. Det omfatter:

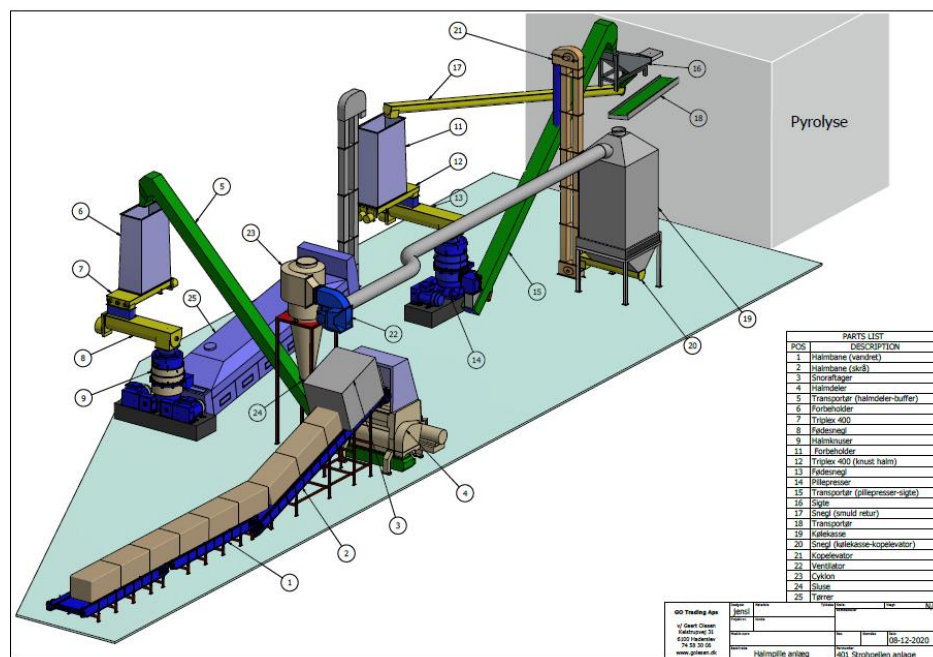
- Masse- og energibalance
- CAPEX og OPEX-estimer
- Halmprisen



Figur 3. 3D skitse af SkyClean-anlægget udefra. Kilde: Stiesdal Fuel Technologies, Frecon



Figur 4. Skitse af SkyClean-anlægget inkl. halmlager. Kilde: Stiesdal A/S



Figur 5.3D skitse af halmpilleanlægget. Kilde: Stiesdal Fuel Technologies

2.1 Masse og energibalance

Masse- og energibalancen er udarbejdet af COWI baseret på informationer om processen samt målinger på olie- og gasfraktionerne udarbejdet af DTU. Resultatet af denne masse-, energi- og kulstofbalance er vist nedenfor for halmpiller med et vandindhold på 9%.

	Massebalance		Energibalance		Kulstofbalance	
	kg		GJ		Kg C/ton halm	
Halmpiller	1000	100%	16,4	100%	420	
Biokul	300	30%	6,7	41,1%	178	42%
Olie	140	14%	4,6	28,4%	98	23%
Gas	560	56%	5,0	30,6%	144	34%

Tabel 1. Masse-, energi- og kulstofbalance ved omsætning af 1 ton halm (inkl. 9% vand) i SkyCleans anlæg 1. Energibalancen er angivet for øvre brændværdi inkl. vand og aske. Der ikke indregnet tilførsel af vand i processen i balancen. Al vanddamp ender i gassen. Kilde: COWI og DTU

På baggrund af masse- og energibalancen er der her regnet på, hvor meget der produceres årligt fra et anlæg på 20 MW indfødte (øvre brændværdi). Vanddamp ventes at indgå i gasfraktionen.

	Enhed	20 MW anlæg
Kapacitet	tons/time	4,4
Kapacitet (HHV)	MW-ind	20,0
Fuldlasttimer	Time	8.000
Halmpilleforbrug	tons	35.080
Biokul	tons	10.380
Olie	tons	4.910
Gas	tons	19.790
Heraf eget forbrug	tons	6.470
Halmpilleforbrug	TJ	576
Biokul	TJ	237
Olie	TJ	164
Gas	TJ	176
Heraf eget forbrug	TJ	58

Tabel 2. Input-output fra 20 MW SkyClean-anlæg. Bemærk der regnes i øvre brændværdi

3 Økonomi

3.1 CAPEX

Stiesdal Fuel Technologies har med input fra Dall Energy, COWI og Kahl fået udarbejdet et samlet CAPEX-estimat for anlægget inkl. halmpillefabrik, halmlager, pyrolyseanlæg, bygninger, veje, infrastruktur mm. Dall Energy har leveret et estimat for selve procesanlægget inkl. instrumenter, maskiner, montering, installation mm. på 59,2 mio. kr. for det første anlæg (anlæg 1). Dertil har COWI udarbejdet et prisestimat for omkostninger til bygninger, veje mm. på ca. 57,4 mio. kr. Kahl og COWI har udarbejdet et estimat for halmpilleanlæg inkl. halmlager og tørring på 18,5 mio. kr. Samlet set giver det et CAPEX-estimat på 130,9 mio. kr. for anlæg 1 og 111,7 mio. kr. for det såkaldte anlæg 5².

	Anlæg 1	Anlæg 5
Pyrolyseanlæg (Dall Energy)	59,2	43,7
Halmpilleanlæg (Kahl)	18,5	18,5
Vej og bygninger (COWI)	53,2	49,5
Total	130,9	111,7

Tabel 3. CAPEX-estimat for anlæg 1 og anlæg 5. For anlæg 5 er kun total angivet på baggrund af informationer fra Stiesdal Fuel Technologies, COWI, Kahl og Dall Energy

Stiesdal Fuel Technologies forventer, at CAPEX på anlæggene kan reduceres markant, når teknologien udbredes og i højere grad etableres som standardanlæg. CAPEX for anlæg 5 vurderes reduceret med ca. 15% baseret på prisestimer fra COWI, Kahl og Dall Energy.

3.2 OPEX

Stiesdal Fuel Technologies har vurderet de samlede drift- og vedligeholdelsesomkostninger ved SkyClean-anlægget både for pyrolyseanlægget og for halmpilleanlægget. Estimatet baserer sig på håndteringsomkostningerne ved halmpiller i pyrolysen, som er udregnet på baggrund af information fra Ørnghøj Varmeværk. Håndteringsomkostningerne for biokullet er baseret på data fra Bredal A/S. Drifts- og vedligeholdelsesomkostninger (D&V) ved halmpilledelen af anlægget er vurderet af COWI baseret på input fra Jysk Tørreindustri og Kahl. De samlede D&V omkostninger er udregnet til 302 kr./ton halm for pyrolysedelen.

² Økonomien for anlæg 5 er baseret på erfaringsmæssig læring ved ny teknologi, der i et vist omfang kan standardiseres.

	Enhed	Omkostning
D&V	kr./t-halm	185
Bemanding	kr./t-halm	95
Oplagring	kr./t-koks	18
Transport	kr./t-koks	30
Udbringning på mark	kr./t-koks	24
Total	kr./t-halm	302

Tabel 4. Drift- og vedligeholdelsesomkostninger ved pyrolyseanlægget i SkyClean. Kilde: Stiesdal Fuel Technologies

D&V-omkostninger for halmpilleanlægget er udover omkostningerne til halm udregnet til 282 kr./ton halm baseret på informationer fra Kahl og COWI. Der er i beregningerne antaget, at halm har et gennemsnitligt fugtindhold på 14%, som reduceres til 9% i halmpilleprocessen.

	Enhed	Omkostning
Produktionsafhængige omkostninger	kr./t-halm	154
Bemanding	kr./t-halm	95
Kapacitetsomkostning	kr./t-koks	33
Total	kr./t-halm	282

Tabel 5. Drift- og vedligeholdelsesomkostninger ved pyrolyseanlægget i SkyClean. Kilde: Stiesdal Fuel Technologies baseret på Kahl og COWI

3.3 Halmprisen

SkyClean-anlægget er et integreret anlæg inklusive omdannelsen af halmballer til halmpiller. Der anvendes Energistyrelsens samfundsøkonomiske brændselsprisforudsætninger for halmprisen. I 2020 er prisen ca. 44 kr./GJ svarende til 634 kr./ton. Prisen stiger svagt frem mod 2040 til 49 kr./GJ svarende til 716 kr./ton.

3.4 Opsummering af vigtigste beregningsforudsætninger

Nedenfor er de vigtigste beregningsforudsætninger for de samfundsøkonomiske beregninger. Der regnes i faste 2020-priser.

	Enhed	Værdi
Kapacitet anlæg 1 + anlæg 5	MW-ind	20
Samfundsøkonomisk rente	%	4
CAPEX anlæg 1	Mio. kr.	131
CAPEX anlæg 5	Mio. kr.	112
OPEX pyrolyse	kr./ton-halm	302
OPEX halmpilleanlæg	kr./ton-halm	282
Halmpri 2020	kr./ton	634
Halmpri 2030	kr./ton	684
Halmpri 2040	kr./ton	716
Varmepri	kr./GJ	60
Gødnings-/jordforbedringsværdi biokul	kr./ton	300
Råoliepri 2020	kr./GJ	95
Råoliepri 2030	kr./GJ	113
Råoliepri 2040	kr./GJ	128

Tabel 6. Hovedforudsætninger for samfundsøkonomiske beregninger for SkyClean anlæg 1 og anlæg 5. Når der ikke er angivet et anlæg, er forudsætningen gældende for både anlæg 1 og anlæg 5

4 Halmanvendelse og kulstofkredsløb

Klimaaftrykket fra SkyCleans teknologi er helt centralt for at vurdere, om SkyClean-teknologien er interessant at satse på til fremtidig CO₂-lagring og til olie- og gasproduktion. Med vedtagelsen af klimaloven er der kommet fokus på kulstofindholdet i jorden, og derfor er det vigtigt at CO₂-fortrængningsværdien beregnes ud fra et samlet klimaaftryk inkl. påvirkningen af kulstofindholdet i jordene.

Mio. kg	Halm i alt	Til fyring	Til foder	Til strøelse mv.	Ikke bjerget
Korn i alt	5.554	1.740	606	1.081	2.127

Tabel 7. Det danske halmudbytte 2019. Kilde: Statistikbanken

Som det ses i ovenstående tabel, var den danske halmproduktion i 2019 ca. 5,5 mio. tons, hvoraf godt 2 mio. tons ikke bjerger (nedmuldes). 1,7 mio. tons anvendes til energiformål, størstedelen til halmfyring. Energistyrelsen har oplyst³, at en stigende del af energihalmen tilføres biogasanlæg. Ca. 600.000 tons anvendes til foder.

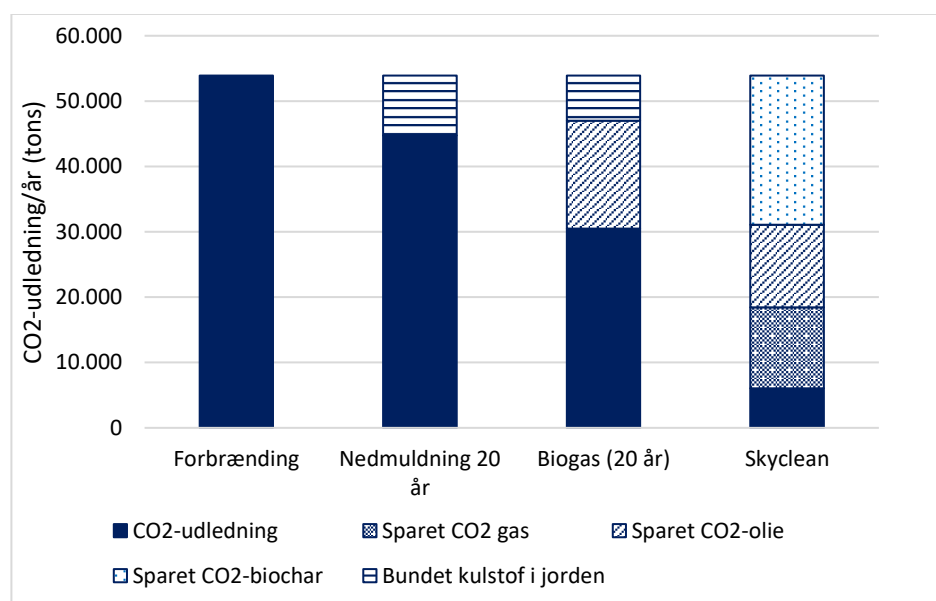
CO₂-kredsløbet fra øvrige halmanvendelser er afgørende for SkyCleans CO₂-aftryk som en alternativ anvendelse af halmen.

Vi sammenligner her CO₂-aftrykket ved fire forskellige anvendelser for halm:

- Nedmuldning på landbrugsjorde
- Forbrænding til el og fjernvarme
- Input til biogasproduktion
- Skyclean-teknologi

Det samlede resultat af CO₂-udledningen ved de forskellige halmanvendelser er vist i figuren nedenfor for et årligt halmpilleforbrug på 35.000 tons svarende til SkyClean-anlæg 1's årlige forventede forbrug.

³ Telefonkontakt med Søren Tafdrup



Figur 6. CO₂-udledning ved udvalgte halmanvendelser. Bemærk 'Bundet kulstof i jorden' er omregnet til en sparet CO₂-udledning. Kilde: Egne beregninger

Ved forbrænding omdannes al kulstof til CO₂. 35.000 tons halmpiller udleder ved forbrænding ca. 54.000 tons CO₂.

Ved nedmuldning vil kulstoffet over tid omdannes til CO₂, men mindre del er tungt nedbrydeligt og vil derfor være bundet i jorden over længere tid. Efter 20 år er ca. 17% fortsat bundet i jorden, ifølge den anvendte modelsimulering af hvordan organisk bundet kulstof i leret markjord mineraliseres og danner CO₂. Dette er en partiel betragtning, hvor alene kulstoffet i halm betragtes, da det er halmens anvendelse, der ændres, hvis den bruges i SkyCleans anlæg. Kulstofindholdet i jorden er generelt faldende pga. dyrkningssystemet med gentagende jordbearbejdning. Den anvendte model for omsætning af kulstof i jorden fremgår af Figur 7.

Ved biogas fortrænger den producerede metan fossilt gas (naturgas), mens en stor del af kulstoffet omdannes til CO₂ enten direkte i reaktoren eller ved tilbageførsel på marken. Efter ca. 20 år vil der fortsat være ca. 13% af kulstoffet tilbage i jorden efter tilbageførsel til jorden som biogas-digestat.⁴

I Skyclean-anlægget bindes ca. 42% af kulstoffet i halmen i biokul, som antages ikke at udlede CO₂. Det er en grundforudsætning, at olie- og gasfraktionerne fortrænger fossile brændstoffer. Den lille mængde udledt CO₂ kommer fra egetforbruget.

⁴ Det er anført, at en del af kulstoftabet ved nedmuldning af digestat er i form af metan, hvilket ikke gælder ved direkte nedmuldning af halm. Dette er ikke undersøgt videre og inddraget i denne analyse.

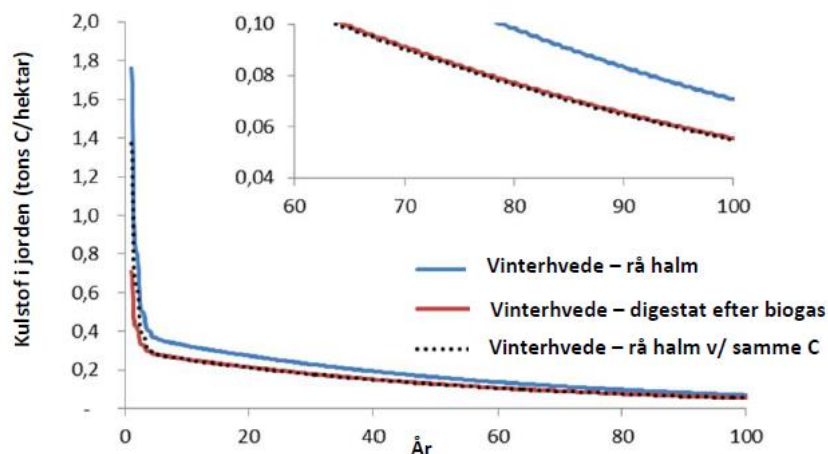
Herunder følger en gennemgang af CO₂-aftrykket ved de forskellige anvendelser.

4.1 Nedmuldning af halm

Langt størstedelen af de danske halmressourcer tilbageføres i dag til marken og nedpløjes. Markjordens indhold af organisk stof er væsentlig for dens frugtbarhed, og derfor kan det være et formål i sig selv at opretholde et tilstrækkeligt højt kulstofindhold i landbrugsjord på langt sigt.

En stor del af den danske halm bliver i dag nedpløjet og dermed tilbageført til markerne. Ved nedmuldning af rå halm nedbrydes størstedelen af det organiske stof over kort tid, men en svært nedbrydelig del forbliver i jorden som stabiliseret organisk materiale på længere sigt.

Omsætning af organisk bundet kulstof i jorden er svær at kvantificere og afhænger af en række forhold herunder jordtype, afgrøder mm. Til dette arbejde anvendes omsætningskurve for halmbundet kulstof i leret markjord – før og efter udrådning i et biogasanlæg, fra en modelsimulering udført af SDU ved hjælp af Aarhus Universitets C-tool model.



Figur 7. Modellerende af markjordens kulstofindhold i markjord af en mængde halm i år 1. Modellen viser udviklingen af kulstof i jorden fra den initialt nedmuldede mængde for en enkelt mark et enkelt år. Modellen bygger på værktøjet C-TOOL udviklet af Aarhus Universitet, Foulum

Kulstofindholdet i jorden nedbrydes hurtigt de første år: Baseret på ovenstående figur vil ca. 50% af kulstoffet (baseret på vægt) nedbrydes og blive omdannet til CO₂ det første år. Efter 5 år er ca. 80% af kulstoffet i jorden nedbrudt og omdannet til CO₂. Herefter går nedbrydningen af kulstoffet noget langsommere. Efter 20 år er der fortsat ca. 17% af kulstoffet tilbage i jorden.

1 ton nedmuldet halm er efter 20 år omdannet til 1,28 tons CO₂.

4.2 Forbrænding af halm

I dag forbrændes ca. 1 mio. tons halm til el- og fjernvarme produktion. Ved forbrænding af halm fjernes al kulstof i halmen fra landbrugsjorden og konverteres ved forbrænding til CO₂. 1 ton halm omdannes derfor til 1,54 tons CO₂ ved forbrænding.

4.3 Halm i biogasproduktion

Det primære input til biogasanlæggene er i dag gylle fra husdyrhold, men der er stigende fokus på at udnytte andre typer af biomasse herunder industriaffald, organisk affald og halm. Derudover produceres der i dag også i mindre omfang biogas fra spildevandsslam og fra deponi.

Til at producere 1 GJ biogas skal der i dag bruges ca. 1,35 tons husdyrgødning. Når der tilføjes halm til et biogasanlæg, øges de samlede omkostninger, men udbyttet stiger samtidig betydeligt. Det er antaget her, at ca. 55% af energien i 1 ton halm omsættes til biogas. Dvs. 1 ton halm producerer ca. 8 GJ biogas.

Selvom 55% af energien omdannes til metan er det kun 31% af kulstoffet i halmen, der omdannes til metan. Ved afbrænding af biogas omdannes metanen til CO₂, men fordi det direkte fortrænger fossilt naturgas i gasnettet indregnes denne CO₂-mængde som en besparelse. Det skal bemærkes, at gasforbruget i Danmark ventes at falde. På et tidspunkt – sandsynligvis mellem 2030 og 2040 – vil biogassen skulle eksporteres eller omdannes til fx metanol for fortsat at kunne fortrænge fossile brændsler.

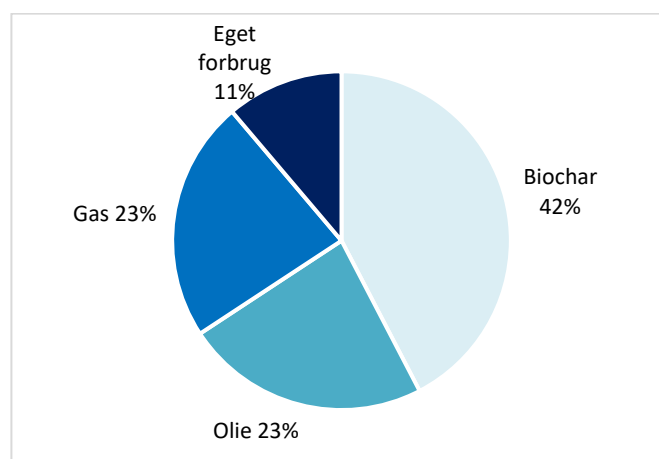
Udover de 31% af kulstoffet, som omdannes til metan, omdannes der 27% til CO₂ som beregningsmæssigt udledes til atmosfæren. De resterende 42% af halmens kulstof tilbageføres marken som digestat. Ligesom ved nedmuldning, vil kulstoffet degradere over tid. Kulstofindholdet i jorden fra biogas-digestat følger den røde kurve i Figur 7. Efter 20 år er ca. 87% af kulstoffet omdannet til CO₂. Nedenfor er den sparede CO₂-udledning illustreret baseret på fordelingen af kulstof sammenlignet med nedmuldning af halm.

	Kulstof	Sparet CO ₂
1 ton halm	420 kg (100%)	-
Metan	129 kg (31%)	473 kg
CO ₂ -dannelse i biogasreaktor	114 kg (27%)	
Tilbageførsel til mark	177 kg (42%)	
<i>Heraf degraderet efter 20 år</i>	<i>122 kg (29%)</i>	
<i>Heraf forblevet i jorden 20 år</i>	<i>55 kg (13%)</i>	202 kg
Nedmuldning 20 år		
<i>Heraf degraderet efter 20 år</i>	<i>349 kg (83%)</i>	
<i>Heraf forblevet i jorden 20 år</i>	<i>71 kg (17%)</i>	260 kg
Netto sparet CO₂	113 kg	415 kg

Tabel 8. Fordelingen af kulstof efter 1 ton halm er tilført biogasanlæg og sparet CO₂-udledning ved biogasproduktion fra 1 ton halm. Bemærk: Der er ikke indregnet klimaeffekten af metan og lattergas emissioner ved, at halm tilføres biogasanlægget.

4.4 Halm i SkyClean-anlæg

Ved SkyClean-teknologien omdannes størstedelen af kulstoffet til biokul (42%), mens 23% af kulstoffet indgår i oliefraktionen. De resterende 34% er i gasfraktionen, hvoraf 11%-point af kulstoffet bruges til eget forbrug.



Figur 8. Fordeling af kulstoffet fra SkyClean-processen. Kilde: Baseret på DTU og COWI

Som beskrevet er det en grundforudsætning, at både oliefraktionen og gasfraktionen vil fortrænge fossile brændstoffer. Olie antages at fortrænge råolie i udgangspunktet, som betyder, at der i sidste ende bruges mindre fossil olie. Derfor vil al kulstofindholdet i olien give en CO₂-besparelsen.

Gasfraktionen er lidt mere usikker. I udgangspunktet regner Stiesdal med, at gassen bruges til at producere fjernvarme. På kort sigt kan man argumentere for, at der kan være en CO₂-besparelse afhængigt af hvilket fjernvarmesystem, anlægget tilsluttes. Frem mod 2030 er forventningen imidlertid, at fjernvarme produceres på VE-kilder ved fx varmepumper eller anden biomasse. Fra 2030 og frem er det derfor svært at argumentere for, at forbrænding af syngassen til fjernvarme vil medføre en CO₂-besparelse. Det er derfor helt afgørende, at gassen på længere sigt ikke bruges til fjernvarme, men til andet formål, som kan fortrænge CO₂. Det kan fx være til højtemperatur-processer i industrien eller ved forædling, hvor det enten omdannes til andre kulbrinter fx metanol eller metan. I beregningerne indregnes en varmepris for gassen (ikke til eget forbrug), hvilket er en forsimpning. Hvis gassen videreraffineres, kan den sandsynligvis indgå i markeder med en højere værdi. På den anden side vil videreraffinering kræve ekstra omkostninger. Et forsimplet estimat er derfor at fastholde varmeprisen.

Egetforbruget vil medføre en CO₂-udledning, som ikke kan indregnes som en besparelse.

5 Produkterne

Pyrolyseret biokul kan lagre kulstof og dermed bidrage til at reducere det danske klimaaftryk. Derudover kan biokul, når det tilføjes landbrugsjord, medvirke til jordforbedring og give en øget gødningsværdi sammenlignet med at fjerne halm fra markerne.

Ved pyrolysen bindes ca. halvdelen af kulstoffet fra afgrøderester og organiske gødningsfraktioner. Bl.a. pga. biokullets kemiske struktur er det meget svært for mikroorganismer i jorden at mineralisere dette kulstof. Ifølge DTU-forskere kan biokul lagre kulstof i 500 år. Derved kan man trække CO₂ ud af atmosfæren, når fx korn og græs optager CO₂ fra luften via fotosyntese, og dermed kan der akkumuleres kulstof i jorden.

En af udfordringerne med at tilbageføre biokul til jorden er potentielle risici forbundet med biokullets mulige indhold af skadelige stoffer herunder kræftfremkaldende tjærestoffer/ PAH'er (polycykliske aromatiske hydrocarboner). Indholdet af skadelige stoffer afhænger af produktionsprocessen og udgangsmaterialet, og for at biokullet kan udbringes på marken, skal den overholde retningslinjerne i bioaskebekendtgørelsen. Grænseværdierne herfra er vist nedenfor.

Tungmetal	Grænseværdi (mg pr. kg tørstof)
Kviksølv	0,8
Bly	120 250 træaske anvendt i skovbrug
Nikkel	60
Chrom	100
Cadmium	5 halmaske 20 træaske 5 blandet halm- og træaske

Tabel 9. Grænseværdier for biokul ifølge bioaskebekendtgørelsens bilag 2

Dertil skal også nævnes en begrænsning på PAH'er på 12 mg pr. kg tørstof samlet set.

5.1 Gas- og oliefraktionerne

Pyrolysegas

Gassen består af et miks af flere korte kulbrinte-kæder samt CO₂, CO, brint og kvælstof. DTU lavede i februar 2020 målinger på gassen i en langsom pyrolyseproces ved 600 °C. Målingerne er her brugt som indikation på indholdet i gasfraktionen på SkyCleans anlæg, selvom det kan afvige, da processen ikke er helt den samme. Gassens sammensætning fremgår nedenfor. Her ses, at gassen indeholder 12%-14%

metan, 36%-41% CO₂, 9%-15% kvælstof, 17%-20% CO og 9%-15% brint samt en række mindre andele af korte kulbrintekæder.

gas composition (as measured)						
	RAW_0-30 min	CAT_0-30min	RAW_30-60 min	CAT_30-60min	CAT_60-75 min	CAT_60-75min
C6+	0.02	0.0	0.05	0.0	0.04	0.0
Methane	13.80	13.6	13.75	13.7	12.97	12.9
Ethane	2.37	2.4	2.38	2.4	2.23	2.2
Ethene	1.22	1.3	1.10	1.2	0.95	1.0
Propane	0.49	0.5	0.52	0.5	0.49	0.5
Propene	0.79	0.9	0.77	0.8	0.69	0.8
n-Butane	0.07	0.1	0.08	0.1	0.08	0.1
trans-2-Butene	0.07	0.1	0.08	0.1	0.07	0.1
1-Butene	0.12	0.1	0.12	0.1	0.11	0.1
Iso-butylene	0.08	0.1	0.08	0.1	0.08	0.1
cis-2-Butene	0.06	0.1	0.07	0.1	0.06	0.1
CO ₂	41.10	40.6	40.30	40.0	37.58	36.5
Nitrogen	10.4	9.6	10.3	9.6	15.2	13.6
CO	20.06	19.5	19.61	19.4	17.99	17.7
Hydrogen	9.36	11.3	10.74	11.9	11.45	14.5

Tabel 10. Gassens komposition baseret på DTUs målinger fra februar 2020. Kilde: *Slow Pyrolysis of wheat straw coupled to catalytic vapor upgrading with Na-Al₂O₃*

Gassen bruges dels til intern opvarmning af processen og dels til produktion af fjernvarme. Det er som tidligere beskrevet afgørende, at gassen fortrænger fossile brændstoffer, hvis der skal kunne indregnes en CO₂-fortrængning for denne del. På længere sigt kan der derfor være en idé, at gassen oprenses eller omdannes til et flydende brændstof, så det har mulighed for at blive brugt i andre sektorer som fx industri eller transport.

Pyrolyseolie

Indholdet af pyrolyseolien er ligesom gasfraktionen estimeret på baggrund af målinger fra DTU i notatet '*Slow Pyrolysis of wheat straw coupled to catalytic vapor upgrading with Na-Al₂O₃*' fra februar 2020. Her er pyrolyseolien målt til at bestå af 78% kulstof, 9% brint, 12% ilt, 2% kvælstof og 4% vand. Den øvre brændværdi er her 36 GJ/ton. Når ilten fraregnes, svarer det til en brændværdi på 40,9 GJ/ton. Til sammenligning har råolien en brændværdi på 44,5 GJ/ton.

Properties of collected liquid				
	untreated tars		tars treated with Na-Al ₂ O ₃ (500 °C)	
	aqueous phase	oil phase	aqueous phase	oil phase
moisture content [wt%]	85.3	12.2	93.6	4.0
wt% N (d.b.)	n.d.	2.4	n.d.	1.7
wt% C (d.b.)	53.6	71.3	51.6	77.7
wt% H (d.b.)	n.d.	8.3	n.d.	8.6
wt-% O (d.b., by diff.)	n.d.	18.0	n.d.	11.9
HHV (d.b.) [MJ/kg]	n.d.	32.8	n.d.	36.0
HHV (w.b.) [MJ/kg]	n.d.	28.8	n.d.	34.6
H/C	n.d.	1.39	n.d.	1.32
O/C	n.d.	0.19	n.d.	0.11
effective hydrogen index	n.d.	0.92	n.d.	1.03
TAN [mg KOH/g]	n.d.	29.7	n.d.	4.6
revaporization efficiency [wt-% d.b.] at 350 °C	n.d.	91.5	n.d.	98.1

Tabel 11. Indhold i pyrolyseolien baseret på DTU's målinger. Kilde: Slow Pyrolysis of wheat straw coupled to catalytic vapor upgrading with Na-Al₂O₃

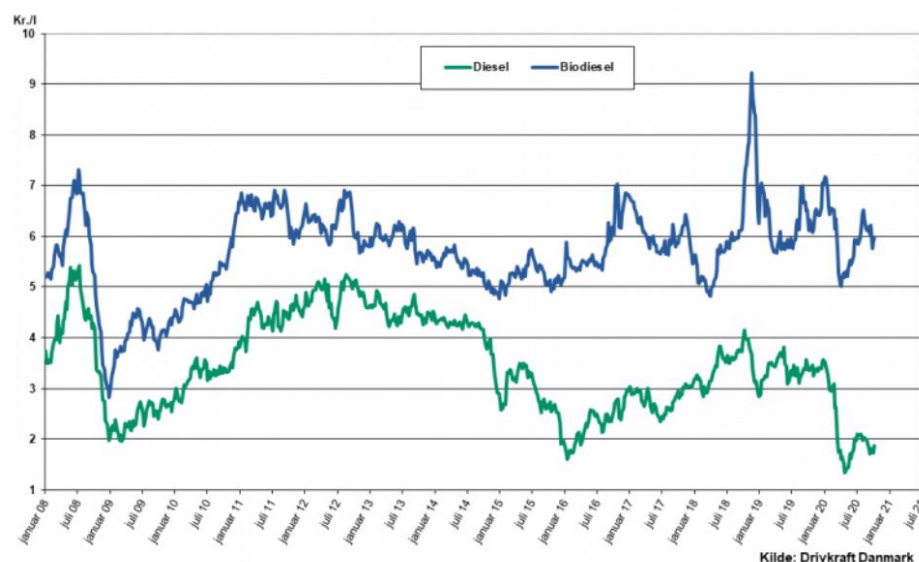
I COWIs energi- og massebalance er indholdet af olien lidt anderledes. Her antages det, at der er 70% kulstof, 9% brint og 18% ilt. Brændværdien er her 33,3 GJ/ton. Når iltten fraregnes, svarer det til en brændværdi på 40,6 GJ/ton. Dvs. samme virkningsgrad som DTU måler. Denne værdi ligger til grund for de samfundsøkonomiske beregninger.

Oliefraktionen kan fortrænge fossile brændsler i nogle af de sektorer, hvor det kan være svært at finde klimavenlige alternativer herunder transport og industri. Efter drøftelser med Equinor er det forventningen, at pyrolyseolien umiddelbart kan raffineres til blandt andet diesel på et raffinaderi. Her fjernes iltten. Hvis der viser sig at være et højt syreindhold i olien, kan raffinering være problematisk, da det sætter begrænsninger for anlæg og processerne. Reduktion af pyrolyseoliens syreindhold bør derfor have høj prioritet.

5.2 Værdien af olie

Frem mod 2030 og 2040 er forventningen, at der stadig vil være et betydeligt olieforbrug i Danmark i transportsektoren herunder særligt tung transport, skibsfart og flytransport. Derfor vil olien med stor sandsynlighed kunne fortrænge fossile brændstoffer. Oliens kan som minimum afregnes til råolieprisen, og vil sandsynligvis være det, som fortrænges i første omgang. Råolieprisen forventes at stige frem mod 2040 fra ca. 95 kr./GJ i dag til ca. 128 kr./GJ i 2040. Det baserer sig på Energistyrelsens samfundsøkonomiske beregningsforudsætninger fra 2019, som tager udgangspunkt i IEA's prisfremskrivinger i New Policy scenariet.

I dag er der en prisdannelse på biobrændstoffer, fordi der er iblandingskrav til diesel og benzin. Biodiesel koster i dag ca. 6 kr./l, som er ca. 3 gange højere end den fossile dieselpri (uden skatter og afgifter). Dermed er der allerede en betalingsvillighed, som er højere end den fossile.

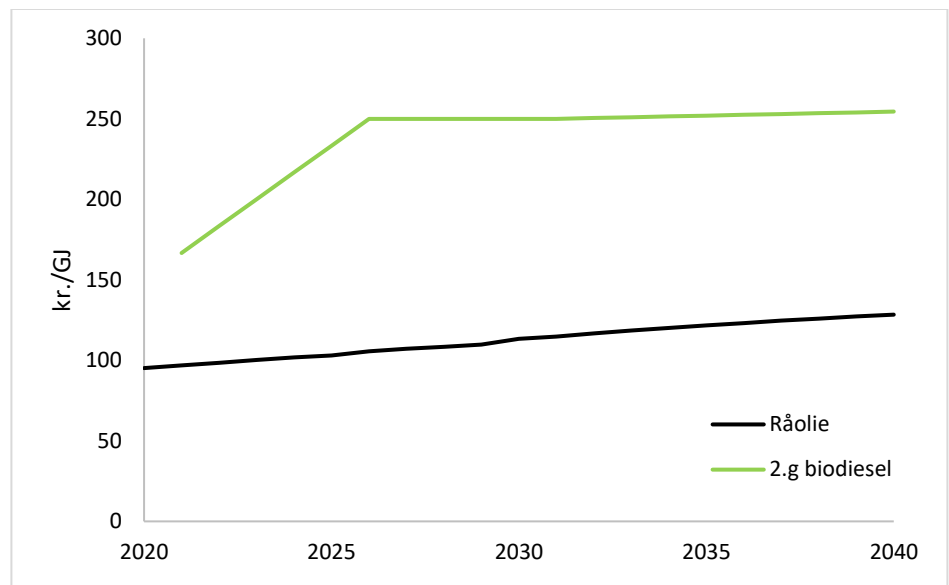


Kilde: Drivkraft Danmark

Figur 9. Prisen på biobrændstoffer 2008-2020. Kilde: Drivkraft Danmark

Den ovenstående biodieselprireference er primært baseret på 1. generations biodiesel. Ved en ambitiøs grøn omstilling vurderes den øvre prisgrænse at blive defineret af produktionsomkostningerne for 2. generations biodiesel baseret på ikke-fødevarerprodukter, f.eks. træflis. Ea har tidligere undersøgt produktionsomkostningerne for 2. generations biodiesel og beregnet omkostningerne til ca. 250 DKK / GJ i 2030. Produktionsomkostningerne anslås at stige lidt mod 2040, hvilket især drives af antagelsen om svagt stigende priser på træflis.

De resulterende prisfremskrivninger er vist nedenfor.



Figur 10. Prisfremskrivninger af råolieprisen og prisen på 2.generations biodiesel. Kilde: Energistyrelsens samfundsøkonomiske beregningsforudsætninger 2019 og egne beregninger

6 Beregningsresultater og følsomheder

Her præsenteres hovedresultater af de samfundsøkonomiske beregninger på SkyClean-teknologien.

6.1 Samfundsøkonomiske produktionsomkostninger

Der er gennemført to beregninger af produktionsomkostninger:

- Beregning af den samlede CO₂-fortrængningsværdi, hvor olien indregnes til råolieprisen
- Beregning af CO₂-fortrængningsværdien for biokul givet at bioolien har en værdi svarende til 2. generations biodiesel

- Ad 1 Denne beregning giver en samlet vurdering af, hvor meget CO₂-fortrængningsværdi SkyClean-teknologien kan præstere uden at sammenligne med, hvilke sektorer CO₂-fortrængningen finder sted. Dvs. der er beregnet en CO₂-fortrængningsværdi for alle produkterne samlet (biokul, olie og gas).
- Ad 2 Det kan give mening at opdele CO₂-værdien på sektorer, da det i fx i transportsektoren er sværere at finde alternative grønne brændstoffer, og alternativomkostningen derfor er højere end i øvrige sektorer. I dag er der krav om, at der iblandes biobrændstoffer til diesel og benzin, som indirekte er et udtryk for en grøn betalingsvillighed i transportsektoren. Derfor er der her lavet en beregning af CO₂-fortrængningsomkostningen ved SkyClean-anlægget, hvor olien afregnes til 2.g. biodieselpriisen. Da der således allerede betales en grøn præmie for oliefraktionen medregnes denne ikke som en del af den fortrængte mængde CO₂, og CO₂-fortrængningsomkostningen omfatter kun CO₂ fortrængt fra biokul og gasfraktionen.

Nedenfor er økonomien i SkyClean anlæg 5 vist for det første år i drift samt den samlede CO₂-fortrængningsomkostning over perioden. Kapitalomkostningen er omregnet til en årlig ydelse fordelt over anlæggets 25 års levetid. Her ses, at det koster ca. 2.700 kr. at producere 1 ton biokul, når der indregnes en indtægt på pyrolyseolien på 95-130 kr./GJ over perioden svarende til råolieprisen.

Den samlede CO₂-fortrængningsværdi er beregnet ved at tage summen af de samlede omkostninger over perioden 2021-2040 fratrullet indtægter og dividere med den akkumulerede CO₂-besparelse sammenlignet med nedmuldning af halm.

2021	Input-pris		Årlige omkostning	
Kapitalomkostning	Mio. kr.	112	Mio. kr./år	7,2
D&V pyrolyse	kr./t-halmpiller	302	Mio. kr./år	10,6
D&V halmpiller	kr./t-halm	282	Mio. kr./år	10,5
Halm	kr./ton	640	Mio. kr./år	23,4
Transport, lagring af olie	kr./ton	430	Mio. kr./år	2,1
Olieindtægt	kr./GJ	97	Mio. kr./år	-15,7
Varmeindtægt	kr./GJ	60	Mio. kr./år	-5,2
Indtægt biokul	kr./ton	300	Mio. kr./år	-3,1
Total			Mio. kr./år	29,6

Enhedsomkostning	Biokul	2021	kr./ton-biokul	2891
Enhedsomkostning	Olie	2021	kr./GJ	288

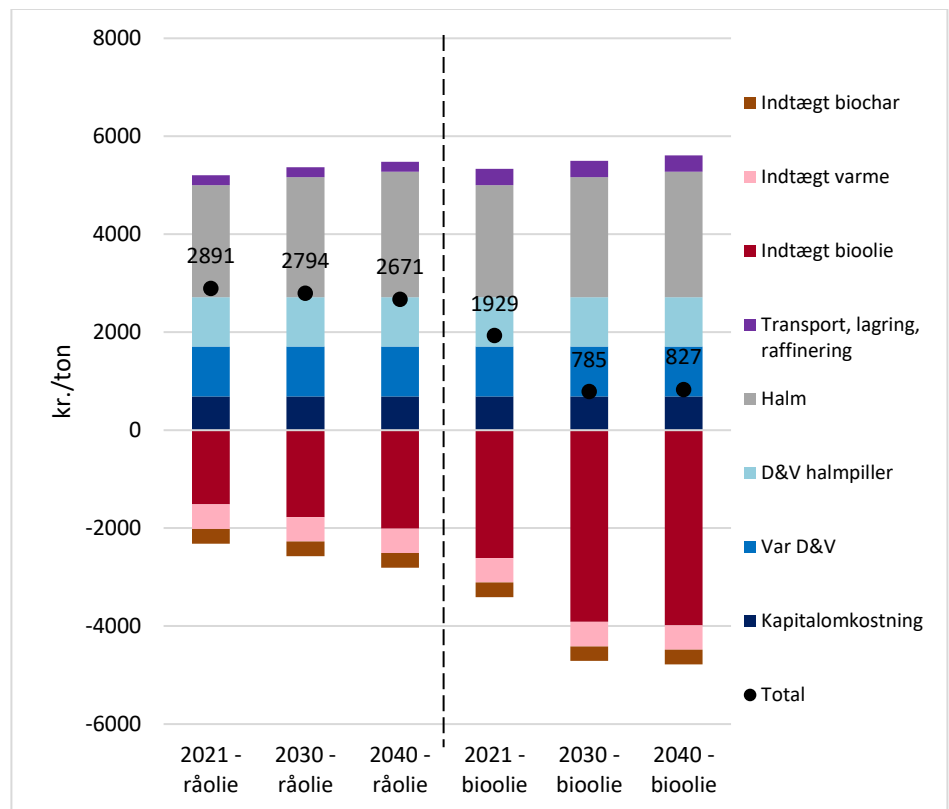
Sparet CO₂-udledning 2021-2040	ktons	666
CO₂-fortræningsomkostning 2021-2040	kr./ton	870

Tabel 12. Årlige samfundsøkonomiske omkostninger ved SkyCleans anlæg 5. For omkostningen pr. biokul er der indregnet en indtægt for olien. For beregningen af olieprisen er der ikke indregnet en indtægt for olien eller CO₂-værdi af biokul.

Resultatet af beregning 1 viser en samlet CO₂-fortræningsværdi på **870 kr./ton** over en 20-årig periode, når der sammenlignes med nedmuldning af halm.

Hvis bioolien raffineres og kan sælges som 2. generations diesel, vil netto-produktionsomkostningen⁵ pr. ton biokul falde betydeligt. Med råolie som indtægt er prisen ca. 2.900 kr./ton, mens den reduceres til i 2021 at være ca. 1.900 kr./ton, som falder til helt ned til ca. 800 kr./ton, når der indregnes en stigende pris for grøn olie baseret på 2. generations biodiesel.

⁵ Produktionsomkostninger fratrasket salgsværdi af biolie og VE-gas.



Figur 11. Produktionsomkostningen netto ved at producere biokul, hvis bioolien kan sælges til 2. generationsdiesel. Der regnes her ekskl. CO₂-indtægt for fortrængningsværdien af biokul. Den sorte prik viser nettoomkostningen.

Nedenfor er beregning 2 vist (for anlæg 5), hvor oliefraktionen afregnes til 2. generations biodieselpriisen i stedet for råolieprisen. Her ses, at de årlige nettoomkostninger bliver ca. 20 mio. kr. i år 2021. Produktionsomkostningen falder til 1.929 kr./ton i 2021 og forventes at falde yderligere frem mod 2030 og 2040, da prisen på 2. generations biodiesel forventes at stige. CO₂-fortrængningsomkostningen for biokul og gasfraktionen er derfor lavere: 299 kr./ton sammenlignet med nedmuldning af halm.

2021	Input-pris		Årlige omkostning	
Kapitalomkostning	Mio. kr.	80	Mio. kr./år	7,2
D&V pyrolyse	kr./t-halmpiller	302	Mio. kr./år	10,6
D&V halmpiller	kr./ton-halm	282	Mio. kr./år	10,5
Halm	kr./ton	640	Mio. kr./år	23,4
Transport, lagring af olie	kr./ton	708	Mio. kr./år	3,5
Olieindtægt	kr./GJ	167	Mio. kr./år	-27,1
Varmeindtægt	kr./GJ	60	Mio. kr./år	-5,2
Indtægt biokul	kr./ton	300	Mio. kr./år	-3,1
Total			Mio. kr./år	19,6

Enhedsomkostning	Biokul	2021	kr./ton-biokul	1929
Enhedsomkostning	Olie	2021	kr./GJ	288

Sparet CO₂-udledning 2021-2040	1000*tons	413
CO₂-fortræningsomkostning 2021-2040	kr./ton	481

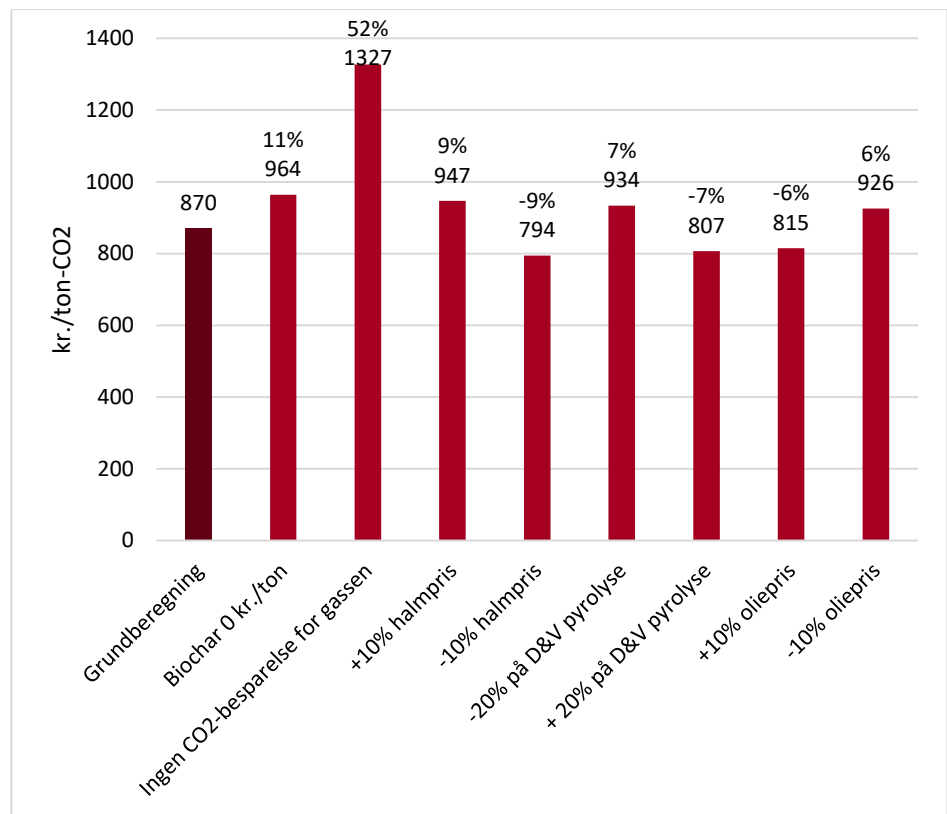
Tabel 13. Årlige samfundsøkonomiske omkostninger ved SkyCleans anlæg 5. For omkostningen pr. biokul er der indregnet en indtægt for olien. For beregningen af olieprisen er der ikke indregnet en indtægt for olien eller CO₂-værdi af biokul. Bemærk fortræningsomkostningen omfatter kun biokul og gas.

6.2 Følsomheder

Her præsenteres følgende følsomheder på resultatet af den samlede fortræningsomkostning (beregning 1):

- Ingen gødnings- og jordforbedringsværdi af biokul (0 kr./ton)
- Ingen CO₂-besparelse for gasfraktionen
- Halmpillepris 800 kr./ton (i 2020)
- Halmpillepris 1250 kr./ton (i 2020)
- +20% D&V
- -20% D&V

Resultatet fremgår af Figur 12. Her ses, at resultatet er meget følsomt i forhold til, om gasfraktionen kan fortrænge fossile brændsler. Uden en CO₂-besparelse for gasfraktionen vil den samlede fortræningsomkostning være 57% højere (1.257 kr./ton). Derudover har halmpilleprisen meget stor betydning for CO₂-fortræningsomkostningen.



Figur 12. Følsomheder af CO₂-fortrængningsomkostningen

6.3 Anlæg 1

Her er den samlede fortrængningsomkostning ved anlæg 1 beregnet. Økonomi og fortrængningsomkostning fremgår af tabellen nedenfor.

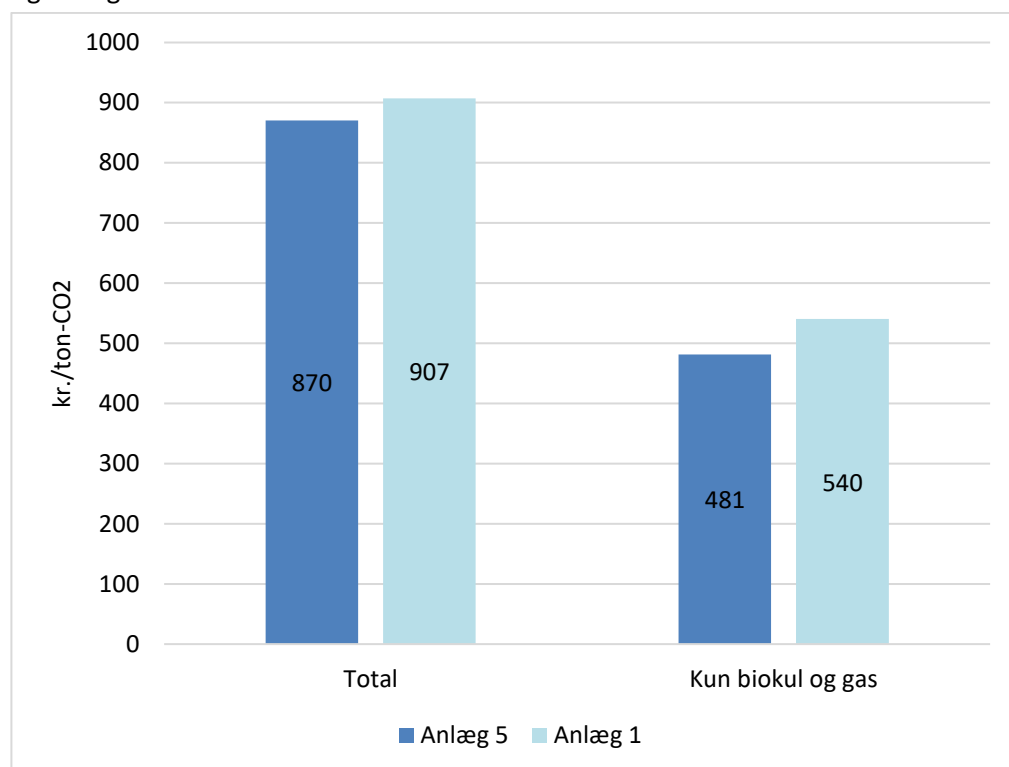
2021	Input-pris		Årlige omkostning	
Kapitalomkostning	Mio. kr.	117	Mio. kr./år	8,4
D&V	kr./t-halm	302	Mio. kr./år	10,6
				10,5
Halmpiller	kr./ton	1058	Mio. kr./år	23,4
Transport, lagring af olie	kr./ton	430		2,1
Olieindtægt	kr./GJ	97	Mio. kr./år	-15,7
Varmeindtægt	kr./GJ	60	Mio. kr./år	-5,2
Indtægt biokul	kr./ton	300	Mio. kr./år	-3,1
Total			Mio. kr./år	30,8

Enhedsomkostning	Biokul	2021	kr./ton-biokul	3008
Enhedsomkostning	Olie	2021	kr./GJ	287

Sparet CO ₂ -udledning 2021-2040	1000*tons	666
CO₂-fortrængningsomkostning 2021-2040	kr./ton	907

Den samlede CO₂-fortrængningsværdi af det samlede anlæg er 907 kr./ton for anlæg 1. Det er ca. 13% højere end for anlæg 5.

Nedenfor er de samlede CO₂-fortrængningsomkostninger sammenlignet for anlæg 1 og anlæg 5.



Figur 13. CO₂-fortrængningsomkostning for anlæg 1 og 5. Total angiver den samlede CO₂-fortrængningsomkostning, hvor olien afregnes til råolieprisen. 'Kun biokul og gas' angiver CO₂-fortrængningsomkostningen for biokul og gas, hvor bioolien sælges til 2.generations biodieselpriisen

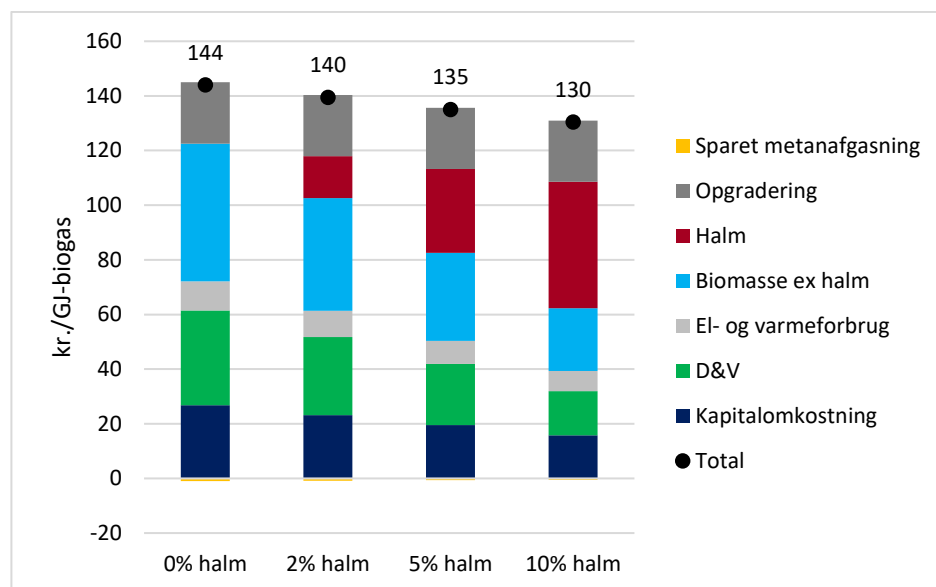
6.4 Sammenligning med halm til biogas

Til at sammenligne hvor halm har størst samfundsøkonomisk værdi, er CO₂-fortrængningsomkostningerne ved at bruge halm i biogas (marginalt) udregnet og sammenlignet med halmforbrug til SkyClean.

Produktionsomkostningen til biogas er beregnet med udgangspunkt i Energistyrelsens teknologikatalog for biogasanlæg, opgradering og halmtilføjelse til biogas. CO₂-besparelsen for biogas er beskrevet i afsnittet 'Halmanvendelse og kulstofkredsløb'.

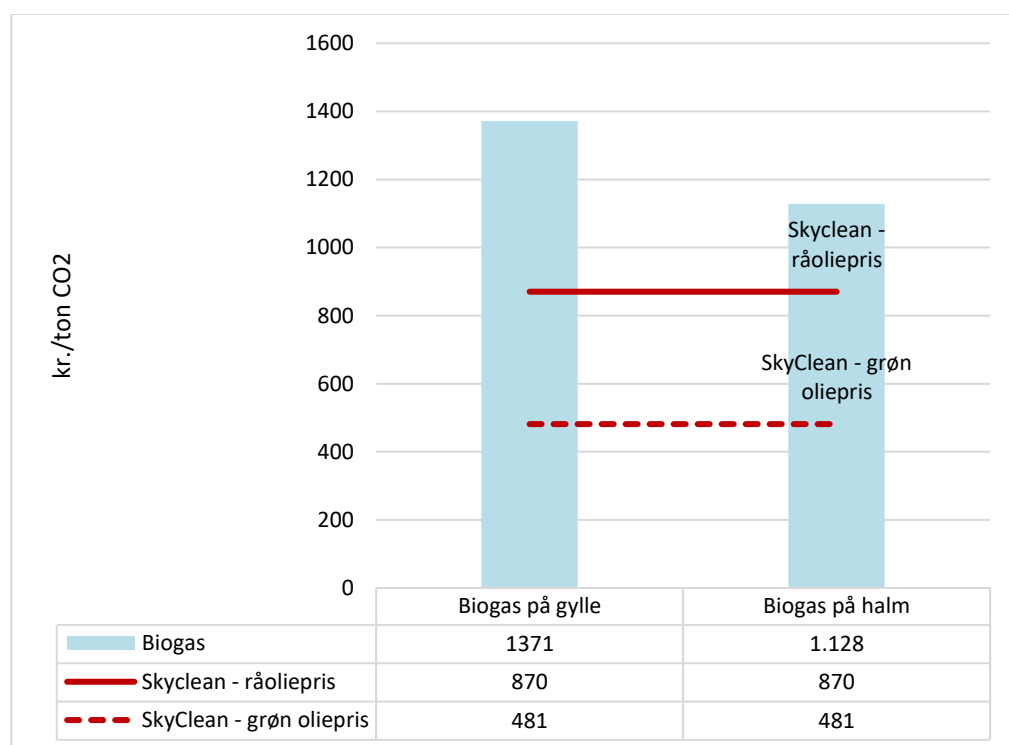
Produktionsomkostningen i 2030 med stigende andel halm i biomasseinputtet til biogasanlæg er vist i Figur 14 nedenfor. Uden halm kan der produceres biogas til 144 kr./GJ i 2030 (og kun en mindre mængde industriaffald). Halmtilføjelsen er med

til at reducere produktionsomkostningen pr. produceret enhed biogas. Ved 5% er produktionsomkostningen faldet til 135 kr./GJ.



Figur 14. Produktionsomkostningen for opgraderet biogas med stigende mængde halm for 2030.

Til at sammenligne CO₂-fortrængningsværdien af biogas med SkyCleans anlæg er den marginale værdi af halm i biogasanlægget beregnet. Dvs. hvad er meromkostningen ved at bruge halm i biogasanlægget i forhold til, hvor meget ekstra output, der tilføjes. I 2030 er den marginale biogasproduktionsomkostning på halm 119 kr./GJ. For perioden 2020-2030 svarer det til en CO₂-fortrængningsomkostning på 1.346 kr./ton sammenlignet med nedmuldning. Over hele perioden 2021-2040 er den samlede CO₂-fortrængningsomkostning for biogas 1.128 kr./ton sammenlignet med nedmuldning. Det er højere end fortrængningsomkostningen for SkyCleans anlæg – både anlæg 1 og anlæg 5, hvor fortrængningsomkostningen med for det alle produkterne er hhv. 907 og 870 kr./ton. Figur 15 nedenfor illustrerer CO₂-fortrængningsomkostningerne for biogas sammenlignet med fortrængningsomkostningerne ved Skycleans anlæg. Den fuldptrukne linje viser CO₂-fortrængningsomkostningen for det samlede anlæg, hvor råolieprisen er anvendt som afregning for olien, mens den stiplede linje viser CO₂-fortrængningsomkostningen for SkyClean hvor der er anvendt en højere pris for olien svarende til 2.g biodiesel prisen.



Figur 15. CO₂-fortrængningsomkostning for et biogasanlæg baseret på husdyrgødning (venstre) og den marginale CO₂-fortrængningsomkostning af at bruge halm i biogasproduktion.

7 Referencer

- I. En teknologigennemgang for at få en troværdig beskrivelse af funktion, produkter, capex, opex samt usikkerheder (DTU, Stiesdal Fuel Technologies, Dall og Cowi)
- II. Kulstofkredsløb (Ea Energianalyse)
- III. Biokullets karakteristik, og evt. barrierer ved anvendelse som jordforbedring, samt data ved kulstoflagring (DTU, Cowi, Aarhus Universitet, Ea Energianalyse).
- IV. Halmpillepris (Ea Energianalyse)
- V. Biooliens og gassens karakteristik, og vurdering af pris/værdi (Cowi, Stiesdal Fuel Technologies)
- VI. Samlet analyse af SkyClean på basis af I-VI (Ea Energianalyse).