



Nat-Bas, Gruppe 7, hus 14.2

1 Semester projekt 2008: Biodiesel fra mikroalger

"Biodiesel from microalgae"

Mette Rams, Daniel Green Hersing, Jonas Hagel Thorn & Maria Hald

Vejleder: Morten Blomhøj



Indholdsfortegnelse

Abstract	3
Indledning	4
Problemformulering.....	6
Afgrænsning og Metode	6
Baggrundsviden.	7
Hvad er en alge?.....	7
Fotosyntesen	8
Fotorespiration	10
Respiration	11
Fra alger til biodiesel	11
Fotobioreaktorer til dyrkning af alger	14
Anvendelse af fotobioreaktor.....	16
Design kriterier for fotobioreaktorerne	17
Overflade-volume forhold	17
Gasudveksling.....	18
Mikse og turbulens.....	19
Lys og mørke zoner.....	20
Beskrivelse af reaktorerne.....	22
Tubular fotobioreaktor	23
Flat panel.....	25
Vertical column fotobioreaktor	26
Areal til at dække Danmarks transportsektor.....	28
Analyse på resultaterne	37
Afgørende faktorer for areal og udbytte	38
Diskussion.....	40
Konklusion.....	42
Perspektivering	43
Litteraturliste	45

Abstract

Vi kan ikke undvære bioenergi, hvis vi skal sænke vores CO₂ udledning i Danmark. Udfordringen i at finde alternative energiformer ligger ikke blot i teknologi udviklingen, men også hvordan vi skal skabe balance mellem fødevarer, energi og miljø.

En bioenergikilde, som vi endnu ikke udnytter, er produktionen af alger til biodiesel. Alger udgør i modsætning til afgrøder ikke en konkurrent til fødevarer, og skruer dermed ikke fødevare priserne i vejret. Samtidig er en dyrkning af alger CO₂ neutral.

Der findes få fotobioreaktorer, som er velegnet til produktionen af alger til bioenergi i dag, men de oplever alvorlige problemer, når de forstørres. De væsentligste problemer med reaktorerne er gas udvekslingen, belysningen, lys-mørke zoner og temperatur. Disse problemer afspejler en manglende forståelse af algen som biologisk væsen, og disse diskuteres her.

Skulle Danmark kunne dække hele transportforbruget, har vi beregnet, det ville kræve et areal på 29 % af Danmarks samlede areal, ved en produktion på tre måneder. Derfor vil det ikke på nuværende tidspunkt kunne betale sig at starte en alge produktion, med henblik på at dække det danske transport forbrug, ikke engang en lille del af forbruget.

Abstract

We can not reduce our CO₂ emissions in Denmark without the help from bioenergy. The challenge lies in finding alternative forms of energy, and not only in the development of technology, but also how we must make a balance between food, energy and the environment.

A bioenergy source that we, don't use, are the production of algae for biodiesel. Algae's is in contrast to crops, not a competitor for food, and would not make the food prices go up. At the same time, are the cultering of algae, CO₂-Neutral

There are few photobioreactors, which is suitable for the production of algae bioenergy for today, but they face serious problems when scaled up. The main problems with the reactors are the gas exchange, light, light / dark zones and temperature. These problems reflect a lack of understanding of the algae as a biological creature. These problems are discussed here.

If Denmark should cover the entire transport consumption, we have calculated, it would require an area of 29 percent of Denmark's total area, with a production over three months. At this stage it would not be worthwhile to start an algae production, in order to cover transportation consumption. Not even a little piece of it.

Indledning

Stigende energipriser og anerkendelse af at de fossile brændstofdepoter svinder ind, samt problemer med at reducere udledningen af CO₂ til atmosfæren, har gjort biobrændsel særdeles interessant som et muligt alternativ til fossilt brændstof.

Debatten har særlig fokus på transportsektoren, da det er her, der er udsigt til den største stigning i energiforbruget – hele tre gange større stigning end i de øvrige sektorer(FDM). Derfor er bæredygtig energi i transportsektoren også kommet på dagsordenen i EU-regi. Der er lavet klare målsætninger for brugen af biobrændstof i transportsektoren, og i år 2020 skal 20 % af energiforbruget til komme fra alternative energikilder. I dag er der ingen klare mål for hvor meget biobrændstof der skal være indeholdt i transportsektoren, så der skal ske hurtige tiltag hvis målet skal nås i år 2020.

Til transportsektoren findes flere alternativer til fossilt brændstof, så som brint, elektricitet eller biobrændstof. Men mange er af den opfattelse, at der i den nærmeste fremtid kun er et reelt alternativ til fossilt brændsel, nemlig biobrændstoffer (Kvist et al. og Chisti 2007 s. 294).

Biobrændstof deles op i to typer, en biologisk, hvor der ved fermentering af stivelseholdige afgrøder fremstilles alkohol (bioethanol), og en kemisk, ved hvilken reaktionen mellem naturlige fedtsyrer i olieholdige afgrøder og en alkohol danner fedtsyrestre, også kaldet biodiesel. Vi interesserer os kun for algedyrkningen med henblik på en biodieselproduktion.

Biobrændstoffer er CO₂ neutrale, hvilket vil sige, at den mængde CO₂, der frigives ved afbrænding, er den samme mængde CO₂, som blev optaget ved vækst.

Når der anvendes CO₂ neutralt brændstof vil det ikke ændre på det globale kredsløb, da der er tale om et isoleret kredsløb i balance.

Fossile brændstoffer derimod, har været lagret i undergrunden i millioner af år, og er derfor ikke længere en del af det eksisterende CO₂ kredsløb. Når disse brændstoffer pumpes op fra undergrunden og afbrændes, frigives CO₂ til atmosfæren. Denne CO₂ er ikke længere en del af det nuværende kredsløb, og vil forårsage en ubalance i systemet, da der ikke kan optages mere CO₂ end det, der allerede indgår i kredsløbet. Dette medfører, at den overskydende mængde ophobes i atmosfæren.

Biobrændstoffer kan i dag fremstilles ud fra olieholdige afgrøder, køkkenaffald og animalsk fedt. Desværre kan produktionen af disse biobrændstoffer ikke matche efterspørgslen på brændstof. Samtidig er der et etisk problem ved at bruge fødevarer til produktion af biodiesel, når der er folk rundt om i verden, der sulter.

Der skal altså findes alternative måder at frembringe den mængde biobrændstof, der skal bruges til at dække det nuværende forbrug. Fokus er rettet mod alger i håbet om, at alger vil kunne

bidrage som bioenergi til brændstofforbruget. Denne formodning bygges blandt andet på, at alger kan fordoble deres biomasse hurtigere end andre olieholdige afgrøder, hvilket gør, at man teoretisk kan få et langt højere udbytte med alger på kortere tid end med andre afgrøder.

Tiden er inde til at give en vurdering af algernes potentiale som biobrændstofkilde for at belyse om de vil være realistiske kilder til den mængde biobrændstof, det kræver at kunne dække transportsektoren med CO₂ neutralt energi.

En sådan vurdering vil kunne danne grundlag for beslutningen om, hvorvidt vejen frem for Danmark er at dyrke alger.

Dette vil have stor samfundsmæssig relevans, da der hurtigst muligt skal findes en vedvarende CO₂ neutral energikilde, der kan overtage pladsen for de fossile brændstoffer.

Hvis algerne viser sig at være gode, effektive producenter af bioenergi vil dette kunne være løsningen på vores stigende CO₂ problem, samtidig med de kan danne grundlag for at opfylde EU's målsætning. Skulle alger vise sig ikke at være et godt alternativ til de fossile brændstoffer vil dette være en hjælp til hurtigt at kunne afvise algerne og i stedet søge videre efter andre bioenergiformer, der kan løse vores samfundsmæssige problem.

Her er altså tale om at anvende naturvidenskaben til at kunne belyse, hvorvidt algerne vil kunne være løsningen på det samfundsmæssige problem, nemlig at finde en erstatning af de fossile brændstoffer.

Problemformulering

- Hvor stort er potentialet for produktionen af biodiesel baseret på alger?
- Hvilke naturvidenskabelige og teknologiske udfordringer er der forbundet med at realisere dette potentiale?

Afgrænsning og Metode

For at kunne belyse problemet på bare et nogenlunde afklaret naturvidenskabeligt grundlag er det nødvendigt at søge at besvare problemet relativt til allerede eksisterende teknologier til algebaseret produktion af biodiesel. Vi vil derfor forsøge at afdække, hvilke eksisterende teknologier som ud fra den aktuelle forskningslitteratur vurderes at have det største potentiale. Potentialet vil vi sætte i forhold til Danmarks behov for brændstof til transportsektoren. Det er oplagt, at de økonomiske forhold vil være afgørende for om denne produktion kan realiseres i Danmark. Det vil imidlertid kræve indgående sammenlignende økonomiske analyser af forskellige energiteknologier. Det er vi ikke interesserede i at undersøge nærmere.

Vi fokuserer i stedet på de naturvidenskabelige og teknologiske ramme betingelser for algebaseret biodiesel produktion med henblik på dyrkningen af fotoautotrofe alger i lukkede fotobioreaktorer. Til dyrkningen af alger findes flere begrænsninger der vanskeliggør stor skala produktion, dette sker da algernes biologi sætter nogle naturvidenskabelige grænser for, hvor stor en produktion, de kan indgå i. Disse er derfor væsentlige faktorer når produktionspotentialet skal vurderes.

Baggrundsviden.

Vi vil starte med at se på algen og dens biokemiske processer, for derefter at vende fokus mod fotobioreaktorer. Vi ligger vægt på hvilken problematik man støder på i dyrkningsprocessen. Er der en sammenhæng mellem manglende forståelse af algen og designet af fotobioreaktorerne, vil vi forsøge at belyse disse.

Hvad er en alge?

Vi refererer ofte til alger som en samling primitive organismer med en enorm forskellighed. Alger varierer meget mht. deres opbygning og formering. Nogle alger er encellede organismer, som findes med en diameter helt ned til en mikrometer, mens andre alger lever sammen i kolonier som f.eks. tangalger, der kan blive op til 50 meter lange (Darley, W.M. 1982 s. 1). De fleste alger findes i vandige områder, så som havet, søer og moser, men man finder også alger der lever på landjorden, f.eks. på træstammer, i sneklædte egne, i ørkenen og der findes endda alger som lever i symbiose med dyr, svampe eller andre organismer. (Darley, W.M. 1982 s. 1).

Måden alger ernærer sig på kan siges at være enten fotoautotrof eller heterotrof. Størstedelen af algerne er fotoautotrofe organismer, der kun kræver CO₂, vand, fosfor, uorganisk nitrogen samt lys for at kunne lave fotosyntese. Denne type alger er relevante i forhold til produktionen af biodiesel, da de næsten er selvernærende, og derfor ikke kræver de store omkostninger.

Heterotrofe organismer er derimod afhængige af næringsstoffer produceret af andre organismer, men er ikke afhængig af lys. Heterotrofe alger kan også benyttes til produktionen af biodiesel, men da de kræver en vis tilførsel af næringsstoffer, er disse, set fra et energibesparende synspunkt langt mere krævende at have kørende som produktion

Alger har en vigtig rolle som producenter af fotosyntese, og er dermed store leverandører af O₂ og organiske forbindelser i vandmiljøerne. Algerne tolererer en bred spektrum af pH, temperatur, turbulens, O₂ og vokser hurtigere ved høje CO₂ koncentrationer, og er derfor meget velegnet til dyrkningen.

De fleste alger kan fordoble deres biomasse på 24 timer, og det er langt hurtigere end andre olieholdige og stivelseholdige afgrøder, så som byg, hvede og sukkerroer. En del af algerne har et olieindhold på helt op til 80 % af deres biomasse, men de mest almindelige olieindhold ligger mellem 20 og 50 % (Chisti, Y. 2007 s. 296).

Inden for algegruppen, er der en stor variation i størrelse og kolonisationsforhold, cellulær struktur, organisationen af morfologi, forskellige pigmenter til fotosyntese mv. Alle disse forskelligheder reflekterer stor variation i evolutionen, som inkluderer både prokariote og eukariote alger.

Denne variation, giver også udslag i at, slægtskabet mellem to alger kan være langt mindre end slægtskabet mellem visse alger og planter. Visse alger har et større slægtskab med bakterier, mens andre alger har højere slægtskab med svampe. (Nielsen, H. et al. og Richmond, A.. s. 10-11, Barsanti, L. s. 1 og Bold, H.C. s.1).

Antallet af alge arter, er blevet vurderet til at være over 10 millioner. Overordnet set inddeles disse i to hovedgrupper; mikro- og makroalger. Mikroalger er meget olieholdige organismer på under 2 mm, og indeholder næsten ingen stivelse, mens makroalger er meget store og stivelseholdige. Pga. disse egenskaber er det primært mikroalger, der anvendes til biodiesel produktionen, mens makroalgerne bliver brugt til produktion af bioethanol (Hossain, S. et al. 2008 s. 251).

Da algerne stiller vigtige krav til reaktorens udformning er det vigtigt at have forståelse for de biokemiske processer der forgår f.eks. fotosyntesen. En større forståelse af disse processer, ville kunne være med til at optimere designet af reaktorerne til dyrkning af alger. Er der områder der mangler forståelse, vil det kunne give anledning til nye forskningsområder, som kunne gøre designe af et produktionsanlæg mere effektivt.

Fotosyntesen

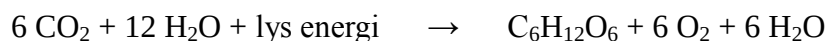
(Dette afsnit, er på baggrund af Cambell N.A., så side tal nævnes længere nede)

Fotosyntesen er grundlaget for alt liv på Jorden, fordi den direkte eller indirekte skaffer næring til alle levende organismer. Da alger kan lave fotosyntese, er de med til at danne fødegrundlag for alle levende organismer. Ved dyrkelsen af alger med henblik på at producere biodiesel er fotosyntesen den vigtigste proces. Fra fotosyntesen får algen næring til at vokse og danne sukker som omdannes videre til lipider. Lipiderne(triglyceriderne) presses eller centrifugeres ud af algen og laves om til biodiesel.

Selvom der er variationer i fotosyntesen afhængig af alger, vil vi kort gennemgå en generel proces.

Fotosyntesen betegner en proces, hvor levende organismer optager energien, der er bundet i lys og danner organiske stoffer. Lysenergien bliver optaget af pigmenter, som sammen med CO₂ og H₂O bliver til energirige kulhydrater, så som glukose, sukrose og stivelse. Som affaldsprodukt, i fotosyntesen, dannes der ilt. Fotosyntesen er påvirket af omgivelserne, så som CO₂ indholdet, lysintensiteten og temperaturen.

Fotosyntesen kan beskrives som en redoxreaktion der drives af lys-energi, hvor CO_2 og H_2O bliver omdannet til kulhydrater og O_2 . Dette kan man se, hvis man går ind i de forskellige trin af processen. Fotosyntesen opskrives ofte forenklet således:



Vi skriver glukose ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$), men det faktiske produkt af fotosyntesen er et tre-kulstof sukker som kan laves til glukose (s. 187). Dette sukkermolekyle omdannes til lipider, men er ikke en del af fotosyntesen.

Fotosyntesen deles op i to stadier, en kaldet Lys Reaktionen og den anden for Calvin cyklus eller for Mørke Reaktionen. (Figur 2 viser lys mørke for et blad, men reaktionerne er de samme) (s. 187).

Lys Reaktionen er det første trin i fotosyntesen, og den foregår i thylakoiderne¹.

Ud fra absorbering af lys energi og optagelse af vand, producerer Lys Reaktionen kemisk energi i form af NADPH^2 og ATP.

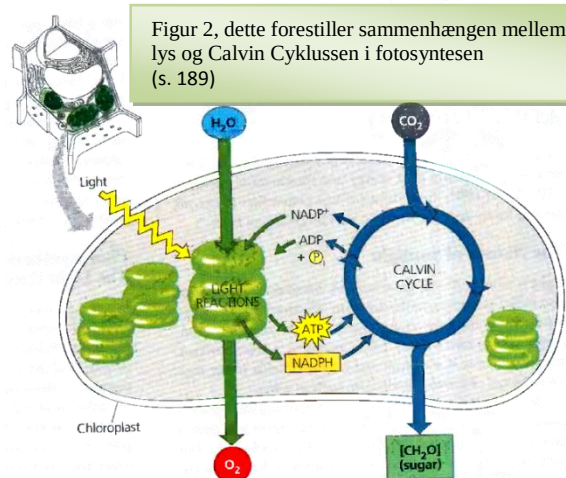
Både ATP og NADPH skal senere bruges i Calvin Cyklussen, for at producere sukker under omdannelse af CO_2 (s. 187).

Calvin Cyklussen foregår i stoma, og begynder med optagelsen af CO_2 fra luften til organiske molekyler, som er i stoma, denne proces kaldes for kul fiksering.

Calvin Cyklus kører oftest om dagen, da Lys Reaktionen kun kan danne NADPH og ATP når der er lys tilstede, Calvin Cyklus kræver NADPH og ATP for at den kan forløbe (s. 187)

Efter dannelsen af et tre-kulstof i Calvin Cyklussen, omdannes det til glycerol-3-phosphate udenfor Calvin Cyklus, herefter reagerer glycerol-3-phosphate med carboxylsyre, fra citronsyre cyklussen og danner lipider. Lipider, som er fedtstof, og er det vi bruger til at lave biodiesel.

Fotosyntesen bestemmer hvor meget olie udbytte vi får dannet, da fotosyntesen danner de sukkermolekyler som omdannes videre til det olie vi presser ud af algen.



Figur 2, dette forestiller sammenhængen mellem lys og Calvin Cyklussen i fotosyntesen (s. 189)

¹ Thylakoider er et kompliceret system af sække, opbygget af dobbelte foldede lipid lag. I thylakoid membranen findes klorofyl.

² NADPH er et molekyle som "opbevarer" elektroner og afgiver elektroner hvis et molekyle skal reduceres.

Ligesom fotosyntese er en kemisk reaktion, findes der også fotorespiration, som fungerer som en ”konkurrent” til fotosyntesen, og derfor noget man også skal holde lidt øje med.

Fotorespiration

En af grundene til vi skal vide noget om fotorespirationen, er hvis der er mangel på CO_2 , kan enzymet Rubisco, i Calvin Cyklussen, binde O_2 i stedet for CO_2 , og omdanne det til serine³, ammoniak og CO_2 (Richmond, A s. 32).

Processen kaldes for fotorespiration, fordi den foregår i lys (*photo*) og forbruger O_2 , og producerer CO_2 (*respiration*).

Fotorespiration forbruger faktisk ATP modsat fotosyntesen. Endvidere producerer fotorespiration ikke sukker, men forbruger faktisk de fotosyntetiske produkter, ved at tappe organisk materiale ud fra Calvin Cyklus og spalte CO_2 fra, denne CO_2 kunne ellers være blevet bundet til algen, hvorved der kunne have været dannet organisk materiale. (Campbell, N.A side. 200)

Fotorespiration afhænger derfor af koncentrationen af O_2 og CO_2 . En høj koncentration af O_2 og en lav koncentration af CO_2 stimulerer fotorespirationen, hvorimod en høj koncentration af CO_2 i forhold til O_2 koncentrationen favoriserer fotosyntesen. Fotosyntetiske organismer er meget forskellige mht. deres hastigheder af fotorespiration.

For at øge effekten af algedyrkningen, er det derfor nødvendigt at minimere effekten af fotorespirationen. Det kan gøres ved en effektiv fjernelse af O_2 og en øget tilføjelse af CO_2 . Mikroalger er derfor også dyrket i en kultur, hvor koncentrationen af CO_2 er markant højere i forhold til O_2 koncentrationen - det omvendte forhold end hvad der findes i almindelig luft. (Richmond, A. s.32)

Om der er nogen fordele ved fotorespirationen har vi ikke kunne læse os frem til. Da der ikke gives nogle forklaringer, kunne det tyde på, at man ikke har en fuld forståelse om det har en gavnlig effekt. Vi har dog læst, at for nogle planter udgør fotorespirationen en beskyttende rolle. Planter som er svækket i deres evne til at udføre fotorespiration er mere modtagelige for skader pga. af for meget lys (Campbell, N.A s. 200). Hvilke skader der tales har vi ikke kunne læse os frem til. Man kunne formode at det er det samme funktion for alger idet det er samme proces der foregår.

I produktionen af alger ses Fotorespirationen dog alligevel som en spildproces, da den ikke producerer hverken energi eller organisk materiale. Hvis denne antagelse passer, kunne man forestille sig, at produktionen af alger kunne øges markant, hvis fotorespirationen kunne

³ Som er en af de 20 naturlige aminosyre

reduceres uden at påvirke fotosyntesen negativt. Men da man mangler viden på dette område skal fotorespirationens funktion studeres, for at bestemme om det er et gammelt levn fra fortiden, eller om fotorespirationen spiller en rolle for algerne, ved f.eks. at beskytte algerne ved høje lysintensiteter, ligesom det er tilfældet for planter. Når dette er klarlagt kan det vurderes om man ved genmanipulation ville kunne mindske processen, uden at skade algerne, og i stedet få algerne til at lave mere fotosyntese, og dermed opnå en højere biomasseproduktion.

Respiration

En anden proces, som kan reducere lipid udbyttet er respirationen. Ved respirationen bruger algen O_2 til at spalte organiske molekyler for at udvinde energi. Processen sker hele døgnet og er uafhængig af lys. Om natten, hvor fotosyntesen ikke danner glukose, bruger respirationen det glukose der er lagret i cellen til at drive respiration processen. Dermed mindskes lagret af lipider som ville kunne udvindes til biodiesel, og det er selvfølgelig også en proces man helst vil undgå i produktionen, hvis man vil have et så højt udbytte som muligt. Derfor eksperimenterer man f.eks. også med at have algerne under kunstig belysning om natten, for at ”udskyde” respirationsprocessen.

Fra alger til biodiesel

Det kan være en hjælp for os at forstå hvordan processen af omdannelse fra alger til biodiesel foregår.

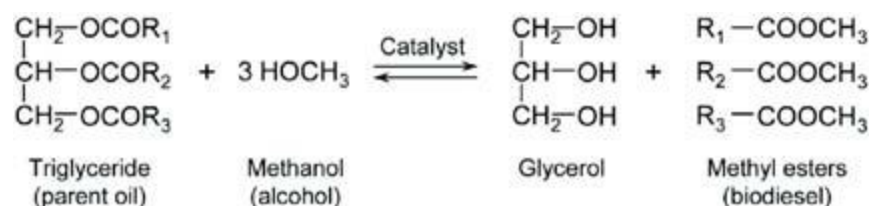
Det er lipiderne der omdannes til biodiesel, dette gøres ved hjælp af en alkohol. Billige alkoholer som metanol og ethanol kan sagtens anvendes til produktionen, og udgør derfor ikke en økonomisk begrænsning for produktionen. Den mest brugte alkohol til produktion er metanol, da det er den billigste, og samtidig har metanol flere fordele, da den er polær, og har den korteste karbon kæde, og derved reagerer hurtigt med triglycerider (Fangrui, M. et al.1998).

Som vist nedenfor er det en kendt og forholdsvis enkel metode at omdanne triglycerider til biodiesel. Denne metode er den samme som anvendes ved produktionen fra andre olieholdige afgrøder.

Biodiesel, som er et nedbrydeligt stof, er en monoalkylester af langkædede fedtsyrer⁴, der stammer fra vedvarende råvarer så som vegetabilsk olie og dyrefedt. Normalt indeholder planteolier urenheder, som gør, at olien ikke direkte kan anvendes til brændstof (Meher L.C, et al. 2004. 250). For at komme uden om dette problem skal der laves en kemisk ændring, som oftest sker ved en transesterfiksering af triglyceriderne. Triglycerider er måden planterne lagrer fedt på, og de består af tre fedtsyrer der er ester bundet til at glycerol molekyle. Ved en

⁴ Fedtsyrer består af lange kæder af C-atomer med en carboxylgruppe i den ene ende af kæden og et fedtmolekyle er sammensat af 3 fedtsyrer bundet til et glycerol molekyle.

transesterfiksering sker der en reaktion mellem triglyceriderne og en alkohol, hvorved der dannes en ester og glycerol, efter nedenstående reaktion (Chisti, Y, s. 295)



Når triglyceriderne transesterfikseres dannes fedtsyrealkylestere (biodiesel) og glycerol ved en trinvis proces, hvor triglyceriden først omdannes til diglycerider, så til monoglycerider og ender til sidst som glycerol. (Meher L.C, et al. 2004), ved hvert trin i transesterfikseringsreaktionen frigøres 1 mol ester (Fangrui, M. et al. 1998 s. 19).

Til fremstillingen af biodiesel skal der bruges 3 mol alkohol for hvert mol triglycerid til produktion af 1 mol glycerol og 3 mol estere. Reaktionen er en ligevægt, der sker begge veje og for at forskyde ligevægten mod produktionen af esteren vil man ved industrielle processer anvende 6 mol alkohol for hvert mol triglycerid (Chisti, Y. 2007 s 295).

Man bruger katalysatorer ved reaktionen for at få den til at forløbe hurtigere og for at få et højere udbytte, så som syre-, alkalikatalysatorer eller lipase enzymer. Lipase er et enzym, der fremmer transesterfikseringen af triglycerider. Disse katalysatorer kan blandt andre være NaOH og KOH (Fangrui, M. et al. 1998 s.19).

Anvendelsen af alkalikatalysatorer er mest effektiv og kan få reaktionen til at ske 4000 gange hurtigere end ved brugen af syre (Chisti, Y. 2007 s. 295). Brugen af alkali som katalysatorer har dog nogle ulemper; det er svært at gendanne glycerolen, katalysatoren skal fjernes fra produktet, og de frie fedtsyrer samt vand påvirker reaktionen.

Når alkali katalysatorer anvendes skal glycerider og alkohol være vandfrie, da vand ellers kan indgå i en forsæbningsreaktion som vil nedsætte udbyttet samt katalysatorens effektivitet og gøre produkterne mere tyktflydende, og sværere at separere. Hvis ikke indholdet af frie fedtsyrer og vand er lavt skal man i stedet anvende syre som katalysator. Når alkali anvendes skal glycerid have en syreværdi på mindre end 1. Syreværdien er et mål for mængden af carboxylsyrer i f.eks., en fedtsyre. Det er et mål for hvor meget base der skal bruges for at neutralisere en fedtsyre, og altså et mål for dennes surhed. Hvis syreværdien er højere end 1 kræves der mere NaOH for at neutralisere de frie fedtsyrer (Fangrui, M. et al. 1998 s. 9).

Lipase er mere attraktivt at anvende, da biproduktet glycerol let kan genvindes og det er nemt at opnå renhed af esteren. Produktionen ved brug af lipase har dog højere omkostninger (Fukuda H. et al. 2001 s. 408). For at rense biodieslen så det bliver til ren biodiesel vasker man gentagende

gange med vand for at fjerne resterne af glycerol og alkohol (Chisti, Y 2007 s. 296).

Produktionen af lipider til biodiesel er ikke en forhindring i produktionen af alger. Der er derfor ikke nogle begrænsninger ved processen vi kan se nærmere på. Der hvor vi skal finde begrænsningerne ved dyrkning af alger er i designet af reaktorerne, så de tilpasses algen

Fotobioreaktorer til dyrkning af alger

Fotobioreaktorer er reaktorer, hvor fotoautotrofe og heterotrofe organismer (f.eks. planteceller eller alger) dyrkes under de bedst kontrollerede fysiske og kemiske forhold med henblik på at optimere væksten. Der er to veje at gå med hensyn til fotobioreaktorer, de kan enten være åbne systemer, som åbne lavvandede bassiner, der oftest bruges til dyrkning af mikroalger, eller det kan være lukkede systemer, som er fuldt kontrollerede og ikke er i direkte kontakt med omgivelserne.

Dyrkning af mikroalger i åbne systemer begrænser valget af algetype, fordi mange mikroalger ikke kan opretholde væksten pga. forurening af f.eks. svampe og bakterier eller konkurrence fra andre udefra kommende algetyper (Richmond, A. s. 178). Til gengæld er fordelene ved åbne systemer, at de er nemmere og billigere at bygge og drive.

Lukkede fotobioreaktorer beskytter derimod algen fra at blive forurenede af noget udefrakommende, og samtidig er lukkede systemer nemmere at kontrollere, og det er nemmere at påvirke sin algekultur.

Fotobioreaktorer i lukkede systemer anses for at have flere fordele end åbne systemer. Tabel 1 sammenligner en lukket fotobioreaktor med en åben, kaldet en Raceway Pond.

Variable	Photobioreactor facility	Raceway pond
Annual biomass production (kg)	100,000	100,000
Volumetric productivity ($\text{kg m}^{-3} \text{d}^{-1}$)	1.535	0.117
Areal productivity ($\text{kg m}^{-2} \text{d}^{-1}$)	0.048 _a	0.035 _b
	0.072 _c	-
Biomass concentration in broth (kg m^{-3})	4.00	0.14
Dilution rate (d^{-1})	0.384	0.250
Area needed (m^2)	5681	7828
Oil yield ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$)	136.9 _d	99.4 _d
	58.7 _e	42.6 _e
Annual CO ₂ consumption (kg)	183,333	183,333
System geometry	132 parallel tubes/unit 80 m long tubes; 0.06 m tube diameter	978 m^2 /pond; 12 m wide, 82 m long, 0.30 m deep
Number of units	6	8

Table 1 (Table 3. i Chisti, Y. 2007) ^a Based on facility area. ^b Based on actual pond area. ^c Based on projected area of photobioreactor tubes. ^d Based on 70% by wt oil in biomass. ^e Based on 30% by wt oil in biomass.

Tabel 1 viser, ved det samme årlige udbytte på 100.000 kg biomasse af både den lukkede og den åbne fotobioreaktor (Raceway Pond), at den lukkede fotobioreaktor er 13 gange større volumen produktivitet i kg pr. dag, end det åbne system.

Ser man på forskellen på produktiviteten pr. areal, er den ikke så stor for det åbne som for det lukkede system. Det hænger sammen med at det åbne system har mange liter på et lille areal og en lille koncentration, hvorimod den lukkede har meget få liter pr. areal, men til gengæld en høj koncentration.

Biomasse koncentrationen i kg pr. m^3 er 29 gange større for den lukkede fotobioreaktor end for den åbne, men det fortæller os ikke så meget da koncentrationen er fortyndet i den åbne, og arealet er større.

Ser vi derimod på arealet, skal vi bruge 5681 m^2 for en lukket fotobioreaktor og et areal på 7828 m^2 for det åbne system, hvilket giver at Raceway Pond har et areal der er 2147 km^2 større, for at opnå den samme biomasse. Man får altså et større udbytte på et mindre areal, med den lukkede reaktor.

Af tabel 1 kan vi også aflæse at olieudbyttet (70 % af olieindhold baseret på biomassen) er større for den lukkede reaktor, den er på 136,9 m^3/ha mod Raceways 99,4 m^3/ha , og det svarer til olieudbytte som er næsten 50 % større pr hektar, end for Raceway Ponds.

Man kunne ud fra denne tabel konkludere, at det bedste udbytte kommer fra den lukkede fotobioreaktor.

Dette er dog vanskeligt at udelukke det åbne system, da forskellen på deres udbytte ikke er særlig forskellige. Der er heller ikke taget i betragtning hvor høje omkostningerne er ved de to dyrkningsformer. Generelt siges produktionen med åbne reaktorer at være billigere end med de lukkede. Hvis man kan opnå et udbytte med den åbne reaktor, som er næsten ligeså godt som med den lukkede, og den åbne er meget nemmere at drive en produktion med, så kan den åbne reaktor ikke forkastes som værende et godt alternativ.

Men vi har dog truffet et valg om kun at se på lukkede, da de giver det højeste udbytte, og vi ser på det mest optimale udbytte vi kan opnå.

Det skal lige bemærkes, at der ikke er nogen kildehenvisninger til ovennævnte tabel, så man ved ikke hvor tallene stammer fra, eller hvilken lukket fotobioreaktor der er tale om. Vi vælger dog at anvende skemaet alligevel, da vi anser forfatteren som en kilde man kan stole på. Chisti, Y. har skrevet mange forskningsartikler om emnet gennem de sidste 20 år og mange forskere inden for emnet refererer til ham.

Anvendelse af fotobioreaktor

Fotobioreaktorer til dyrkning af mikroalger har haft meget opmærksomhed i de sidste år, men interessen for dyrkning af alger har været til stede gennem mere end 50 år.

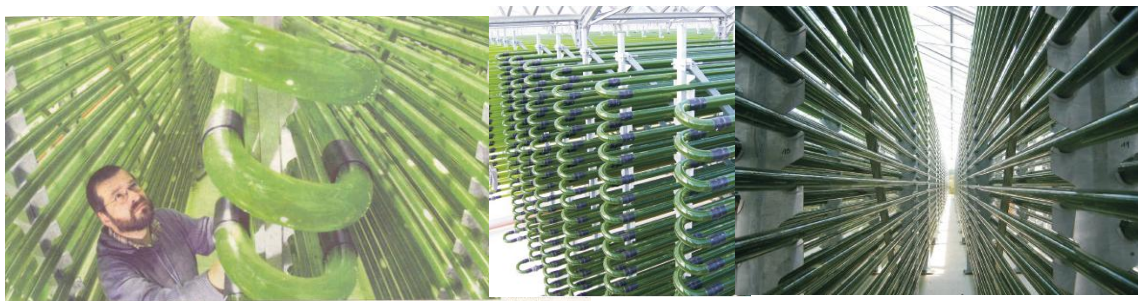
I 1950'erne var man bekymret for den øgede befolkningstilvækst, så man ledte efter nye alternativer eller supplementer til fødevarer. Her foreslog man utraditionelt en eventuel produktion af alger som proteinkost.

Op igennem 1960-, 70- og 80'erne steg interessen for storstilet kommercielle algeproduktioner. I 1970 fremsatte US Department of Energy's Aquatic Species Program (ASP) et program som skulle udvikle mikroalger til biodiesel. De samlede et kartotek over 3000 algetyper fra søer og have, men projektet førte ikke til en indbringende kommerciel forretning. (Rosenberg, J. N. et al s. 432 og Spolaore, P. et al s. 87).

Der findes mange lignende eksempler på interesse for produktionen af alger, og forskningen har været bred og varieret, men de har ikke altid resulteret i kommerciel anvendelse.

Forskningen de sidste par år, har ikke kun haft til formål at dyrke alger til kost, men interessen spænder fra alt lige fra produktion af dyrefoder, til antioxidanter, kosmetik, naturligt farvestof, medicin, vacciner og biodiesel, bare for at nævne nogle stykker. (Rosenberg, J.N. et al s 430-431 tabel 1)

I Klöße, i Tyskland, ligger der en af verdens største indendørs Tubular fotobioreaktor. Billederne nedenfor viser anlægget, og reaktoren kan indeholde ca. 600 L biomasse, og bliver brugt til helsekost.



(kilde: bioprodukte-steinberg.de)

Forskningen omkring algeproduktion har dermed en del år bag sig og som det fremgår, er det muligt at lave en produktion med alger i dag. Problemet ligger som nævnt i at gøre produktionen så stor, at den kan komme op på et industrielt niveau. Vi vil derfor kigge på de problemer som gør sig gældende når fotobioreaktoren designes i stor skala.

Design kriterier for fotobioreaktorerne

Problemerne med at forstørre fotobioreaktorerne op fra laboratorium til industri skala brug, ligger i at forene algerne levevilkår og den teknologiske viden, der er på området.

For at lave et effektiv design af fotobioreaktoren, må man tage højde for at alger stiller nogle krav for at kunne overleve og vokse optimalt. Men selvom disse krav er opfyldt, er det ikke sikkert at biomasseproduktionen opnår et udbytte der er stort nok til, at man opnår en effektiv produktion. For at kunne optimere produktionseffektiviteten ved massekultivering af alger, skal man være i stand til at skabe en balance mellem at stresse algerne til at få så højt et olie indhold som muligt, samtidig med stressniveauet ikke er for højt, så det skader produktionen.

Alger kan udvise stress i respons og stimulans til ændringer i miljøet. Stress definerer vi som et resultat af en metabolisk ubalance som kræver biokemisk og metabolisk tilpasning før en ny stabil tilstand af vækst kan etableres.

Ændringer i miljøet kan ske i forhold til lys, temperatur, forurening, turbulens, pH og næring. Alger der lever i naturen er selvfølgelig udsat for forskellige ændringer i miljøet, hvorimod alger i lukkede fotobioreaktorer som udsættes for stresspåvirkning, kan skyldes for høj lys intensitet eller høj turbulens pga. miksning, pH, næring og temperatur.

Derfor er den algetype man vælger til produktionen, en helt afgørende faktor for at designe en optimal fotobioreaktor. Forståelse af algens egenskaber og dens begrænsninger er derfor af afgørende betydning for produktionen. Nedenfor gennemgår vi de væsentligste og generelle kriterier for design af reaktorerne.

Overflade-volume forhold

Forholdet mellem det belyste overfladeareal af reaktoren og dens volumen bestemmer mængden af lys, som kommer ind i systemet pr. volumen (f.eks. pr. kubikcentimeter). Når overflade/volumen arealet forstørres, bliver belysningsoverfladen og udbyttet af biomassen større, hvilket gør man får en større produktion.

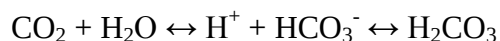
Men skalerer man produktionen op, opstår der flere problemer bl.a. med ophobning af O_2 (Richmond, A. s. 202 – Tredeci 1999) – som bliver dannet ved fotosyntese – denne O_2 skal ofte fjernes, da det ellers ville kunne øge fotorespirationen. Et andet problem ved at gøre dette forhold for stort, er tilføjelsen af CO_2 og næring til kulturen. Man skal nemlig sørge for at fordele dette ligeligt ud over hele reaktoren, så alle algerne får tildelt den mængde CO_2 og næringsstoffer de har brug for, og dette bliver sværere desto større reaktor man arbejder med.

Det resulterer i, at der er et væsentligt dilemma mellem at gøre overflade/volumen forholdet så stort så muligt, samtidig med at sikre en tilstrækkelig gasudveksling, mellem CO_2 og O_2 , og næringsfordeling i reaktorerne.

Derudover skal der tages højde for, at algerne kan tage skade af for høje lysintensiteter som følge af stor belysningsoverfalde, hvilket kan forårsage fotohæmning.

Gasudveksling

Algerne skal tilføres CO_2 i reaktoren for at kunne lave fotosyntese, hvilket tilføres reaktoren fra en separat beholder. Når CO_2 tilføres, reagerer dette med vand, så der dannes kulsyre ved følgende reaktion:



H_2CO_3 (kulsyre) er en middelstærk syre, og når denne dannes, sænkes pH-værdien i reaktoren. Koncentrationen af H_2CO_3 afhænger derfor af hvor meget CO_2 der tilføres.

Når algerne forbruger CO_2 , forskydes ligevægten, så der bliver dannet mere O_2 og mindre H_2CO_3 .

Når der dannes mindre syre bliver indholdet i reaktoren mindre surt, og i stedet for stiger pH. For at undgå at pH værdien stiger kan man vælge at tilføre CO_2 længere inde i systemet, så der hele tiden er en produktion af H_2CO_3 for at pH holdes nogenlunde stabil gennem hele forløbet (Chisti 2007, s. 299). Det er vigtigt at være opmærksom på pH værdien i reaktoren, da algerne har et optimalt pH-område, der for de flestes tilfælde ligger mellem 7 og 9. Hvis ikke pH opretholdes inden for dette interval, kan det forårsage et kollaps af dyrkningen, da de cellulære processer i algen ødelægges.

For at forhindre at der bliver ophobet O_2 , samt at CO_2 og næringsstoffer bliver ligeligt fordelt rundt i kulturen, vil man være nødt til at blande kulturen rundt i reaktoren.

Mikse og turbulens

Kulturen kan mikses på flere måder, f.eks. kan man i reaktorerne vælge at bruge enten en mekanisk pumpe eller en airlift pumpe. En airlift pumpe er en luftgennemstrømning af CO₂. Airlift systemet er mest anvendt, da det både muliggør en udveksling af CO₂ og O₂ og samtidig blander algemassen i fotobioreaktoren (Ugwu, C.U. s 4023). Airlift pumpen er mildere for algekulturen end den mekaniske pumpe, da den kommer til at beskadige algesuppen. Derimod er den mekaniske pumpe nemmere at installere og drive (Chisti, Y. 2007 s. 299).

Mikroalgerne kan tage skade af høje væskehastigheder og høj turbulens pga. forskydningsspændingen, som betyder at trykket uden om algen bliver meget højere end trykket inde i algen, og forskydes den, kan algen ikke modstå trykket og vil kollapse. (Richmond, A. s, 203)

Men der er flere grunde til, det er vigtigt at blande kulturen. Blandt andet gøres det for at forhindre algerne i at kolonisere sig, for at fordele næringen og CO₂, samt for at fjerne den dannede O₂. En anden vigtig grund er at give algesuppen et bestemt flow, så algecellerne udsættes for lys og mørke af tilstrækkelig varighed. Det er især vigtigt at sørge for at algerne er ligeligt fordelt så de ikke skygger for hinanden og derved udnytter lyset bedst muligt (Ugwu, C.U. s 4024). Den flydende gennemstrømning af kulturen og miksning influerer på den gennemsnitsstråling som algerne udsættes for.

Miksning af kulturen skal altså tilpasses så der sker en gasudveksling, og modvirkning af sammenklumpning af algerne, samtidig med at det skal kunne cirkulere algerne mellem belyst og ikke belyste områder (lys mørke zoner, se næste afsnit), uden at der sker skader på algerne.

Lys og mørke zoner

En af de væsentligste faktorer for at optimere produktionen af alger er tilgængeligheden af lys, og vekselvirkningen mellem lys og mørke i reaktoren.

Når de fotosyntetiske mikroalger bliver belyst med en stigende lysintensitet vil vækstraten øges, det kan ses på grafen nedenfor. Graf 1 viser lysintensiteten ud af x-aksen og vækstraten op ad y-aksen.

Som det ses, vil kurven for vækstraten først være tilnærmelsesvis lineært stigende, men efter en vis tid når mætningsniveauet. Når mætningsniveauet er nået, vil alt ”overskydende” lys der tilføres algerne føre til en fothæmning, hvilket vil give udslag som fald i vækstraten.

(Fingerman, M. et al. S. 47).

I en kontinuert produktion afhænger biomassens specifikke vækstrate, μ , af den gennemsnitlige lysintensitet, I_r . Denne afhængighed kan modelleres med følgende funktion:

$$\mu = \frac{\mu_{\max} \cdot I_{av}^n}{I_k^n + I_{av}^n}$$

(Molina, E. s 117).

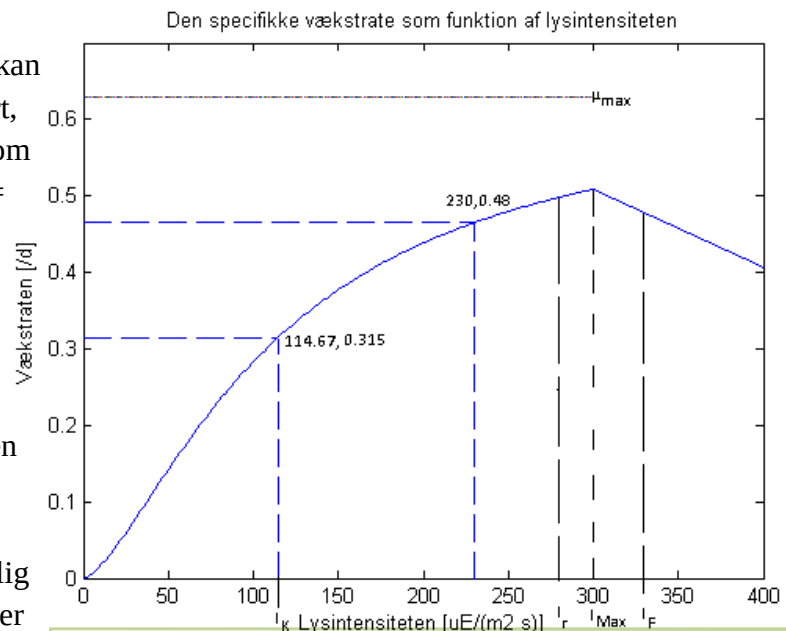
Hvor $\mu_{\max}$ = maximale vækstrate, som kan bestemmes eksperimentelt for den enkelte algeart, I_{av} er den gennemsnitlige lysintensitet, som algerne modtager og I_k er lysintensiteten ved $\mu = \frac{1}{2}\mu_{\max}$.

I_k , $\mu_{\max}$ og n er artsspecifikke parameter som kan fastsættes ved lineær regression af eksperimentelle data. n vil ligge mellem 1 og 2. Graf 1 viser en principskitse af grafen for en funktion med $n = 1$

Ved teoretiske beregninger vil μ aldrig blive lig $\mu_{\max}$, da $\mu_{\max}$ er en asymptote til grafen. Der skal derfor skelnes mellem teori og virkelighed, da man reelt godt kan opnå en maksimal vækstrate.

Lysmætningen karakteriseres ved en lysmætningskonstant I_k , som er lysintensiteten, når væksthastigheden har opnået halvdelen af sin max værdi ($\mu = \frac{1}{2}\mu_{\max}$).

Lysintensiteten er altså en vigtig begrænsende faktor for biomasseproduktionen. Mikroalgers lysmætningskonstant er meget lavere end sollysets max intensitet midt på dagen. Når



Graf 1, I_r er lysintensiteten lige før fothæmningen træder ind, hvor I_F er lige efter $I_{\max}$ er den maksimale lysintensitet, algen kan klare før fothæmning

lysintensiteten kommer over mætningsniveauet sker der det, som kaldes fotohæmning, hvilket vil sige, at vækstraten falder, da den fotosyntetiske ydeevne reduceres.

Der er en meget lille forskel på værdien, hvor vækstraten er på sit højeste, til intensiteten hvor fotohæmningen begynder (Christi, Y. s.302). Udfordringen rent teknologisk ligger altså i at opnå en lysintensitet mellem I_r og I_F , helst så tæt på I_{max} (lysintensitet når μ_{max}) som muligt, sådan at den optimale vækstrate, der er i dette interval opnås. Dette bliver sværere at opnå jo mindre intensitetsintervallet er.

Lys er en af de vigtigste faktorer ved algedyrkningen, og det har længe været anerkendt, at fotoautotrofe celler kun kan anvende stærkt lys, hvis de er udsat for dette med mellemrum (der er lavet forsøg i de sidste 50 år (Burlew J.S)). Hvis cellerne udsættes for kontinuerligt stærkt lys øges risikoen for fotohæmning, dette vil selvfølgelig gerne undgås. Derfor har man fundet to betydelige metoder for at give algerne en uregelmæssig belysning. Den ene metode indebærer brugen af en lyskilde eller et system, der sørger for en spredt belysning. Denne metode menes kun at være anvendelig for lave celledensiteter, hvor cellerne ikke skygger for hinanden, og er ubrugelig for massekulturer og når en høj produktivitet søges. Den anden mulighed er den eneste realistiske i praksis. Her anvendes en uafbrudt lyskilde, og i stedet for at det er lyskilden, der giver uregelmæssig belysning, bevæges cellerne mellem belyste og ikke belyste områder. Formålet med at give algerne en pause fra belysningen, er at algerne får en mulighed for at reparere de fotoforårsagede skader. Samtidig er det sandsynligt, at de kan optage mere lys ved denne metode, og dermed lave mere fotosyntese (Janssen, M. et al. 2000 s. 226).

Vi har ikke kunne læse os frem til hvordan disse to modeller forgår i praksis. Men der henvises til at det kun er den sidste metode, med en uafbrudt lyskilde, som bruges i produktionen. Der var heller ingen henvisning til forsøg med modellerne (Richmond, A. s. 139.), men det kunne være interessant at vide, hvordan disse mørke zoner laves rent teknisk.

Man kunne dog forstille sig, at mørke zoner i fotobioreaktorer, dyrket udendørs, blev lavet ved at dele af reaktoren blev afdækket, så lyset ikke kan trænge igennem. Dette ville også kræve nogle beregninger for hvor lange disse zoner skal være samt flowet i reaktoren, for at algerne opholder sig optimalt i hhv. de mørke og belyste zoner.

Man har dog ved flere forsøg (Janssen, M et al. 2000s 226) fundet ud af at tiden algen skal opholde sig i de mørke zoner ikke må overstige 20 % af cyklustiden, for at opnå højeste udbytte, og hvis den når 50 % vil effekten falde. Længden af lys-mørke cykler er også undersøgt, og det er resulteret i at cyklusser på 10-100 s har haft den største effekt. En nærmere biologisk forklaring på, hvorfor det netop er disse intervaller, der er gunstige på forsøgsbasis, gives ikke (Janssen, M et al. 2000 s 226). Her ville det have en yderst gavnlig effektiv på produktionen, hvis man kunne forklare disse intervaller biologisk, og lave modeller for hvor lang tid og hvor lange mørke zonerne skulle være for en fotobioreaktor.

I gennemgangen af de væsentlige og generelle design kriterier af fotobioreaktorerne kan man slutte, at det er et behov for at få belyst visse dele af algens biokemiske processer for at kunne optimere reaktorerne. En fuld naturvidenskabelig forståelse af fotohæmning, varigheden og længden af mørke zoner ville kunne have en stor indflydelse på den teknologiske udvikling af fotobioreaktorerne.

Det er muligt at der findes en klarere naturvidenskabelig beskrivelse af fotohæmning i alger, men efter de artikler vi har læst, virker det ikke som om, at de forskere der beskæftiger sig med produktion af algebaseret biodiesel, ikke selv har en helt klar forståelse af fotohæmnings indvirkning på algen. Et bedre samspil mellem biologer og ingeniører, til design af reaktorerne, ville måske kunne udvide viden om designet af reaktorerne.

For bedre at kunne forstå problemerne ved reaktorerne, gennemgår vi tre væsentligste benyttede reaktorer, og angiver derefter hvilke problemer der er med hver af de tre reaktortyper.

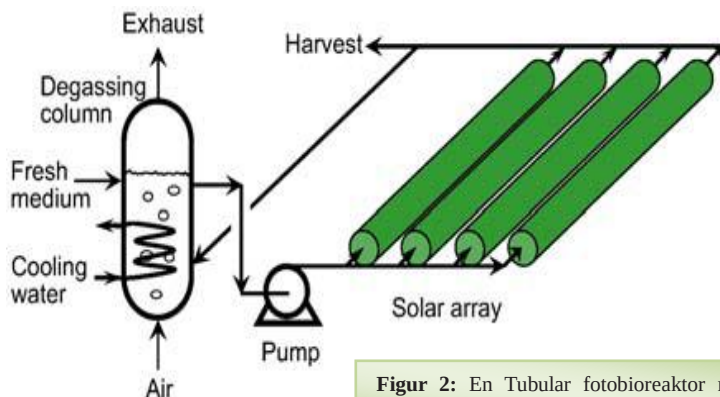
Beskrivelse af reaktorerne

Vi har valgt at have fokus på tre forskellige lukkede fotobioreaktorer, Tubular fotobioreaktor, Vertical column fotobioreaktor og Flat Panel. Baggrunden for disse tre er, at der findes mest nyt materiale og analyse om disse tre i forskningslitteraturen, og at de vurderes til at have det største potentiale til produktionen af biodiesel i stor skala.

Lukkede fotobioreaktorer inddeles i to overordnede grupperinger, den ene omhandler reaktorens fysiske opbygning, de kan f.eks. være flade, rørformede eller horisontale. Den anden omhandler den driftsmæssige funktion, vedrørende valget af pumpe og antallet af faser (om der både er gas og vandfase i reaktoren.) Disse muligheder kan kombineres på mange måder, hvilket giver et stort antal forskellige reaktorer (Richmond, A., s. 183).

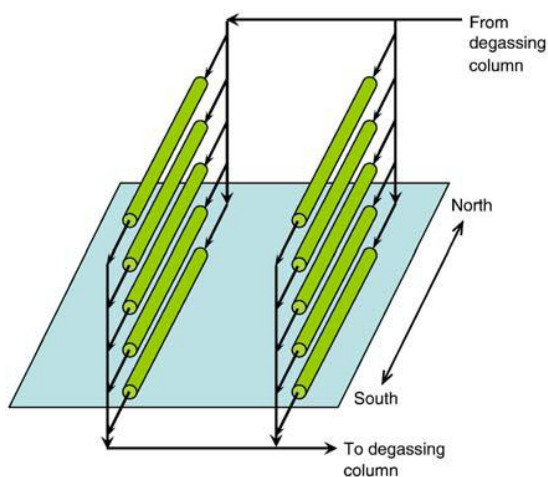
Tubular fotobioreaktor

Tubular(rørformet) fotobioreaktor består af flere lige transparente rør, de fleste er bygget af glas eller plastik, som er forbundet i en serie med U-bøjninger (kaldet fotostadiet). Algekulturen opholder sig i fotostadiet(kaldet solar array på figur 2), og det er her lyset optages af algekulturen, og fotosyntesen finder sted:



Figur 2: En Tubular fotobioreaktor med parallel løbende horisontale rør. (Chisti, Y. 2007 s. 298)

Fotostadiets rør er generelt 0,1 m eller mindre i diameter. Rørenes diameter er begrænset, fordi lyset ikke kan trænge dybt ind i en tæt algekultur, hvilket er nødvendigt for at sikre sig en høj biomasse produktion (Chisti, Y. 2007 s. 298).



Figur 3: Horizontal. (Chisti, Y. 2007 s. 298)

Fotostadiet er orienteret, så lyset udnyttes maksimalt. Der er mange måder denne reaktor kan se ud på, men de mest typiske er som vist på figur 2 og 3, hvor rørene enten ligger spredt ud, eller hængene over hinanden. Men man kan også lave dem ved at sno rørene rundt, som vist

på figur 4. Det hedder en helical Tubular fotobioreaktor.



Figur 4. 1000 L helical Tubular Fotobioreaktor. (Chisti, Y. 2007 s. 298)

Helical fotobioreaktor udnytter areal mæssigt bedst muligt, men bruges potentielt kun til mindre algedyrkninger. Det hænger sammen med at længden af rørene er så lange, at det gør det sværere at fordele CO_2 samt fjerne O_2 . Til dyrkning af alger til biodiesel med Tubular Reaktorerne

benyttes som oftest den horisontale (Chisti, Y. 2007 s. 299).

I fotostadiet skal der ske en gasudveksling, da algerne optager CO_2 som led i fotosyntesen og afgiver biproduktet O_2 .

Samtidig skal der også tilsættes næring, som NO_3^- (nitrat) og P (fosfor) til kulturen. Gasudveksling og nærings tilsætning foregår normalt i en separat beholder, udluftnings beholderen (degassing column se figur 2). Cirkulationen mellem fotostadiet og gasudvekslingen sker med enten en mekanisk pumpe eller en Airlift pump.

En Tubular fotobioreaktor drevet af en Airlift pump er vist på figur 2. Airlift søjlen cirkulerer algesuppen gennem fotostadiet. Cirkulationen fører væsken til degassing column hvor separationen af O_2 fra væsken sker, da O_2 gassen her kan stige op og ud af systemet, og derved ikke føres tilbage til fotostadiet.

U-bøjningerne i fotostadiet er designet, for at optage tilstrækkeligt med sollys, men har også til formål at forøge modstanden til algesuppegennemstrømningen, hvilket giver en langsommere gennemstrømning af algerne gennem fotostadiet. Den langsommere gennemstrømning giver algerne mere tid til at formere sig og derved øge biomassen. Det kan dog også have en negativ effekt, da der skal bruges mere energi på at få den samme gennemstrømning af algesuppen, når den har U-bøjninger, end hvis det bare var et langt rør (Molina. E s116).

Ved valget af Tubular reaktoren vil et af de problemer man støder på, være ophobningen af O_2 . Dette begrænser længden af reaktorens kontinuerlige rør til max at være 80 m. Algerne kan ikke have en længere cirkulation før de er nødt til at vende tilbage til degassing zonen, så O_2 kan separeres fra. (Chisti, Y. 2007 s.299) For at holde O_2 indholdet under det kritiske niveau kræver det indførsel af korte loops eller høj flow hastighed, og dette kan give problemer da de korte loops sænker farten på flowet (Rubio, C. et al. (1999)). Andre problemer er at reaktoren kræver et stort landareal, har en vis grad af vægvækst, forurening og at der sker en ændring af pH. Mens fordelene ved tubular er et stort belysningsoverflade areal, hvilket gør den god til udendørs dyrkning, og man kan opnå en rimelig produktivitet for lave omkostninger. (Ugwu, C.U 2008 s. 4022)

Flat panel

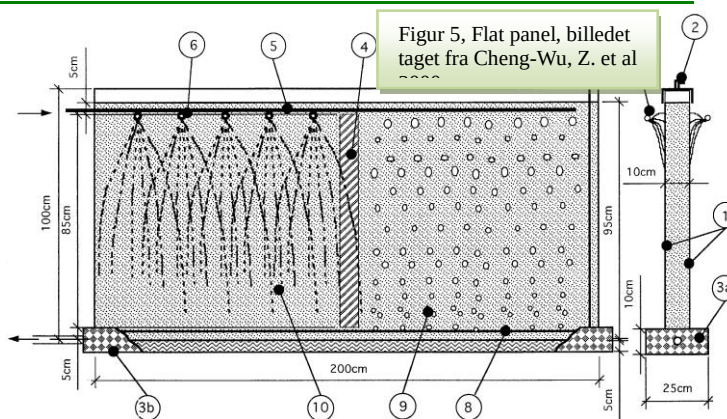
Flat panel reaktorer er simple, gennemsigtige flade kamre af forskelligt mål, og kan placeres med en hældning passende til solens position, dvs. de både kan opsættes vertikalt, horisontalt eller skråt. Reaktorerne kan laves enten af plastik materiale eller af glas. Glas er mere gennemsigtigt og mere modstandsdygtigt for vejr og vind end plastik er. Plastik materialerne kan også komme til at lække, mens glas flat panel kan have ulemper som overdreven vægt, og er også dyrere at anvende. (Fingerman, M. s. 322 og Richmond, A s. 193).

Generelt har Flat Panel et stort belysningsoverflade areal, så de kan optage store mængder sollys, og ligesom Tubular er de egnet til udendørs algedyrkning. Dyrkningen foregår på nogenlunde samme måde, som beskrevet for tubular reaktorer. Miksing i denne reaktor opnås ved lufttilførsel gennem et gennemhullet rør, som ligger langs bunden.

Forskningsforsøg med Flat Panel udført i Italien, Tyskland og Israel indikerer, at Flat Panel er mest lovende, når de er placeret vertikalt (Richmond, A. s. 192), og luftbobler kan benyttes, får at opnå effektivt miksning og afgasse kulturen.

Der er flere begrænsninger ved at vælge denne reaktor form; når produktionen skal ske i stor skala, kræver det mange kamre og det er svært at kontrollere dyrkningstemperaturen. De mange kamre vil også øge alge koloniseringen, som skal forhindres og derfor øger man turbulensen hvilket øger risikoen for der kan ske skade på algecellerne (Ugwu C.U. s. 4022).

Fordele ved Flat Panel er, at der er lav O_2 ophobning sammenlignet med horisontale tubular reaktorer (Ugwu, C.U. s. 4023), og der kan opnås en god produktivitet for lave omkostninger, samtidig er den god til at fordele algerne, så der ikke sker sammenklumpning, og er nem at rengøre.



Vertical column fotobioreaktor

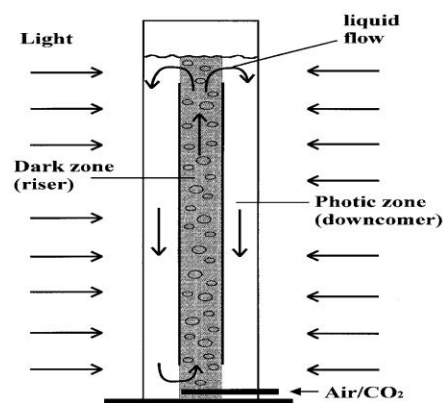
Denne type reaktorer kan laves på tre forskellige måder; som en boble kolonne (bubble coulumn), en koncentrisk airlift (se figur 6) eller split cylinder airlift. (Fingerman, M. s. 323)

Vi vil kun gennemgå den koncentriske airlift, men reaktorerne minder i høj grad om hinanden.

Luften tilføres nedefra og belyses gennem de transparente vægge, men de kan også belyses indefra af lyskilder. Denne reaktor giver mulighed for effektiv miksing og kontrollerede vækst forhold. (Eriksen N.T., s. 1526).

Når reaktoren er opbygget med en indre koncentrisk cylinder, kan algesuppen cirkulere mellem det indre af den koncentriske cylinder og rummet mellem cylinderen og reaktorens væg, dette giver algesuppen et ordnet cyklisk flow mellem oplyste og mørke zoner (den indre cylinder) i reaktoren. Den koncentriske cylinder i reaktoren kan fungere som et luftrør, hvor CO_2 bobles ind i reaktoren og giver et flow op gennem det indre rør, og ned gennem det ydre, hvor boblerne aftager, se figur 4. Det kan også foregå i den modsatte retning, omvendt af figur 4. Dette giver et regelmæssigt væskeflow, hvilket medfører en bedre lys/mørke cyklus og en bedre miksing (Ranjbar, R s. 204)

Column reaktorerne giver en god miksing af kulturen med en lav forskydningsspænding og de er nemme at forstørre. Men når dette gøres mindskes det i forvejen lille belyningsareal, hvilket gør at deres anvendelse udendørs er begrænset. (Ugwu C.U. s. 4022) Ophobningen af O_2 er begrænset (Richmond, A. s. 208) og risikoen for ftohæmning og fotooxidation er reduceret ⁵. (Ugwu C.U s. 4022) De er nemmere at sterilisere og energiforbruget ved produktionen er lavt.(Ugwu C.U s. 4022).



Figur 6, viser en koncentrisk airlift. CO_2 bobles ind i mørke zonen, og skaber derved et flow. (Janssen, M et al. 2000 s. 226)

⁵ Oxidation underpåvirkning af lys

De overordnede fordele og ulemper ved reaktorerne har vi samlet i tabel 2 nedenfor.

Tabel 2

Reaktortype	Fordele	Ulemper
Tubular fotobioreaktor		
	Stor belysningsoverflade	Kræver stort areal
	God produktivitet	Begrænset længde på rørene
	Relativ billig	O ₂ ophobning
	Fordeler algerne godt	
	Nemt at skabe lys/mørke zoner	
Flat panel fotobioreaktor		
	Stor belysningsoverflade	Stor vægt på lille areal
	God produktivitet	Svært at kontrollere temperatur
	Fordeler algerne godt	Alger sætter sig på fladerne og skygger
	Lav O ₂ ophobning	Mange rum, gør det svært at forstørre reaktoren
	Rimelig solid	Svært at skabe lys/mørke zoner
Column fotobioreaktor		
	Lav oxygen ophobning	Ikke stort belysningsareal
	God gasudveksling	Kræver avancerede materialer
	Fordeler algen godt	God med kunstigt belysning
	Lavt energiforbrug	For høj turbulens
	Potentiale for at skalere op	Lysintensiteten falder hvis man skalerer reaktoren op
	Reduceret fotohæmning	

Areal til at dække Danmarks transportsektor

I dette afsnit, vil vi ud fra en Tubular fotobioreaktor, give et bud på hvor stort et areal Danmark skal afsætte for at kunne dække hele det danske brændstof forbrug, med algebaseret biodiesel.

Det mest optimale ville have været hvis vi kunne lave nogle beregninger ud fra et forsøg med en reaktor beliggende i Danmark. Men vi har ikke kunnet finde nogen danske forsøg med produktion af alger til biodiesel, så i stedet for har vi set på en del udenlandske artikler, for at få nogle forsøgsresultater og modeller at lave beregninger ud fra.

I flere af de artikler vi har læst har der været bud på potentialer for produktion af biodiesel. Det har dog været nødvendigt at være kildekritiske overfor disse, da der i flere tilfælde har manglet referencer til de anførte udbytter og ligeledes forklaringer på, hvorledes udbytterne er fremkommet. Dette har bl.a. været tilfældet i artiklen af Chisti (2007), i hvilken han angiver tabeller over algers potentiale i forhold til andre olieholdige afgrøder, uden at redegøre for hvor disse tal kommer fra. Vi har været kritiske mod disse data, da vi for at kunne vurdere algepotentialer realistisk er nødt til at vide, hvorfra dataene stammer.

Vi valgte derfor forsøgsdata fra artiklen Molina(2001) fra Spanien, som udgangspunktet for vores beregninger. I artiklen beskrives forsøget bag produktionen og resultatet angives. Dette udbytte var højere end i andre artikler vi har læst (f.eks. Fernández et al. 2001).

Vi ”placerede” produktionsanlægget fra Molinas (2001) artikel, i Danmark. På baggrund af dette ville vi kunne give en vurdering af, om det ville være fordelagtigt for Danmark at satse på en alge produktion eller om der skal findes en anden vedvarende energikilde til at dække forbruget.

Forsøget forgik i Spanien, og mikroalgen *Phaeodactylum tricornutum* blev dyrket i en Tubular fotobioreaktor. Det betyder imidlertid også at vækstbetingelserne var svære at opfylde for samme alge i Danmark. Der er f.eks. forskel i lysintensitet og temperatur som skal tages højde for, når vi omregner dette til danske forhold.

De eksperimentelle data som vi regner videre med, ud fra det spanske forsøg er, koncentration af algekulturen og reaktorens størrelse.

Vi skal derfor finde den danske lysintensitet og antallet af måneder hvor temperaturen er høj nok til at algen kan leve her, for at udregne hvor stor en produktivitet vi ville få i Danmark.

Fra forsøget i Spanien får vi angivet 5 målinger, fra 5 dage over en periode fra juli til april. Det angives ikke om produktionen har forløbet i hele denne periode eller hvorfor der kun er angivet lige disse 5 måledata.

Målingerne er meget svingende, men vi har valgt den højeste produktivitet, opnået den 31/7, se

tabel 3. Vi går ud fra at forsøget i Spanien vil optimere reaktoren efter den højeste produktivitet.

Forsøget er udført med en 200 L Tubular Airlift reaktor, over et areal på 12m² i hovedstaden i Andalusien, Almeria, i Spanien (36°50'N, 2°27'W). *Phaeodactylum tricornutum* blev dyrket ved en temperatur på 20±2°C.

Reaktoren var placeret udenfor, og det var derfor ikke muligt at justere sollysets intensitet, hvilket gjorde at algen blev udsat for en masse forskellige lysintensiteter.

Nedenfor angives tabel 3 fra Molina (2001) med de fem målinger. De eneste to målinger vi er interesseret i at se på er koncentrationen C_b og produktiviteten pr areal P_{bv} for 31/7.

Dato	D (h ⁻¹)	U _L (m·s ⁻¹)	I _w (μE·m ⁻² ·s ⁻¹)	C _b (g·l ⁻¹)	P _{bv} (g·l ⁻¹ ·d ⁻¹)	P _{ba} (g·m ⁻² ·d ⁻¹)
24/7	0.037	0.40	2690	4.10	1.52	25.3
31/7	0.048	0.40	2596	3.96	1.90	31.7
5/8	0.061	0.40	2548	2.70	1.65	27.4
30/3	0.050	0.50	1289	2.38	1.19	19.8
5/4	0.050	0.35	1126	2.29	1.15	19.1
8/4	0.050	0.17	1250	—	—	—

Tabel 3 fra Molina (2001), s. 124, angiver dataene for: væksthastighed D, væskehastighed U_L, lysintensitet I_w, biomasse koncentrationen C_b, produktiviteten pr areal P_{ba} og produktiviteten pr volumen, P_{bv}.

For at finde hvor stort et areal vi skal have, for at dække Danmarks transportsektor med biodiesel, skal vi finde, hvor stort et biomasse udbytte der kan opnås pr. areal.

Vi skal derfor først finde P_{bv}, produktiviteten af biomassen målt i gram pr. liter pr. dag (g l⁻¹ d⁻¹). P_{bv} kan beregnes ud fra den specifikke vækstrate (μ) og biomassekoncentrationen (C_b):

$$P_{bv} = \mu \cdot C_b \quad (1)$$

Vækstraten μ beregnes ud fra formelen:

$$\mu = \frac{\mu_{max} \cdot I_{av}^n}{I_k^n \cdot I_{av}^n} \quad (2)$$

$\mu_{\max}$, I_{av} , I_k og n er, i artiklen, bestemt eksperimentelt – hvordan de er bestemt får vi dog ikke oplyst. Disse værdier er angivet i tabel 4

Tabel 4.

Parametre	Værdi
λ	1.1
$U_b (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	0.4
n	1.49
n_T	1.5
$\mu_{\max} (\text{h}^{-1})$	0.063
$I_k (\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	114.67
$K_a (\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$	0.0369

side 130 i (Molina 2001).

Ud fra vækstraten μ kan vi regne produktivitet P_{bv} ud fra ligning (1). Denne produktivitet P_{bv} kan omregnes til antal gram pr. areal pr. dag (P_{ba}). Dette gøres ved at gange med forholdet mellem volumen og arealet af reaktoren, og det giver:

$$P_{ba} (g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}) = \frac{\text{Volumen}(L)}{\text{Arealet}(m^2)} \cdot P_{bv} (g \cdot l^{-1} \cdot d^{-1}) \quad (3)$$

Det fremgår tydeligt, at forholdet mellem volumen og arealet har en stor betydning for udbyttet i gram pr. kvadratmeter pr. dag. Jo højere dette forhold er jo højere udbytte pr areal opnås.

For at kunne vurdere, hvor stort et areal, det ville kræve at lave en produktion der kan erstatte brugen af fossile brændstoffer i Danmark, skal forbruget af benzin og diesel fra Danmark kendes. Vi laver først beregninger med benzinforbruget og derefter med diesel, da energiniveauet i disse to brændstoffer ikke er lige høje.

Energiudbyttet for biodiesel, der kan produceres pr. km^2 pr. år (E_{ub}), findes ved at tage antal dage reaktoren kører i (t), ganger det med: algens olieprocent indeholder(O), energiindholdet i biodiesel pr. kilo(E_{mb}), produktiviteten er pr. km^2 pr. dag(P_{ba}) og det udbytte af olie man kan få af den udvundne olie(u), således ser det ud:

$$E_{ub} = t \cdot O \cdot E_{mb} \cdot P_{ba} \cdot u \quad (4)$$

Årlig energi forbrug af benzin(E_{ab}) findes ved at tage det årlige forbrug af benzin(b_{dk}), ganger det med densiteten for benzin(d_b) og energi niveauet i benzin(E_b), således:

$$E_{db} = b_{dk} \cdot d_b \cdot E_b \quad (5)$$

Årlig energi forbrug af diesel(E_{dd}) findes ved at tage det årlige forbrug af diesel(d_{dk}), ganger det med densiteten for diesel (d_d) og energiniveauet i diesel(E_d), således:

$$E_{dd} = d_{dk} \cdot d_d \cdot E_d \quad (6)$$

Ligges ligning (5) og (6) sammen får vi det årlige energiforbrug i transportsektoren. Det skal sammenlignes med energiudbyttet af biodiesel, for at finde ud af hvor stort et areal, vi skal bruge i Danmark for at dække hele transportsektoren med biodiesel.

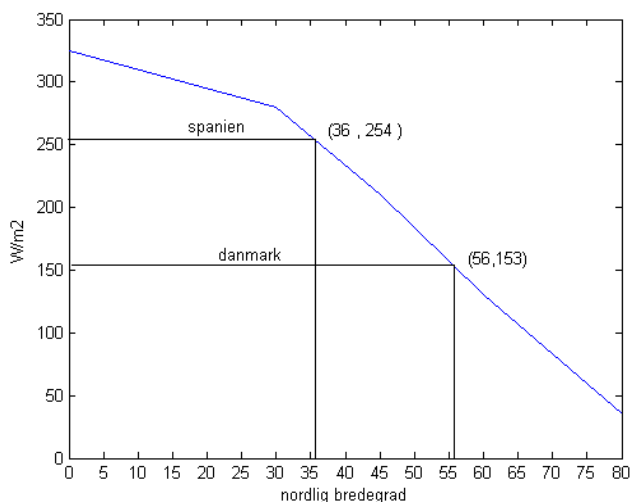
Inden vi går i gang med beregningerne, skal vi kende den lysintensitet algerne bestråles med i Danmark. Flowet i reaktorerne gør, at algerne udsættes for samme gennemsnitlige lysintensitet. Den gennemsnitlige lysintensitet som algerne bestråles med er ikke den samme som den lysintensitet solen bestråler reaktoren med. Det lys som rammer reaktoren bliver nemlig afbøjet og reflekteret inden det rammer algekulturen. Vi skal derfor finde den gennemsnitlige lysintensitet, som algerne bestråles med, og den kan vi ikke slå op for Danmark.

I forsøget i Spanien havde de målt den lysintensitet algekulturen optog.

Vi finder lysintensiteten algerne udsættes for ud fra forholdet mellem lysintensiteten i Danmark og lysintensiteten i Spanien. Dette forhold må nemlig være det samme forhold som algekulturen optager lyset med i Danmark og som algekulturen optager lyset med i Spanien.

Nedenfor er afbildet graf 2, der viser hvilken middelværdi lysintensiteten har ved forskellige breddegrader. Grafen er lavet ud fra W. Dansgaard (1987).

Vi kan gå ind og aflæse hvilken middelværdi lysintensiteten er for Danmark, da Danmarks breddegrad er 56 nordlig breddegrad, og Spanien (Almeria i Andalusien) har en på 36 nordlig breddegrad. Det giver Danmark en lysintensitet på $765 \mu E m^{-2} s^{-1}$, og Spanien en lysintensitet på $1270 \mu E m^{-2} s^{-1}$.



Graf 2, (Dansgaard W. s 12)

Der går $1 W/m^2$ på $5 \mu E m^{-2} s^{-1}$ (interscience).

Vi aflæser på graf 2, at den spanske lysintensitet til $254 W/m^2$, og det giver en lysintensitet på $1270 \mu E m^{-2} s^{-1}$. For Danmark aflæses en lysintensitet på $153 W/m^2$ og det giver en lysintensitet på $765 \mu E m^{-2} s^{-1}$.

Forhold imellem lysintensitet i Danmark og i Spanien er givet ved:

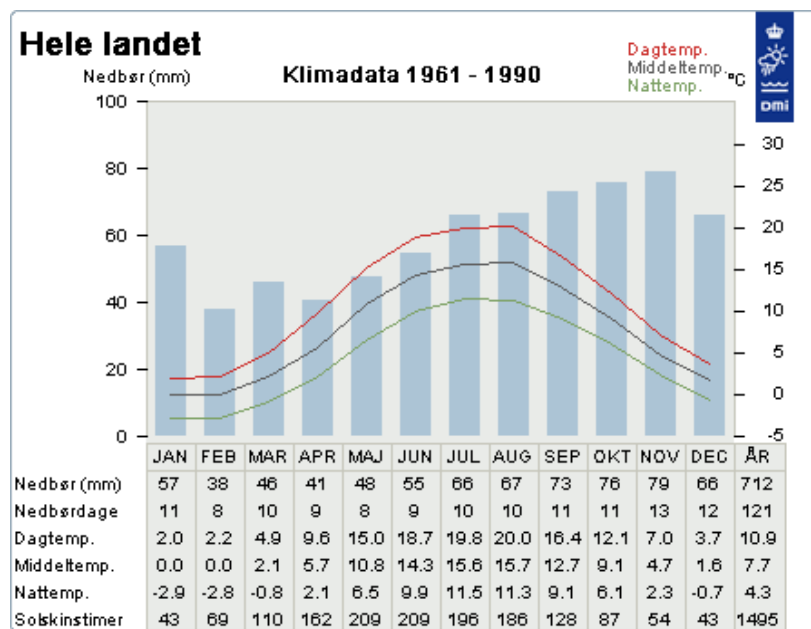
$$\frac{1270 \mu E \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}}{765 \mu E \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}} = 1.66$$

Dvs. når forsøget i Spanien har en lysintensitet på $230 \mu E m^{-2} s^{-1}$, som rammer algekulturen, bliver den samme algekultur, i Danmark ramt af en lysintensitet på:

$$\frac{230 \mu E \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}}{1.66} = 138.5 \mu E \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$$

For at kunne beregne produktiviteten i Danmark skal vi også kende, hvor mange dage produktionen kan køre. Ud fra nedenstående skema kan vi se, at vi i Danmark har 3 måneder, hvor dagstemperaturen er over $18^{\circ}C$, og hvor algen *Phaeodactylum tricornutum* ville kunne dyrkes. Dette betyder, at der ville være ca. 100 dage om året, reaktoren ville kunne producere biomasse.

Figur 8



(kilde: DMI Klima)

De tre måneder vi ville kunne køre produktionen i, er juni, juli og august, og det giver i gennemsnit 6,5 solskinstimer pr dag i de tre måneder.

Den eksperimentelle vækstrate er derfor angivet i timer (se tabel 4). Vi omregner μ_{max} til antal dage ved at gange med 6,5:

$$\mu_{\max} = 0,063 \text{ h}^{-1} \cdot 6,5 \text{ h d}^{-1} = 0,409 \text{ d}^{-1}$$

Vi får derved en vækstrate, ud fra ligning (2), på:

$$\mu = \frac{0,409 \cdot \text{d}^{-1} \cdot (138,5 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})^{1,49}}{114,67 \text{s}^{-1} \cdot (138,5 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})^{1,49}} = 0,233 \text{ d}^{-1}$$

Derefter udregner vi så produktiviteten pr. volumen P_{bv} , ved hjælp af ligning (1), og en koncentration på $3,96 \text{ g l}^{-1}$, som vi for oplyst i tabel 4.

$$P_{bv} = \mu \cdot 3,96 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1} = 0,233 \text{ d}^{-1} \cdot 3,96 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1} = 0,923 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$$

P_{bv} omregnes til produktiviteten pr areal P_{ba} . Dette gøres ved hjælp af ligning (3).

$$\begin{aligned} P_{ba} &= \frac{200 \text{ L}}{12 \text{ m}^2} \cdot P_{bv} = \frac{200 \text{ L}}{12 \text{ m}^2} \cdot 0,923 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{d}^{-1} = 15,383 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1} \\ &= 15383 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{d}^{-1} \end{aligned}$$

Produktiviteten P_{ba} bruger vi til at beregne det årlige energiudbytte for biodiesel. Energiindholdet i biodiesel angives til at være $37,2 \text{ MJ/kg(physics)}$.

Olieindholdet for den valgte alge, *Phaeodactylum tricornutum*, ligger mellem 20-30 % af biomassen (Christi 2007). Vi beregner ud fra de mest optimale forhold, og vælger derfor olieindholdet med 30 %, men angiver også resultaterne ved 20 % og 25 % i Tabel 6.

Derudover skal det medregnes, at man kun kan få 90 % af olien ud af algen, og af denne olie, mistes 5 % ved omdannelsen til biodiesel. Udbytteprocenten ligger altså kun på 85 % (Felby).

Energiudbytte for biodiesel pr år udregnes ved hjælp af ligning (4)

$$E_u = 100 \frac{\text{d}}{\text{år}} \cdot 0,30 \cdot 37,2 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \cdot 15383 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{d}^{-1} \cdot 0,85 = 1,459 \cdot 10^7 \frac{\text{MJ}}{\text{km}^2 \cdot \text{år}}$$

Nu kendes energiudbyttet af biodiesel der kan opnås pr. km^2 pr. år. Dette sammenlignes med det årlige energiforbrug af fossilt brændstof for at finde arealet, der skal bruges til at dyrke biomassen svarende til dette forbrug. Da energiniveauet i benzin og diesel er forskelligt beregner vi først arealet der skal bruges for at dække benzin forbruget og derefter arealet for at dække diesel forbruget.

Det årlige benzin forbrug i Danmark er $2,4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ (Oliebranchen Benzin), energiniveauet i

benzin er 42,9MJ/kg og densiteten på motorbenzin er 0,729g/cm³(Physics).

Det årlige benzinforbrug omregnes til et årligt energiforbrug:

Først omregnes forbruget til cm³, fordi densiteten er opgivet i g. pr. cm³

$$\frac{2,435 \cdot 10^6 \frac{m^3}{\text{år}} \cdot 10^6 cm^3}{1m^3}$$

Derefter ganges der med densiteten og energiindholdet pr kg får at opnå en værdi for energi af benzin forbruget pr år:

$$E_{\text{ab}} = 2.435 \cdot 10^{12} \frac{cm^3}{\text{år}} \cdot 0.729 \cdot 10^{-4} \frac{kg}{cm^3} \cdot 42.9 \frac{MJ}{kg} = 7.615 \cdot 10^{10} \frac{MJ}{\text{år}}$$

Det betyder, at før vi kan dække det danske benzin behov, skal der produceres en mængde biodiesel svarende til 7,615·10¹⁰ MJ/år.

Det årlige autodiesel forbrug i Danmark er på 2970082m³(Oliebranchen gasolie), energiniveauet er på 41,9MJ/kg(Strandgaard, E. s.173) og densiteten for autodiesel er 0,855g/cm³(Mini)

Ud fra disse oplysninger omregner vi det danske autodiesel forbrug til forbruget i energi.

Først omregnes forbruget til cm³, da densiteten er givet i g pr. cm³

$$\frac{2,970 \cdot 10^6 \frac{m^3}{\text{år}} \cdot 10^6 cm^3}{1m^3}$$

Derefter findes det årlige energiforbrug af diesel, ved brug af ligning (6)

$$E_{\text{ad}} = 2.97 \cdot 10^{12} \frac{cm^3}{\text{år}} \cdot 0.855 \frac{g}{cm^3} \cdot 41.9 \frac{MJ}{\text{år}} = 1.064 \cdot 10^{11} \frac{MJ}{\text{år}}$$

Det samlede energi forbrug i Danmark af benzin og diesel er altså på 1,83·10¹¹ MJ/år. Nu kan vi beregne hvor stort et areal det kræves at have en biodiesel produktion der svarer til dette energiforbrug.

$$\frac{1.83 \cdot 10^{11} \frac{MJ}{\text{år}}}{1.459 \cdot 10^7 \frac{MJ}{km^2 \cdot \text{år}}} = 12506.5 km^2$$

For at dække hele Danmarks brændstof forbrug(diesel og benzin), med algebaseret biodiesel, skal bruges en Turbular fotobioreaktor med areal på 12.506,5 km². Dette er vel og mærke kun hvis algen har 30 % olie indhold og vokser optimalt.

Tabel 5 viser hvor stort et areal der skal bruges, til at dække Danmarks brændstof forbrug, ved et olieindhold på 20, 25 og 30 % i algen

Tabel 5	Benzin	Autodiesel	I alt
Koncentration	3,96	3,96	
vækstrate i d⁻¹	0,233	0,233	
P(bv) i g l⁻¹ d⁻¹	0,92268	0,923	
P(ba) i g m⁻² d⁻¹	15,383	15,383	
20% olie indhold i kg km⁻² år⁻¹	307560	307560	
25% i kg km⁻² år⁻¹	384450	384450	
30% i kg km⁻² år⁻¹	461340	461340	
energi i MJ/kg ved 20 %	9,728·10 ⁶	11441232	
energi i MJ/kg ved 25 %	1,216·10 ⁷	14301540	
energi i MJ/kg ved 30 %	1,459·10 ⁷	17161848	
reaktor areal for at dække DK energi i km² ved 20 %	7827,7	10937.1	18764.8
reaktor areal for at dække DK energi i km² ved 25 %	6262,1	8749.7	15011.8
reaktor areal for at dække DK energi i km² ved 30 %	5218,5	7291.4	12509.9

For at sammenligne arealet af anlægget lagt i Danmark med anlægget lagt i Spanien, har vi også beregnet hvor stort arealet ville blive i Spanien, hvis vi skulle dække Danmarks brændstof behov. Vi gennemgår ikke beregningerne, da de er det samme som for Danmark. Men resultaterne ses i tabel 6.

Tabel 6	Bedste forsøg i Spanien af benzin	$\mu_{\max}$ Benzin	Bedste forsøg i Spanien af Autodiesel	$\mu_{\max}$ Autodiesel
Koncentration	3,96	3,96	3,96	3,96
vækstrate i d^{-1}	0,48	0,63	0,48	0,63
P(bv) i $g\ l^{-1}\ d^{-1}$	1,9	2,494	1,9008	2,4948
P(ba) i $g\ m^{-2}\ d^{-1}$	31,68	41,58	31,68	41,58
20% olie indhold i $kg\ km^{-2}\ år^{-1}$	$1,736 \cdot 10^6$	$2,278 \cdot 10^6$	$1,736 \cdot 10^6$	$2,278 \cdot 10^6$
25% i $kg\ km^{-2}\ år^{-1}$	$2,170 \cdot 10^6$	$2,848 \cdot 10^6$	$2,170 \cdot 10^6$	$2,848 \cdot 10^6$
30% i $kg\ km^{-2}\ år^{-1}$	$2,604 \cdot 10^6$	$3,417 \cdot 10^6$	$2,604 \cdot 10^6$	$3,417 \cdot 10^6$
energi i MJ/kg ved 20 %	$5,489 \cdot 10^7$	$7,205 \cdot 10^7$	$6,458 \cdot 10^7$	$8,476 \cdot 10^7$
energi i MJ/kg ved 25 %	$6,861 \cdot 10^7$	$9,001 \cdot 10^7$	$8,072 \cdot 10^7$	$1,059 \cdot 10^8$
energi i MJ/kg ved 30 %	$8,234 \cdot 10^7$	$1,080 \cdot 10^8$	$9,687 \cdot 10^7$	$1,271 \cdot 10^8$
reaktor areal for at dække DK energi i km^2 ved 20 % olieindhold	1387	1060	2000,3	1300
reaktor areal for at dække DK energi i km^2 ved 25 % ⁶ olieindhold	1109	846	1600,2	1040
reaktor areal for at dække DK energi i km^2 ved 30 % olieindhold	924,9	705	1333,5	866

⁶ Dette tal er 4/5 af det samme areal ved 20 % olieindhold

Analyse på resultaterne

Hvis vi skulle dække hele Danmarks energiforbrug i transportsektoren, med algebaseret biodiesel, fra en produktion kørende i Danmark, skulle vi bruge et areal på $12509,9 \text{ km}^2$. Dette svarer til 111,8 km på hver led, hvilket er 29 % af Danmarks areal. Dette svarer til lidt over halvanden gang Sjællands størrelse.

Ligger vi den samme produktion i Spanien, ville det derimod kræve et areal på $2258,4 \text{ km}^2$, som er et kvadrat på 47,5 km på hver led eller 32 % af Sjælland. Arealet af produktionen i Danmark ville altså være 553,9 % gange større end produktionen lagt i Spanien.

Det er en kæmpe forskel, og viser hvor væsentlig det er, at ligge sin algeproduktion i det rigtige klima.

For alene at dække benzinforbruget, som ellers er det mindste brændstofforbrug i Danmark. Ville der i Danmark skulle afsættes et areal på $5218,5 \text{ km}^2$. Det svarer til et kvadrat med sidelængder på godt 72,2 km, eller 70 % af Sjællands areal.

Lagde man i stedet produktionen, til at dække benzinforbruget for Danmark, i Spanien, ville det kræve et areal på $924,5 \text{ km}^2$, svarende til 30,4 km på hver led.

Vi har sammenholdt resultaterne for det bedste forsøg (μ) i Spanien med den mest optimale vækstrate ($\mu_{\max}$). Men vi har ikke beregnet arealet for $\mu_{\max}$ for Danmark. Forskellen mellem μ og $\mu_{\max}$ i Spanien, svarer til et areal på 687 km^2 , det er et kvadrat på 26 km, på hver led. En optimal vækstrate giver derfor en stor forskel i anlæggets areal.

Sammenligningerne er taget ud fra et olieindhold i algen på 30 %. Ser vi på olieindhold på 20 og 25 % ville det kræve et langt større areal. Så på nuværende tidspunkt ville selv produktionen for at dække benzinforbruget, lagt i Spanien, være ret urealistisk.

Man kan altså se at vækstraten og klima er væsentlige faktorer for at forbedre udbyttet og indskrænke arealet. Flere faktorer gør sig også gældende, og dem kommer vi nærmere ind på i det næste afsnit

Afgørende faktorer for areal og udbytte

Det er interessant at se på, hvilke faktorer vi kan ændre på, for at opnå et højere udbytte ved algeproduktion i fotobioreaktorer. Det gør vi først ved at se på beregningerne og derefter ved at se på den generelle produktion.

Ser vi på biomasse pr volumen (ligning 1), giver det sig selv, at en højere koncentration af biomassen C_b , giver en højere produktion. Desværre er ulempen ved en for høj C_b , at skyggeeffekten bliver større sådan at der skal være en højere lysintensitet på reaktoroverfalden til at sikre den samme gennemsnitlige lysintensitet ved et tværsnit gennem algekulturen. Derfor er der en optimal biomassekoncentration, C_b , som selvfølgelig er specifik for reaktortype og afhængig af flowet i reaktoren og andre forhold, men som altså ikke bare kan øges uden, at det går udover vækstraten.

Vækstraten μ skal helst være så tæt på den maksimale vækstrate $\mu_{\max}$ (som er en konstant der afhænger af algetype), for at få så høj en hastighed af algevæksten som mulig.

Vækstrate er afhængig af faktorer så som den gennemsnitlige lysintensitet I_{av} , den maksimale vækstrate $\mu_{\max}$ og n , se ligning (3).

I_{av} kan vi ikke ændre, kun hvis produktionen er udsat for kunstig lys. I_{av} skal dog helst ligge omkring den lysintensitet der giver den optimale vækstrate ($\mu_{\max}$), se graf 1.

I_k skal helst være så lille som mulig, hvis produktionen skal forgå i Danmark. Det skal den være fordi den I_{av} er lille i Danmark, og $\mu_{\max}$ derfor gerne skulle kunne opnås ved lav lysintensitet.

En anden faktor vi måske kunne ændre på er udbytteprocenten. Vi taber 10 % olie, når vi presser olien ud af algen, og yderligere 5 % af udbyttet, når olien omdannes til biodiesel. Hvis vi kunne mindske disse tab, vil det selvfølgelig give en forøgelse af produktionen. Vi har ikke fokuseret på denne del af produktionsprocessen, men det er formentlig meget begrænset hvor meget spildet kan reduceres uden at omkostningerne for produktionen bliver væsentlig meget dyrere.

Antallet af solskinstimer i Danmark er en afgørende faktor i forhold til potentialet i Danmark. Som vi kan se af vores beregninger er der en faktor 5,5 til forskel i udbytte pr km imellem Danmark og Spanien. Denne skyldes både temperatur (det bestemmer produktionsperioden) og lysintensiteten (der bestemmer vækstraten) som er meget forskellige i de pågældende lande. Disse klimatiske forhold er naturligvis ikke mulige at ændre på, og derfor skal disse forhold tages i betragtning når man skal vælge alge -og reaktortype.

Valget af algetype spiller en af de væsentligste faktorer for optimering af udbyttet af biodiesel. For at kunne give en rimelig vurdering af algepotentialet i Danmark kunne det være interessant at finde de alger, der har de bedste levevilkår under det danske klima, for dernæst at se på hvilke af disse alger, der har det største olieindhold og den højeste vækstrate.

Vi har derfor forsøgt at finde en alge, som kunne være bedre egnet til en produktion i Danmark end *Phaeodactylum Tricornutum*. Det har dog ikke været muligt, da vi ikke har kunnet finde en oversigt over algerne i de danske farvande, hvor både levetemperatur og olieindhold var anført. Vi har f.eks. kigget på sccap, som er Skandinaviens hjemmeside om algetyper.

Hvis en produktionen til dyrkning af mikroalger med henblik på at producere biodiesel skulle opføres i Danmark, ville det kræve en dybtgående forskning af hvilke alger vi har i Danmark, og hvilke der ville være velegnet til dyrkning. Denne forskning virker til at ligge uudforsket hen, og det må vi påpege som en faktor der har væsentlig betydning hvis en produktion skulle opføres i Danmark.

Vi har derfor ikke været i stand til at give et nogenlunde realistisk bud på en alge, der kunne gro optimalt herhjemme.

I stedet for kan vi angive, hvilke vigtige parametre man skal have for øje, når man leder efter en alge til produktion af biodiesel.

To betydelige faktorer der afgør algevalget, er antallet af solskinstimer og dags gennemsnitstemperaturen. Da det ikke er muligt at ændre på disse, skal der derfor vælges en alge som lever vel under disse forhold.

Hvis valget af alge ikke træffes på baggrund af disse to felter kan det påvirke produktiviteten markant.

Man kunne derfor også forestille sig, det kunne være en fordel at have forskellige algetyper i Danmark afhængig af årstiden, da gennemsnitstemperaturen varierer meget i løbet af året. Man ville da have en optimal alge til hhv. sommer og vinter halvåret.

Det er svært at give en reel vurdering af, hvor lang tid en produktion ville kunne køre i Danmark. Vi kan dog ud fra tabel 4 give et bud på de vilkår en langtidsproduktion skal opfylde.

Meget optimistisk kunne vi håbe på at få en produktion i Danmark på et halvt år, cirka det dobbelte af tiden vi kunne have en produktion med den spanske alge. Da vi ved fotosyntesen og dermed olieproduktionen forløber hurtigere ved høje temperaturer end ved lave, vælger vi at se på de varmeste 6 måneder. Disse er april til oktober ved hvilke dagstemperaturerne ligger mellem 10 og 20 grader. Derfor ville valget af alge kunne leve indenfor dette interval.

Det vil dog være muligt at køle reaktoren lidt i de varmeste perioder med vand, hvis man er villig til at have lidt højere omkostninger.

Samtidig varierer solskinstimerne pr. dag mellem 2,9 timer i oktober og 6,7 timer i maj og juni. Der er selvfølgelig også lys selvom solen ikke skinner, men det giver os et pejlemærke for hvor stærk en lysintensitet og varigheden algerne bestråles med. Algen skal derfor være fleksibel mht. lysstrålingen samt temperaturen, hvis den skal dyrkes herhjemme.

Det er måske ikke særlig sandsynligt at finde en alge, som kan tilpasses fuldstændigt. Det er nok mere sandsynligt, at en produktion ville begrænse sig til de bedste sommermåneder som juni-august, hvor temperaturen og antallet af solskinstimer er nogenlunde stabilt.

Udover at finde en alge der passer godt til klimaet, er der også andre afgørende faktorer i valget af alge. En af de væsentligste er olieindholdet i algen. Det kan være lige meget at have en alge der vokser godt det meste af året, hvis den stort set ikke indeholder noget olie. Jo mere olie den indeholder jo større er udbyttet pr areal og pr tid.

En høj vækstrate er også at foretrække, da vækstraten afgør, hvor hurtigt biomassen vokser i alger.

For den ultimativ bedste produktion skal der anvendes en alge, der lever godt ved de danske temperaturer, kan klare sig med den lysintensitet vi har i Danmark og samtidig have et højt

olieindhold og vækstrate. Da dette godt kunne være en svær kombination skal der enten gås på kompromi med enten olieindholdet eller vækstraten.

Diskussion

Igennem projektet har vi forsøgt at klarlægge potentialet for produktionen af algebiodiesel i Danmark, og afdække de væsentligste teknologiske og naturvidenskabelige udfordringer, der er forbundet med at lave en stor skala produktion. Vi har baseret vores viden og argumentation på den tilgængelige forskningslitteratur på området.

Vi har blandt andet fundet ud af, at det er en relativ lille skare af forskere, der arbejder med produktionen af alger til biodiesel.

Mange af forskerne går igen i artiklerne, og de henviser mange gange til sig selv, eller til de samme kilder.

Det kunne tyde på, at der er få, som reelt tror på algers potentiale til at lave biodiesel, og det derfor er de samme forskere, som kredser om emnet. Det kunne også være et udtryk for, at der er for få forskningsmidler til området, og det begrænser antallet af forskere, der kaster sig over fremstillingen af biodiesel ud fra en algedyrkning.

Det kunne også være et oplysningsmæssigt problem, at forskerne simpelthen ikke har været gode nok til at gøre ”reklame” og promovere algedyrkningen. Som en god og vedvarende energikilde, man burde satse mere på. Det er først inden for de senere år, hvor der tales mere og mere om global opvarmning og klima forandringer, at muligheden for algebaseret biodiesel er kommet op i debatten, derfor er der heller ikke kommet mere forskningsstøtte til projekterne.

Den lille forskergruppe kan også være et tegn på, at der er en mangel på nye ideer og synsvinkler indenfor området. De artikler vi har læst, omtaler de samme reaktortyper og de samme problemer med designet af reaktorerne. Da ingen af de eksisterende reaktorer har vist sig at være ideel til storstilede produktioner kunne det tænkes, at det ville kræve en helt anden reaktortype for at få en stor produktion op og køre optimalt.

En af de negative ting ved en lille forskergruppe, syntes vi, er de manglende forklaringer i artiklerne på f.eks. fotohæmning og påvirkningen overfor lys-mørke zoner. Der er ikke rigtig nogen artikler hvor der gives gode forklaringer på disse begrænsninger ved algen, og det kunne afspejle, at forskerne har den samme uddannelse, eller har ”oplært” hinanden indenfor produktionen.

Dette kunne også have betydning for, at produktionsanlæggene ikke får et gennembrud, hvis forskernes naturvidenskabelige baggrund er mere teknisk end biologisk. Det kunne jo undersøges ved at studere forfatterne til de forskningsbaseret artikler, vi har læst. Hvis dette er tilfældet kunne man måske ansætte fagfolk med forskellige specialer for at optimere designet af reaktorerne.

Vi fandt det interessant at give en vurdering af, hvilken udvikling der har været i forskningen af algeproduktion. Vi så på biomasseudbyttet fra forskellige år, for at få et indtryk af om udviklingen af produktiviteten har været positiv, altså om udbyttet er blevet højere og højere gennem årene. Hvis det var tilfældet, kunne det være et tegn på at udviklingen med reaktorerne

gå i den rigtige retning, og det ville være muligt at optimere udbyttet yderligere.

Desværre har det dog ikke kunne give os et entydigt svar. Der er for mange forskellige faktorer der spiller ind i udbyttet af biomassen, som f.eks. størrelse af anlæg, geografisk placering, valg af algetype og længden forsøget har kørt over til, at det har kunnet give også et entydigt svar. En produktion der har kørt i et par dage er svær at sammenligne med en produktion, der har kørt over flere måneder.

Det giver anledning til et helt projekt i sig selv, at give en redegørelse for de forskellige forsøg, og derved angive om der rent faktisk har været en betydelig udvikling.

Derimod kunne vi se på indholdet i artiklerne, på hvor vigtig forståelsen af algen er for at optimere reaktorerne, og hvordan denne forståelse har udviklet sig igennem årene. Det er tydeligt, at vejen frem for at optimere reaktorerne er gennem en endnu bedre forståelse af algen som organisme, især de biokemiske processer som fotohæmning og fotorespiration.

Groft sagt, så søgte de tidligste artikler efter en forståelse og sammenhæng mellem lys, temperatur og fotohæmning i algen, ved at udsætte algen for forskelligt lys og temperaturer. Hvis man går 10 år tilbage i artiklerne, ses det at fokus har været på teknologien, f.eks. hvilken pumpe der bedst mikser kulturen. Nogle af de nyeste artikler har fokus på muligheden for at genmanipulere algen til at have en større olieprocent eller få den til at vokse hurtigere.

Udvikling i litteraturen giver os også et indtryk af, at man har opnået et optimum for, hvor meget de udvalgte reaktorer kan producere, og at der ikke har været en markant stigning i udbyttet af biomasse. Reaktorerne kan ikke optimeres mere end de er, fordi algerne sætter nogle biologiske begrænsninger for, hvor store reaktorerne kan blive. Det er vores vurdering, at man enten kan designe nogle nye reaktorer, der kan give et bedre udbytte, samtidig med de tilgodeser algerne. Det kunne også være man kunne genmanipulere algerne til at have færre begrænsninger og derved give en højere vækstrate og olieindhold, og på denne måde optimere de allerede designede reaktorer.

Dette areal svare til et areal på størrelse med Roskilde. I Kvist et al. Artiklen anslog forskere fra Københavns universitet, netop, at en produktion af biodiesel baseret på alger, for at dække Danmarks behov skulle bruge et areal på Roskildes størrelse. Det er pudsigt at vores udregning, lavet i forhold til en produktion i Spanien, for at dække benzinforbruget, svarere til deres beregning fortaget for hele det danske brændstof forbrug.

Konklusion

På baggrund af vores projekt har vi fundet ud af, at det er muligt at have en algeproduktion, og udfra denne omdanne fedtstoffet i algen til biodiesel. Det skal derfor slås fast, at det er muligt at lave biodiesel ud fra mikroalger, også i et omfang der ville kunne dække Danmarks behov, det vil dog kræve ca. 1/3 af Danmarks areal.

Produktionen af biodiesel baseret på alger oplever dog mange udfordringer, når den forstørres op til industriskala. Udfordringerne ved produktionen ligger primært i den naturvidenskabelige del. Teknologisk er det muligt at lave meget store bioreaktorer, dette er dog ikke særlig fordelagtigt for algerne. Problemerne ligger i at gøre udbyttet lige så højt rent praktisk, som det rent teoretisk kan blive. Disse problemer skyldes gasudviklingen i reaktorerne, som skal fjernes jævnlige for ikke at skade algerne og for at forhøje den fotosyntetiske proces. Lysintensiteten skal være på et optimalt niveau, afhængig af algetype, for at opnå så høj vækstrate så muligt, men også for at forhindre en ftohæmning. Miksning i reaktoren skal hverken være for høj, så der sker forskydningsspænding, men heller ikke for lav så der sker kolonisering af algerne inden i reaktoren. Den ideelle temperatur afgør om væksten er høj eller lav. Er temperaturen lav vil de biokemiske processer i algen foregå langsommere og væksten vil tilsvarende ske langsommeligere.

Potentialet er ikke stort nok på nuværende tidspunkt til at kunne dække Danmarks behov for brændstof. For at forsyne den danske transportsektor med biobrændstof vil det kræve et areal på ca. 29 % af Danmark, eller lidt over halvanden gang Sjællands størrelse. Dette er et helt urealistisk areal, at afsætte til at producere biodiesel.

Hvis bare 10 % af brændstof behovet skulle dækkes af biodiesel fra algedyrkning, ville det kræve et areal på 1250 km², svarende til et kvadrat på 35,4 km på hver led.

Heller ikke engang 10 % af Danmarks brændstof behov ville vi kunne dækkes med algebaseret biodiesel.

Alt det skal ses i forhold til en produktion forløbet over 3 måneder. Kunne man finde en alge i Danmark, som kunne dyrkes i mere end 3 måneder, med højere olieindhold og vækstrate, ville det have en betydelig forbedring af udbyttet.

Dette ville også indskrænke arealet, der skulle anvendes, og dermed kunne være en mulig del af løsningen i samspil med andre vedvarende og CO₂ neutrale energikilder.

Skulle man have en alge, der kunne dyrkes i mere end 3 måneder, som havde et højere olieindhold og vækst, ville det være nødvendigt med et grundigt studium af de alger, der kan leve i Danmark. Det har vi ikke kunne finde oversigter over, hvilket bevidner om at der mangler forskning af alger, der kan leve i Danmark.

Et andet aspekt af usikkerheden mht. olieudbyttet fra *Phaeodactylum tricornutum*, var afvigelsen på 10 % point, hvilket gav en stor usikkerhed. Det vides ikke om den pågældende alge indeholdte 20 eller 30 % olie. Den afvigelse, giver en arealforskel, for danske forhold, på ca. 6254,9 km² som svarer til et areal på ca. til 79 gange 79 km. Det er en meget stor forskel, og det understreger, hvor vigtig en indsigt i den alge man vælger er, før en stor produktion kan sættes i gang.

Den spanske produktion for at dække Danmarks brændstofbehov, ville ikke engang kunne lade sig gøre, da det kræver et areal på 47,5km x 47,5km. Skulle vi ligge en produktion for det danske benzinforbrug i Spanien, ville dette også kræve et alt for stort areal. Arealet ville være fra København til Roskilde på hver led, oven i købet baseret på en produktion forløbet i 9 måneder. Efter vores vurdering er det derfor, på nuværende tidspunkt, helt urealistisk at have en algebaseret produktion til biodiesel, der kan dække en væsentlig del af vores brændstofforbrug. Denne vurdering er også taget på baggrund af, forsøget i Spanien har truffet deres valg med hensyn til alge, ud fra den vækstrate og olieindhold der har været bedst egnet til en produktion i Spanien.

Hvis vi alligevel satsede nogle forskningsmidler i algedyrkning, ville det også kunne give grundlag for naturvidenskabelig forskning, der måske kunne finde anvendelser indenfor samfundsmæssige energiproblematikker, eller til andre formål. Biodiesel produceret ud fra alger kan på nuværende tidspunkt ikke løse det samfundsmæssige problem med ophobning af CO₂ i atmosfæren og de reducerende fossile brændstofdepoter.

Skal Danmark være et forgangsland indenfor bioenergi, skal den fremtidige energiforsyning dækkes af flere forskellige teknologier med bioenergi. Der kan biodiesel fra alger på længere sigt, være en af flere forskellige teknologier. Men det kræver væsentlig optimering af de reaktorer der findes i dag, og større forståelse for de alger man vælger at dyrke. Eller også skulle der mere forskning indenfor genmanipulation af alger til at have et større olieindhold samt vækstrate.

Perspektivering

For at kunne give en bredere og bedre vurdering af potentialet for algebaseret biodiesel er det nødvendigt med udvikling af produktionsteknologierne samt forståelse og manipulation af alger. Det ville også være relevant at undersøge omkostningerne ved en produktion, for at afgøre om det vil være rentabelt muligt at gøre biodiesel produceret ud fra alger konkurrencedygtigt, i forhold til fossile brændstoffer.

Et andet aspekt kunne være at sammenligne produktionen med andre alternative energikilders omkostninger og energiindhold, og i denne betragtning medtage hvad restproduktet af algerne, kan anvendes til. Dette restprodukt er meget proteinholdigt, og derfor kunne det være velegnet til f.eks. dyrefoder eller lignende. Det hjælper os måske også af med et andet problem, nemlig al det jord vi afsætter af til at dyrke foder til vores dyr.

Vi valgte tidligt i forløbet kun at se på potentiale og begrænsninger for de lukkede reaktorer, men man kunne også vælge at gå den anden vej, og se på de åbne systemer til dyrkning af alger. Det kunne være relevant at forske i dyrkningen i åbne bassiner, da denne produktion sætter nogle helt andre begrænsninger end de lukkede reaktorer. Man kunne sammenligne åbne og lukkede systemer med hensyn til udbytte og omkostninger og på den baggrund vurdere, hvilken af de to produktionsmåder der ville have flest fordele i Danmark.

En anden mulighed, som endnu ikke udnyttes, er marine biomasse. I et land som Danmark, hvor

størstedelen af arealet er optaget af land- og skovbrug, ville det være oplagt at lægge produktionsanlæg i havet, da dette er et uudforsket og uopdyrket areal.

En alge produktion baseret på heterotrofe alger kunne også undersøges. Dyrkningen af heterotrofe alger ville også være oplagt i Danmark, pga. vores klima. Produktionen af heterotrofe alger kunne foregå i lukkede tanke, da de ikke behøver sollys. Til gengæld er produktionen dyrere i drift, da alle næringsstoffer skal tilføres. Det ville måske kunne lade sig gøre, hvis man i tilgift kunne man få et højere biomasse udbytte. Umiddelbart er der heller ikke så store begrænsninger og faktorer, som kunne ødelægge en storstilet algeproduktion.

Derfor er der stadig mulighed for at vi på nuværende tidspunkt kunne have en produktion af alger, der kunne udgøre en reel del af det biomasse behov, vi har brug for i dag.

Litteraturliste

Artikler

Babcock Jr., R.W, Malda J. and. Radway, J.C (2002), "Hydrodynamics and mass transfer in a tubular airlift photobioreactor", *Journal of Applied Phycology* 14: 169–184, 2002

Bosca, C., Dauta, A. , Marvalín, O., (1991) "intensive outdoor algal cultures. How mixing enhances the photosynthetic production rate." *Bioresource Technol.* 38 158-188

Burlew J.S. 1953. "Current status of the large-scale culture of algal", *Algal Culture from Laboratory to PilotPlant*. Publ. No. 600. Carnegie Institute of Washington Publication 600, Washington, DC, USA, pp. 3–23.

Cheng-Wu, Z., Zmora, O., Kopel, R., Ricgmond, A.(2000), "An industrial-size flat plate glass reactor for mass production of *Nannochloropsis* sp. (Eustigmatophyceae)", *Microalgal Biotechnology Laboratory*, *Aquaculture* 195(2001) 35–49.

Christi, Y. (2007), "Biodiesel from Microalgae" side 294–306, *I Biotechnology Advances* 25

Degen, J., Uebele, A., Schmid-Staiger, U., Trösch, W. (2001), "A novel photobioreactor with baffles for improved light utilization through the flashing light effect", *J. Biotechnol* 92:89-94

Eriksen, N.T.(2008), "The Technology of microalgal culturing", *Biotechnol Lett* (2008) 30:1525–1536 <http://springerlink.com/content/fw51v7785n804721/fulltext.pdf>

Fangrui, M., Hanna. M. A.(1998) "Biodiesel Production: A Review." *Bioresource Technology* 70. p. 1-15

Fernández, F.G.A., Camacho, F.G., Pérez, J.A.S., Sevilla, J. M.F., Molina E.(1997), "Modeling of Biomass Productivity in Tubular Photobioreactors for Microalgal Cultures: Effects of Dilution Rate, Tube Diameter, and Solar Irradiance", Department of Chemical Engineering, University of Almería,

Fernández, F.G.A., Sevilla, J.M.F., PeHrez, J.A.S Molina, E.G., Chisti, Y.(2001) "Airlift-driven external-loop tubular photobioreactors for outdoor production of microalgae: assessment of design and performance" *Chemical Engineering Science* 56 (2001) 2721}2732

Fukuda, H., Kondo, A. og Noda, H. (2001), "Biodiesel fuel production by transesterification of

oils”, Journal of Bioscience and Bioengineering vol 92, No. 5, 405-416,
<http://www.oraui.gov/algae2008/breakouts/fukuda2001transesterification.pdf>

Hossain, S., Salleh, A., Boyce, A.N., Chowdhury, P. og Naquiuddin, M.(2008), “ Biodiesel Fuel Production from Algae as Renewable Energy”, Biotechnology Laboratory, Institute of Biological Sciences, Faculty of Science, University g Malaya.

Janssen, M., Bresser, L.d., Baijens, T., Tramper, J., Mur, L.R, Snel, J.F.H. & Wijffels, R.H.(2000), ” Scale-up spect of photobioreactors: effects of mixing-induced light/dark Cycles”

Kvist. V.J, Felby, C. og Jørgensen, H. (2008): ”Vi har masser af energi” siden 16. I ” Informationen” Tir. 16 sep

Li, Q., Du, W. og Liu, D. (2008), “Perspectives of microbial oils for biodiesel production” , Appl Microbiol Biotechnol (2008) 80:749–756

Meher, L.C., Sagar, D.V., Naik, S.N. (2004), “Technical Aspects of biodiesel production by transesterification - a review “.

Molina, E., Fernández, J., Acién, F.G., Chisti. Y. (2001), “Tubular photobioreactor design for algal cultures”, Journal of Biotechnology 92 (2001) 113–131

Pulz, O. (2001), “Photobioreactors: Production systems for phototrophic microorganisms” Appl Microbiol Biotechnol 2001:57:287-93

Ranjbar, R., Inoue, R., Katasuda, T., Yamaji, H., Katoh, S.,(2008), ”High efficiency Production of Astaxanthin in an Aitlift Photobioreactor”, Journal of Bioscience and Bioengineering Vol 106, No 2, 204-207

Rodolfi, L., Zittelli, G.C., Bassi, N. Padovani, G., Biondi, N., Bonini, N., Tredici, M.R(2008), “Microalgae for Oil: Strain Selection, Induction of Lipid Synthesis and Outdoor Mass Cultivation in a Low-Cost Photobioreactor”, Dipartimento di Biotecnologie Agrarie, Università degli

Rosenberg, J.N., Oyler, G.A, Wilkinson, L. and Betenbaugh, M.J.(2008), “A green light for engineered algae: redirecting metabolism to fuel a biotechnology revolution”, ScienceDirect.

Rubio, F.C., Fernández F.G.A, Pérez, J.A.S., Camacho, F.G., Grima, E.M(1999), “Prediction of Dissolved Oxygen and Carbon Dioxide Concentration Profiles in Tubular Photobioreactors for Microalgal Culture”

Spolaore, P. Joannis-Cassan, C., Duran, E. and Isambert, A.(2006), “Commercial Applications of Microalgae”, JOURNAL OF BIOSCIENCE AND BIOENGINEERING, Vol. 101, No. 2, 87–96. 2006, Review artikel

Ugwu, C.U., Aoyagi, H., Uchiyama, H.(2008), “Photobioreactors for mass cultivation of algae”, Bioresource Technology 99(2008) 4021-4028

Bøger

Barsanti, L. & Gualtieri, P.(2006) “Algae: Anatomy, Biochemistry and Biotechnology”, CRC Press
Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL. ISBN: 0-8493-1467-4

Bold, H.C. & Wynne, M.J.(1985), ”Introduction to the Algae (2 ed)”, Prentice-Hall, Inc, New Jersey. ISBN:0-13-477746-8

Campbell, N.A., Reece, J.B, Urry, L.A., Cain, M.L., Wasserman S.A., Minorsky, P.V., Jackson, R.B. (Ed)(2008), “Biology (8 ed.)”, Pearson International Edition San Francisco. ISBN: 978-0-321-53616-7/0-321-53616-9

Chapman, V.J. og Chapman, D.J(1981)”Algae, the”(2ed), The Macmillan press Ltd., London., ISBN 0-333-32648-2

Dansgaard, W. (1987), “Klima, Vejr og Mennesker”, Geografforlaget, ISBN: 87-7702-071-5

Darley, W.M.(1982), “Algal Biology: A physiological approach(Vol. 9)”, Blackwell Scientific Publications Editorial, Oxford, ISBN: 0-632-00608-0

Fingerman, M. & Nagabhushunam, R.(2003), “Recent Advances in Marine Biotechnology, Vol9, Biomaterials and Bioprocessing”, Science Publishers, Inc. ISBN: 1-57808-284-6

Nielsen, H., Kristiansen, A. og Moestrup, Ø.(1981), “Introduktion til Alger & bakterier”, Nucleus – Foreningen af Danske Biologers Forlag Aps. ISBN: 87-87661-17-9

Richmond, A(ed)(2004) “Handbook of Microalgal Culture – Biotechnology and applied Phycology”, Blackwell Science Ltd, Oxford. ISBN 0-632-05953-2

Strandgaard, E, Jespergaard, P. og Østergaard, O.G.(2000), ” Databog Fysik Kemi”, F &K forlag, ISBN: 87-872-2959-5

Sze, P. (1998), "A Biology of the Algae", WCB/ McGraw-Hill, ISBN: 0-697-21910-0

Taiz, .L & Zeiger, E.(2006), "Plant Physiology"(4 udgave). Sinauer Associates, Inc., Publishers, Sunderland, Massachusetts. ISBN: 0-87893-856-7

Hjemmesider

DMI Klima: <http://www.dmi.dk/dmi/index/danmark/klimanormaler.htm>

FDM:

<http://www.fdm.dk/public/trafikogpolitik/vejtrafik/miljo/bibrandsel/politikogbibrandsler.htm>

Interscience: <http://www3.interscience.wiley.com/cgi-bin/fulltext/119542839/PDFSTART>

Mini:

http://www.minihydrogen.dk/catalog/documents/materials/miniHYDROGEN_hydrogen_fakta_ar_k.pdf

Oliebranchen Benzin:

<http://www.oliebranchen.dk/statistik%20og%20tal/markedsudvikling/benzin.aspx>

Oliebranchen gasolie:

<http://www.oliebranchen.dk/Statistik%20og%20tal/Markedsudvikling/Gasolie.aspx>

Physics: <http://physics.indiana.edu/~brabson/p310/Biodiesel.htm>

Sccap: www.sccap.dk/collection/

Personer

Felby: Personlig kontakt med Claus Felby, professor, Københavns Universitet