



## Økonomiske vurderinger i forhold til værdikæden for Gul Bioraffinering

Jensen, Jørgen Dejgård; Gylling, Morten; Jørgensen, Henning

*Publication date:*  
2018

*Document version*  
Også kaldet Forlagets PDF

*Citation for published version (APA):*  
Jensen, J. D., Gylling, M., & Jørgensen, H. (2018). *Økonomiske vurderinger i forhold til værdikæden for Gul Bioraffinering*. Institut for Fødevarer- og Ressourceøkonomi, Københavns Universitet. IFRO Dokumentation, Nr. 2018/6

# IFRO Dokumentation



## Økonomiske vurderinger i forhold til værdikæden for Gul Bioraffinering

*Jørgen Dejgård Jensen  
Morten Gylling  
Henning Jørgensen*

## **IFRO Dokumentation 2018 / 6**

Økonomiske vurderinger i forhold til værdikæden for Gul Bioraffinering

Forfattere: Jørgen Dejgård Jensen, Morten Gylling, Henning Jørgensen

Denne dokumentation er udarbejdet i regi af forsknings- og udviklingsprojektet BioValue, som er støttet af Innovationsfonden.

Udgivet december 2018

Se øvrige udgivelser i serien IFRO Dokumentation her:

[http://www.ifro.ku.dk/publikationer/ifro\\_serier/dokumentation/](http://www.ifro.ku.dk/publikationer/ifro_serier/dokumentation/)

Se myndighedsaftalte udredninger på [www.ifro.ku.dk/publikationer/ifro\\_serier/udredninger/](http://www.ifro.ku.dk/publikationer/ifro_serier/udredninger/)

Institut for Fødevarer- og Ressourceøkonomi

Københavns Universitet

Rolighedsvej 25

1958 Frederiksberg

[www.ifro.ku.dk](http://www.ifro.ku.dk)

## Økonomiske vurderinger i forhold til værdikæden for Gul Bioraffinering

Jørgen Dejgård Jensen<sup>1</sup>, Morten Gylling<sup>1</sup> & Henning Jørgensen<sup>2</sup>

1. Institut for Fødevarer- og Ressourceøkonomi
2. Institut for Plante- og Miljøvidenskab

### Sammenfatning

Notatet præsenterer analyser og vurderinger af de økonomiske potentialer ved Gul Bioraffinering, dvs. raffinering af hvedehalm til ligninbinder, lysin og xylose/gluconsyre. Der er tale om en illustrativ beregning baseret på de foreliggende forudsætninger.

Baseret på de foreliggende data og forudsætninger viser notatet økonomiske nøgletal for de pågældende raffineringsaktiviteter, og det skitseres, hvordan disse beregninger kan anvendes til at identificere udviklingspotentialer og -behov for den gule bioraffineringskæde i bestræbelserne på at øge lønsomheden. Under de opstillede forudsætninger viser beregningerne, at Gul Bioraffinering kan have potentiale til at være lønsom på langt sigt, når de relevante teknologier er modnede. Det skal dog bemærkes, at en række af beregningsforudsætningerne hviler på et forholdsvis spinkelt empirisk grundlag, hvorfor resultaterne er genstand for en betydelig usikkerhed.

### Indledning

Nærværende notat giver vurderinger af de økonomiske potentialer ved Gul Bioraffinering, dvs. raffinering af hvedehalm til ligninbinder, udvinding af aminosyren lysin, samt udvinding af kemikalierne xylose og gluconsyre. Vurderingerne er baseret på økonomiske beregninger i relation til et bioraffineringsanlæg med en årlig produktionskapacitet på 300.000 tons halm-tørstof. Raffineringsprocessen giver tre slutprodukter:

- 1) Ligninbinder, som kan anvendes i blandt andet isoleringsmaterialer
- 2) Lysin, som er en essentiel aminosyre og kan anvendes i foder
- 3) C5/C6-sukkerstoffer, som enten har højere renhed og værdi i sig selv (xylose eller gluconsyre), eller som kan omdannes via katalyse til forskellige kemiske stoffer.

I praksis vil der dog være tale om, at der sammen med lignin produceres enten lysin eller xylose/gluconsyre, idet de to sidstnævnte udvindes fra den samme biomassefraktion.

De økonomiske beregninger i det følgende omfatter omkostninger i forbindelse med forbehandling af biomassen og selve bioraffineringen, samt en forventet værdi af de produkter, som kommer ud af raffineringen.

Herudover giver raffineringsprocessen en restfraktion, som kan anvendes som råvare i biogasfremstilling. Omkostninger hertil inddrages også i økonomivurderingen.

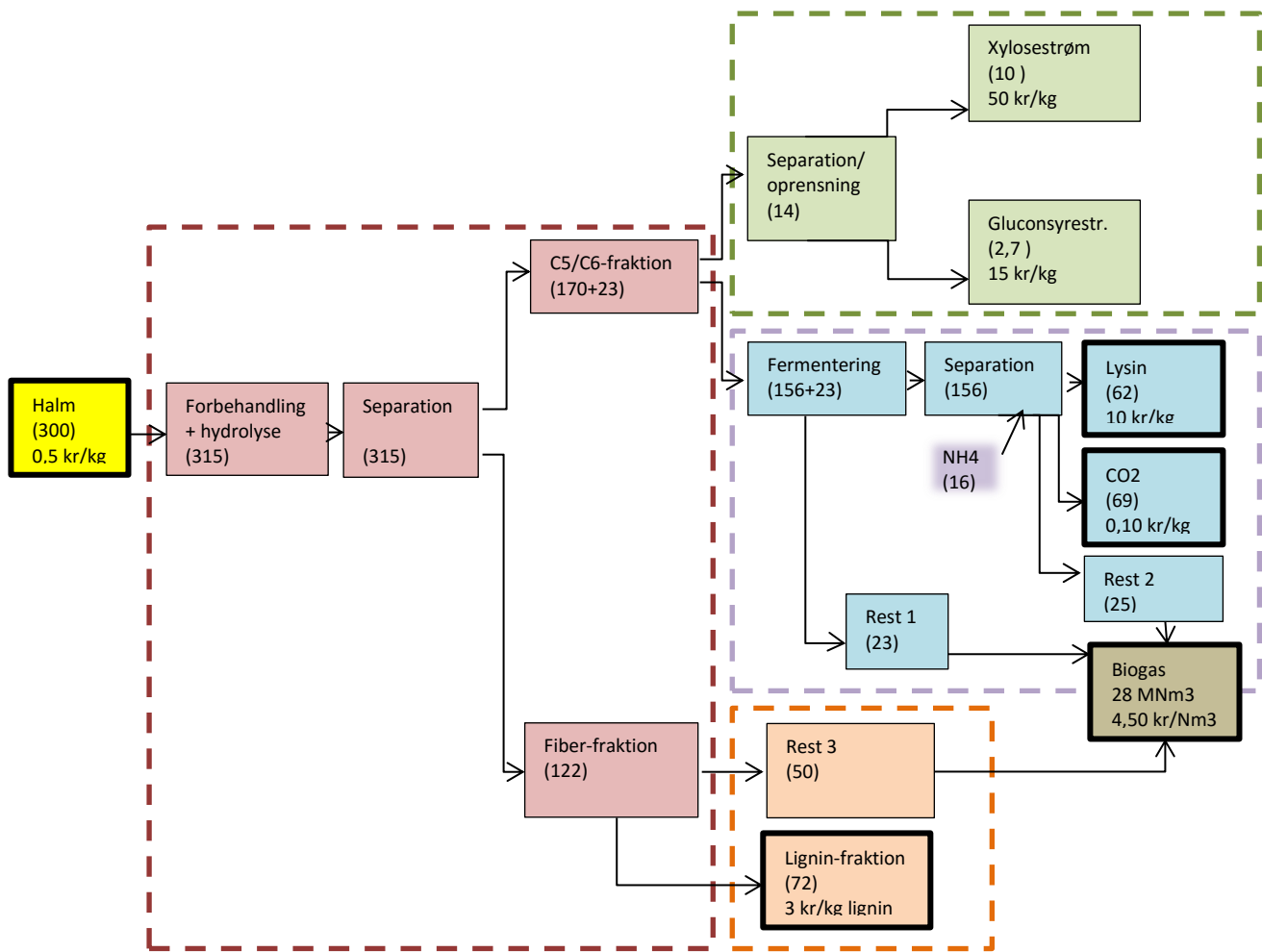
## Metoder, datagrundlag og beregningsforudsætninger

I det følgende redegøres kort for de anvendte beregningsforudsætninger. En detaljeret oversigt over de konkrete forudsætninger er givet i Appendiks 1. Det skal understreges, at der er tale om relativt forenklede beregningsforudsætninger.

### Bioraffinering

Data vedrørende processer og omkostninger i bioraffineringsleddet stammer for en stor del fra BioValue partnere på Københavns Universitet, Danmarks Tekniske Universitet og Århus Universitet. Der tages udgangspunkt i et anlæg med en årlig driftstid på 3000 timer og en kapacitet på 300.000 tons tørstof (TF) hvedehalm pr. år, dvs. et anlæg på størrelse med anlægget i prospektet for Maabjerg Energy Consortium (MEC). Med en tørstofprocent på 80 svarer det til ca. 375.000 tons halm pr. år.

Bioraffineringsprocessen er illustreret i Figur 1. For modulet vedrørende forbehandling og hydrolyse i værdikæden (illustreret ved den stiplede rødbrune kasse) estimeres der masseflows, forbrug af hjælpestoffer og energi, samt investeringsbehov og arbejdsindsats, blandt andet med udgangspunkt i erfaringer og prospekter fra raffinering af biomasse til ethanol og tilhørende sidestrømme. For de efterfølgende moduler (illustreret ved henholdsvis den stiplede turkise, orange og grønne kasse) estimeres der så vidt muligt, ud fra BioValues nuværende resultater i laboratorie- og pilotskala samt tilgængelig litteratur på området, et forventet udbytte samt forventede omkostninger i en opskaleret industriel proces, kombineret med prisestimerer for de biobaserede slutprodukter.



**Figur 1.** Illustration af bioraffineringsproces i den gule værdikæde

Note: Tal i parentes: 1000 tons TS

### Strømme i bioraffineringen

I processen beskrevet i Figur 1 forbehandles (snittes og dampes) halmen, og den forbehandlede halm hydrolyseres og separeres. Efter forbehandling, enzymatisk hydrolyse og separation fremkommer en fast lignin-fraktion samt en fraktion, der indeholder C5/C6 sukkerstoffer. I værdikæden er der antaget tre produktstrømme: en ligninstrøm (til lignin-baseret bindemiddel), en kulhydratstrøm, som forædles til aminosyren lysin og/eller opgraderes til xylose og gluconsyre samt en reststrøm, som anvendes til energiproduktion i form af biogas. Lignin-fraktionen (ca. 25 % af tørstoffet fra den oprindelige biomasse) kan efterfølgende konverteres til bindemidler, som kan anvendes i blandt andet isoleringsmaterialer.

Der er i nærværende beregning opstillet et scenario, hvor 14.000 tons TS C5/C6-fraktion oprenses og separeres til xylose- og gluconsyreholdige fraktioner. Resten af den flydende fraktion antages oprenset og anvendt til fremstilling af lysin.

Økonomiberegningerne af xylose- og gluconsyreudvinding i det følgende bygger på beregningsforudsætninger, som er uddraget af vurderinger af Morthensen (2017). En række af disse forudsætninger må dog vurderes at være behæftet med en betydelig usikkerhed.

Et alternativt scenario er, at hele den flydende fraktion (170.000 tons TS) anvendes til lysinfremstilling. I så fald fremstilles der 68.000 tons TS lysin og 75.000 ton TS CO<sub>2</sub>, mens "Rest2"-fraktionen bliver i størrelsesordenen 22.000 tons TS.

Restfraktionen fra bioraffineringsprocessen forudsættes afsat som råvare i biogasudvinding i en reaktor, som ligger i umiddelbar nærhed af bioraffinaderiet. Den afgassede restfraktion antages efterfølgende udbragt på landbrugsjord.

### **Datagrundlag og beregningsforudsætninger**

Med halmudbytter mellem 3 og 5 tons halm pr. hektar kræver forsyning af et bioraffineringsanlæg med en årlig kapacitet på 375.000 tons halm et hvedeareal i størrelsesordenen 75.000-125.000 ha. I de økonomiske vurderinger regnes med en markedspris for halm på 500 kr. pr. ton leveret til bioraffineringsanlægget. Prisen svarer til en typisk afregningspris for halm leveret til fjernvarmeværk. Prisen afspejler således halmens alternativværdi, hvis den anvendes til fjernvarmeproduktion, hvilket er det oplagte alternativ ud fra landmandens økonomiske synsvinkel.

Der er generelt forholdsvis sparsomme data tilgængelige vedrørende omkostningerne ved bioraffinering af halm, svarende til værdikæden vist i Figur 1, endsige for de enkelte delprocesser. I forbindelse med analyserne er der taget kontakt til ledende forskere i BioValue-projektet: Claus Felby (KU), Peter Ruhdal Jensen og Anne Meyer (DTU) og Ib Johannsen (AU), med henblik på at etablere data for de forskellige dele af værdikæden, herunder: biomasseflows (fx konverteringsrater mellem input og output), energiforbrug, forbrug af hjælpestoffer, investeringsomkostninger, årlige driftsomkostninger og prisforhold. Herudover har yderligere deltagere i BioValue-projektet bidraget med data og informationer: Manuel Pinelo (DTU) og Vagn Hundebøll (DLG). En oversigt over de anvendte beregningsforudsætninger er vist i Appendix 1.

For så vidt angår første fase i raffineringprocessen (forbehandling, hydrolyse og separation), forudsættes det på baggrund af indkomne oplysninger fra Claus Felby, at der fra den faste fraktion kan udvindes 0,24 ton TS lignin pr. ton TS halm. Der forudsættes investeringsomkostninger til denne fase af bioraffineringsprocessen på knap 2500 kr. pr. ton TS halm (som forrentes og afskrives over 20 år med en kalkulationsrente på 4 %) og "faste" driftsomkostninger (lønninger, forsikringer, vedligehold med videre) antages at udgøre ca. 221 kr. pr. ton TS halm. Herudover anvendes der hjælpestoffer i denne fase (enzymmer, natriumhydroxid) til en samlet omkostning på 490 kr. pr. ton TS halm.

For fermentering af sukkerstoffer til lysin antages det (på baggrund af oplysninger fra Peter Ruhdal Jensen, Claus Felby og Vagn Hundebøll), at der kan udvindes godt 0,4 kg lysin pr. kg sukkerstof (xylose eller glukose). Der forudsættes investeret 17.500 kr. pr. ton årlig produktionskapacitet for lysin, og samlede driftsomkostninger (eksklusive biomasse) forudsættes at andrage 4800 kr. pr. produceret ton lysin (heraf udgør tilsætning af ammonium 471 kr. pr. produceret ton lysin), mens det producerede lysin forudsættes at kunne afsættes til en pris på 10.000 kr. pr. ton TS ren lysin. En væsentlig sidestrøm til denne produktion er CO<sub>2</sub>-produktion, som antages at kunne afsættes til en pris på 80 kr. pr. ton TS, baseret på Global CCS

Institute (2011), som vurderer, at afsætningspriserne på bulk CO<sub>2</sub> på gasform ligger i størrelsesordenen 5-20 US\$ pr. ton.

For udvinding af xylose og gluconsyre antages det (på baggrund af informationer fra Morthensen, 2017), at C5-fraktionen oprenses og separeres i to fraktioner, som begge består af xylose, gluconsyre og arabinose i forskellige sammensætninger: en "xylose-fraktion", som har et relativt højt indhold af xylose (80 % xylose, 8 % gluconsyre), og en "gluconsyre-fraktion", som har et relativt højt indhold af gluconsyre (22 % gluconsyre, 67 % xylose). Disse fraktioner antages i beregningerne at være slutprodukter, hvilket betyder, at prissætningen af disse produkter i økonomiberegningen principielt tager hensyn til, at disse blandinger yderligere skal separeres for at kunne anvendes. Xylose (med 99 % renhed) vurderes at have en markedsværdi på ca. 10 kr. pr. kg, og gluconsyre (med 99 % renhed) vurderes at kunne sælges for ca. 15 kr. pr. kg (hvori er taget hensyn til omkostninger til yderligere separering og oprensning af henholdsvis xylose og gluconsyre). Således forudsættes en afsætningspris for "xylose-fraktionen" på 9,20 kr. pr. kg, og for "gluconsyre-fraktionen" på 10 kr. pr. kg. Til denne del af værdikæden regnes der med årlige driftsomkostninger på knap 29.000 kr. pr. ton TS C5-sukkerstrøm. Heraf udgør omkostninger til hjælpestoffer langt hovedparten (ca. 24.000 kr. pr. ton TS). De anvendte konkrete beregningsforudsætninger vedrørende hjælpestoffer til henholdsvis C5-sukker-strømmen fremgår af den øverste del af Tabel 1.

**Tabel 1. Beregningsforudsætninger vedrørende hjælpestoffer**

	Hjælpestoffer, kg pr. kg TS	pris, kr. pr. kg
<b>Sukker-strøm</b>	kg pr. kg TS C5-sukkerstrøm	
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	11.804	6.19
CaCO <sub>3</sub>	22.132	0.60
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	1.807	6.00
Enzym - GOD	0.013	1000.00
Enzym - CAT	0.001	500.00
NaOH	2.693	0.99
<b>Lysin-strøm</b>	kg pr. kg TS lysin-strøm	
NH <sub>4</sub>	94.232	2.00
<b>Lignin-strøm</b>	kg pr. kg TS lignin-strøm	
enzym	0.020	100.00

Kilder: Morthensen (2017), www.alibaba.com

Ligninfraktionen fra separationen af biomassen forudsættes at kunne afsættes direkte (uden yderligere forarbejdning) til en pris på 3000 kr. pr. ton TS. Dette vurderes af eksperter til at være en realistisk pris for lignin til fremstilling af bindemiddel til fx isoleringsmaterialer<sup>1</sup>. Til hydrolyse og filtrering af lignin er på baggrund af upublicerede beregninger af Sacadura (2018) estimeret en årlig driftsomkostning (eksklusive omkostning til biomasse) på ca. 235 kr. pr. ton TS lignin-strøm.

Restfraktionen (afhentet på bioraffineringsanlægget) antages at have en værdi svarende til nettoværdien af den biogas, der kan udvindes (værdi af gasproduktion med fradrag af håndteringsomkostninger i

<sup>1</sup> Det skal dog bemærkes, at prisskønnet kan være baseret på anden biomasse end halm, hvorfor der tages forbehold for eventuelle forskelle i værdisætningen af lignin-fraktionen i halm og i anden biomasse.



biogasfremstillingen og omkostninger til transport af den afgassede biomasse til arealer, hvor biomassen kan udbringes). Der regnes med et gennemsnitligt gasudbytte på 0,28 Nm<sup>3</sup> pr. kg TS restfraktion, som afgasses og afsættes til en pris på 4,50 kr. pr. Nm<sup>3</sup>. Udbyttetallet dækker over en variation mellem de forskellige fraktioner. For Rest 1- og Rest 3-fraktionerne (jf. Figur 1) regnes med et gasudbytte på 0,35 Nm<sup>3</sup> pr. kg restfraktion, mens der for Rest 2-fraktionen regnes med et noget mindre gasudbytte (0,1 Nm<sup>3</sup> pr. kg). Håndteringsomkostninger i forbindelse med afgasning antages at andrage 1395 kr. pr. ton TS restfraktion. Biogasanlægget antages at ligge i umiddelbar nærhed af bioraffineringsanlægget, men der vil være transportomkostninger forbundet med tilbageføring af den afgassede biomasse til landbrugsjord. Ved en gennemsnitlig transportafstand på 50 km antages disse transportomkostninger at udgøre 51.85 kr. pr. ton TS. Samlet svarer det til et nettobidrag af biogasproduktionen på -52,65 kr. pr. ton TS halm. Uden transportomkostningen ville bidraget fra biogas være på -0,80 kr. pr. ton TS halm.

En opsummering af forudsætninger vedrørende investeringsomkostninger for de forskellige trin i værdikæden fremgår af Tabel 2. Investeringsforudsætningerne bygger på oplysninger fra anlægsprospektet for Maarbjerg Energy Consortium (MEC), suppleret med informationer om investeringer til lignin-strøm og sukker-opgradering fra Sacadura (2018). Idet der arbejdes med andre og flere slutprodukter i nærværende beregning end i MEC-prospektet, er det vurderingen, at en samlet investering på 2,5 mia. kr. er realistisk i nærværende bioraffineringskæde. Derfor er investeringstallene for C5-opgradering, lysin-strøm og lignin-strøm, samt generelle bygge- og anlægsinvesteringer nedskaleret, således at den samlede investeringsudgift (inklusive forbehandling) bliver på 2,5 mia. kr. Investeringerne antages forrentet med 4 % og afskrevet over 20 år, og der regnes med årlige vedligeholdelsesomkostninger på 1-5 % af investeringen.

**Tabel 2. Investeringsudgifter, mio. kr.**

Byggegrund	61
Bygninger, installationer, servicefaciliteter	529
Byggerådgivning mv.	459
Investering – forbehandling og hydrolyse	737
Investering – C5 sukkerstrøm	367
Investering – lysin-strøm	290
investering – lignin-strøm	62
<b>Investering i alt</b>	<b>2,502</b>

Kilde: omregnet fra Felby (2018), Sacadura (2018), Hundebøll (2018)

Baseret på nationalregnskabsdata for sammenlignelige industrier (for brancherne "170000 Papirindustri", "200010 Fremst. af basiskemikalier", "200020 Fremst. af maling og sæbe mv.", "220000 Plast- og gummiindustri") skønnes det, at personaleomkostninger udgør 22 % af den samlede produktionsværdi. Anvendes værdien af halm-inputtet som en proxy for produktionsværdien, svarer dette til en samlet lønomkostning på 44 mio. kr. (som antages fordelt ud på de enkelte strømme i værdikæden i samme forhold som de årlige kapitalomkostninger), svarende til 90 fuldtidsansatte.

## Resultater

Beregningsresultater for henholdsvis forbehandling/hydrolyse/separation og for de tre produktkæder er opsummeret i Tabel 3.

**Tabel 3. Beregningsresultater, værdikæde med C5-opgradering**

Kr./ton TS halm	Forbehand- ling mv.	Lysin-fremstilling		Sukker-opgradering			Rest- fraktion	I alt
		Lysin	CO <sub>2</sub>	Xylose	Glucon- syre	Lignin		
1000 tons TS	300	63	69	10	3	72	99	
Biomasse	625							
Øvrige rå- og hjelpestoffer	490	98		1130		41		
Energi	121	3		254		51		
Personaleomk.	100	39		40		8		
Kapitalomkostninger	507	71		122		19		
Omkostninger i alt	1843	212		1546		120		3721
Produktværdi		2088	18	308	90	720	-53	3171
Netto-resultat								-550

Med de opstillede forudsætninger er omkostningen til biomasse på 625 kr. pr. ton TS, svarende til den forudsatte markedspris på 500 kr. pr. ton halm (leveret) og en tørstofprocent på 80. Øvrige rå- og hjelpestoffer koster i beregningen ca. 490 kr. Samlet estimeres forbehandling med videre at koste ca. 916 kr. pr. ton TS, inklusive forrentning og afskrivning af investeringsomkostninger. Herudover er indregnet fælles omkostninger til administration samt forrentning og afskrivning af investeringer i byggegrund, byggeri, installationer med videre på i alt 268 kr. pr. ton TS halm.

Forbehandlingen antages at føre til udskilning af en lignin-fraktion, som forudsættes afsat til en pris på 3000 kr. pr. ton TS – eller 720 kr. pr. ton TS halm. Oparbejdningen af lignin-fraktionen koster 120 kr. pr. ton TS halm, hvoraf godt 15 % er kapitalomkostninger, mens energi og øvrige hjelpestoffer tilsammen udgør knap 85 % af disse lignin-specifikke omkostninger.

Under de opstillede forudsætninger bliver ca. 5 % af biomassen til xylose- og gluconsyrefraktioner, som skønnes at kunne afsættes til en værdi af ca. 400 kr. pr. ton TS halm. Der er ifølge beregningerne dog ganske betydelige omkostninger ved udvindingen af disse fraktioner – samlet knap 1550 kr. pr. ton TS halm, hvoraf størsteparten hidrører fra forskellige hjelpestoffer.

I den opstillede værdikæde indgår ca. 60 % af den hydrolyserede biomasse som input til produktion af lysin og giver et output på ca. 63.000 tons (TS) lysin årligt. Omkostningen til selve lysin-udvindingen er beregnet til at svare til ca. 212 kr. pr. ton TS halm-input, hvoraf kapitalomkostninger udgør ca. en tredjedel. De tilgængelige data vedrørende omkostninger i lysin-produktionen er forholdsvis aggregerede, hvorfor opdelingen på omkostningskomponenter er behæftet med betydelig usikkerhed. Blandt eksperter i BioValue-projektet vurderes det sandsynligt, at udbyttet af lysin-produktionen vil kunne stige i størrelsesordenen 10-20 %, når processen opskaleres og optimeres. I nærværende beregning giver lysin-

kæden et lysin-udbytte svarende til 2088 kr. pr. ton TS halm, samt en CO<sub>2</sub>-sidestrøm til en værdi af 18 kr. pr. ton TS halm.

Under de opstillede beregningsforudsætninger vedrørende en Gul Bioraffineringskæde viser beregningerne et negativt resultat (således at raffineringskæden kun vil kunne betale et beløb svarende til 75 kr. pr. ton TS halm, eller betydeligt mindre end de 625 kr., halmproducenten kan opnå ved at sælge halmen til fjernvarmeproduktion). Lysin- og lignin-kæderne bidrager positivt til det økonomiske resultat, mens værdien af xylose/gluconsyrestrømmen ikke er tilstrækkelig til at dække omkostningerne til denne sukker-opgradering, hvorfor denne opgradering bidrager negativt til det samlede resultat. Derimod bidrager biogas-strømmen negativt til det samlede resultat.

Som et alternativ ses der på en enklere version af værdikæden, hvor xylose/gluconsyre-strømmen ikke indgår, og hvor biomassen herfra i stedet indgår i lysin-strømmen (således at omkostninger og produktionsværdi i denne delstrøm bliver større end i Tabel 3). Resultater af beregningen under disse forudsætninger fremgår af Tabel 4. Som det fremgår, er den samlede økonomi i denne lidt forenkledede værdikæde ifølge beregningen noget bedre, sammenlignet med den mere komplekse værdikæde i Tabel 3, fordi den tabsgivende sukker-opgradering er erstattet af en mere økonomisk lønsom lysin-strøm.

**Tabel 4. Beregningsresultater, forenklet værdikæde**

Kr./ton TS halm	Forbehandling mv.	Lysin-fremstilling				I alt
		Lysin	CO <sub>2</sub>	Lignin	Restfraktion	
1000 tons TS	300	68	75	72	100	
Biomasse	625					
Øvrige rå- og hjælpestoffer	490	107		41		
Energi	121	3		51		
Personaleomkostninger	100	43		8		
Kapitalomkostninger	507	78		19		
Omkostninger i alt	1843	231		120		2194
Produktværdi		2275	20	720	-60	2955
Netto-resultat						761

## Følsomhedsberegninger

Som det er fremgået ved gennemgangen af beregningsforudsætninger, er der knyttet en del usikkerhed til en del af forudsætningerne. Derfor gennemføres nedenfor en følsomhedsberegning i forhold til nærværende beregning, hvor investeringsomkostningerne fordobles i forhold til de ovennævnte forudsætninger (med en proportional opskalering af kapitalomkostningerne i alle værdikædens led).

En anden væsentlig usikkerhedsfaktor i beregningerne er omkostningerne til hjælpestoffer, navnlig i xylose/gluconsyre-strømmen, ligesom der også er usikkerhed omkring afsætningspriserne på produkterne i denne strøm. Derfor gennemføres der følsomhedsanalyser, hvor henholdsvis priserne på hjælpestoffer og priserne på produkterne (de to xylose/gluconsyre-blandinger) fordobles.

Endelig gennemføres en følsomhedsberegning, hvor den producerede CO<sub>2</sub> i lysin-kæden ikke kan afsættes.

Resultater af følsomhedsberegningerne fremgår af Tabel 5. Følsomhedsberegningerne er gennemført i forhold til baseline-beregningen for den udvidede værdikæde, hvor også xylose/gluconsyre-strømmen indgår (jf. Tabel 3).

**Tabel 5. Følsomhedsberegninger**

kr. pr. ton TS halm	Forbe-handling	Lysin-strøm	Xylose/ gluconsyre- strøm	Lignin- strøm	Rest- fraktion	I alt
Baseline (jf. Tabel 3)	-1843	1894	-1148	600	-53	-550
Fordobling af kapitalomkostninger	-2350	1823	-1270	581	-53	-1269
Fordobling af alle priser på hjelpestoffer	-2333	1796	-2278	559	-53	-2309
Fordobling af afsætningspriser på xylose/gluconsyre-blandinger	-1843	1894	-840	600	-53	-242
Bortfald af salgsværdi for CO <sub>2</sub>	-1843	1876	-1148	600	-53	-568

Tabellen viser, hvorledes de økonomiske bidrag fra kædens enkelte led påvirkes af de respektive forudsætninger. Eksempelvis illustrerer resultaterne, at resultaterne er forholdsvis følsomme over for de gjorte forudsætninger omkring investeringsomkostninger og priserne på hjelpestoffer i xylose/gluconsyre-strømmen. Derimod vil en fordobling af afsætningsprisen på xylose-/gluconsyre-produkterne ikke være tilstrækkeligt til at give en lønsom opgradering af sukkerstofferne til sådanne produkter.

## Diskussion

Det ovenstående viser vurderinger af økonomien i en gul bioraffineringskæde, hvor hvedehalm raffineres til en lysin-, en lignin- og eventuel en xylose/gluconsyre-fraktion samt en restfraktion, hvor sidstnævnte kan anvendes som råvare i biogasanlæg. Beregningerne skal betragtes som illustrative i den forstand, at der kun i meget begrænset omfang foreligger data vedrørende drift af sådanne bioraffinaderier, hvorfor de anvendte beregningsforudsætninger er udtryk for skøn baseret på forsøgsresultater og erfaringer i laboratorie- og pilotskala. Ligeledes er de anvendte forudsætninger om investeringsudgifter til de forskellige trin i værdikæden behæftet med betydelig usikkerhed, ligesom også kapitalomkostningernes fordeling på kædens forskellige led må betragtes som usikre. Samlet indebærer dette en betydelig usikkerhed på resultaterne, som også nævnt i det ovenstående.

Selv hvis et bedre datagrundlag er til stede, er det stadig forventningen, at der vil være en række uafklarede forhold og detaljer, som ikke vil kunne belyses datamæssigt, og hvor der i stedet ville være behov for at gennemføre scenarieberegninger for "sandsynlige" data- og parameterværdier og vurderinger af de økonomiske resultaters følsomhed i forhold til disse værdier. Eksempler herpå kunne være alternative forudsætninger om bl.a. teknologisk effektivitet (fx konverteringsrater, produktkvalitet med videre), økonomisk effektivitet (omkostningsreduktioner, skalaøkonomi med videre), biomassegrundlag, markedsforhold. Et væsentligt aspekt af sådanne beregninger vil være at vurdere udviklingspotentialer og udviklingsbehov i forhold til at forbedre den økonomiske lønsomhed i den gule bioraffineringskæde.

Under de gjorte forudsætninger tyder resultaterne umiddelbart på, at der kan være et økonomisk potentiale i at investere i bioraffinering af halm til lignin- og lysin-strømme, forudsat at teknologien er udviklet og funktionsdygtig i den betragtede skala, og at produkterne kan afsættes til de forudsatte priser. Derimod vurderes det umiddelbart ikke som lønsomt at tilføje en ekstra strøm med opgradering af sukkerfraktionen til xylose-/gluconsyre-produkter.

Som det også understreges af beregningerne, ligger der betydelige usikkerhedsmomenter i beregningen – hvoraf en del knytter sig til de betragtede teknologier, mens andre usikkerheder knytter sig til de markedsmæssige rammebetingelser, såsom priser på hjælpestoffer og afsætningspriser for produkterne. Der er i beregningerne anvendt forudsætninger om afsætningspriser for de udvundne fraktioner fra bioraffineringen, baseret på aktuelle markedspriser eller interesstilkendegivelser fra potentielle købere. Såfremt udbuddet af disse materialer øges væsentligt som følge af etablering af en betydelig bioraffineringsindustri, kan disse prisforhold ændres. I så fald må den ovenstående beregning vurderes som i den optimistiske ende.

## Referencer

Felby, C. (2018). Claus Felby, Københavns Universitet, personlig kommunikation.

Global CSS Institute (2011). Accelerating the uptake of CCS: industrial use of captured carbon dioxide ( <https://hub.globalccsinstitute.com/publications/accelerating-uptake-ccs-industrial-use-captured-carbon-dioxide/2-co2-market>, downloaded d. 26. September 2018)

Hundebøll, V. (2018). Vagn Hundebøll, DLG, personlig kommunikation.

Alibaba (2018). [www.alibaba.com](http://www.alibaba.com) (tilgået 28. August 2018)

Morthensen, S.T. (2017). Integration between enzyme technology and membrane separation in biorefinery processes, PhD thesis, april 2017, Danmarks Tekniske Universitet

Sacadura, M.d.C. (2018). Economic assessment of the yellow biomass biorefinery process, upubliceret notat, Danmarks Tekniske Universitet

## Appendix 1. Beregningsforudsætninger - gul kæde

Bioraffineringsanlæg, kapacitet	300000 tons TS	375000 tons halm
<i>Dyrkning af biomasse</i>		
Halmudbytte pr. hektar	3500 kg halm/ha	
Halm, tørstofandel	80 %	
Hvedeareal	107143 ha	
Halmpris (leveret)	500 kr./t	
<i>Bioraffinering – forbehandling mv.</i>		
Investering	2455 kr./t TS halm kapacitet	
Hjælpestoffer	30 kg/ton TS halm	
Vand	300 l/ton TS halm	
Elektricitet	242 kWh/ton TS halm	
Øvrige driftsomkostninger	19.5 kr./t TS halm	
<i>Udvinning af lysin</i>		
C5/C6 biomasse til lysin-produktion	156575 tons TS	
Konverteringsrate	40 % af C5/C6 biomasse	
Lysin-produktion	62630 tons	
Lysin-pris	10000 kr./ton TS	
CO <sub>2</sub> -produktion	68893 tons	
CO <sub>2</sub> -pris	50 kr/ton TS	
Investering	4638 kr. pr. ton lysin kapacitet	
Driftsomkostninger	9000 kr. pr. ton lysin	
<i>Udvinning af sukkerstoffer</i>		
C5/C6 biomasse til xylose/gluconsyre	14052	
Xylose, konverteringsrate	32 %	
Xylose produktion	10037 tons TS xylose-strøm	
Xylose-pris	9.20 kr./kg TS	
Gluconsyre, konverteringsrate	68 %	
Gluconsyre produktion	2710 tons TS gluconsyre-strøm	
Gluconsyre-pris	10.00 kr./kg TS	
<i>Udvinning af lignin til bindemiddel</i>		
Fiber-fraktion	122259 tons TS	
Konverteringsrate	0.24 tons TS pr. ton TS halm	
Lignin stream	71958 tons TS	
Lignin – afregningspris	3000 kr./ton TS	
<i>Restfraktion</i>		
Rest-biomasse	98772 tons TS	
Biogas-udbytte	286 Nm <sup>3</sup> pr. ton TS	
Biogas-værdi af rest-biomasse	-160 kr./ton TS	50 % af halmværdi