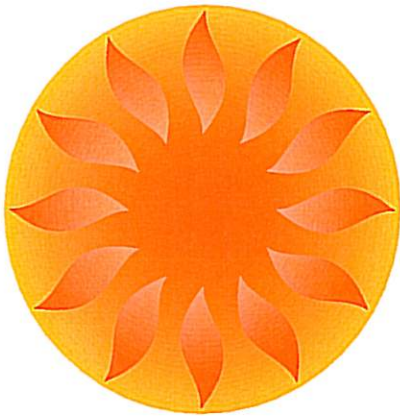


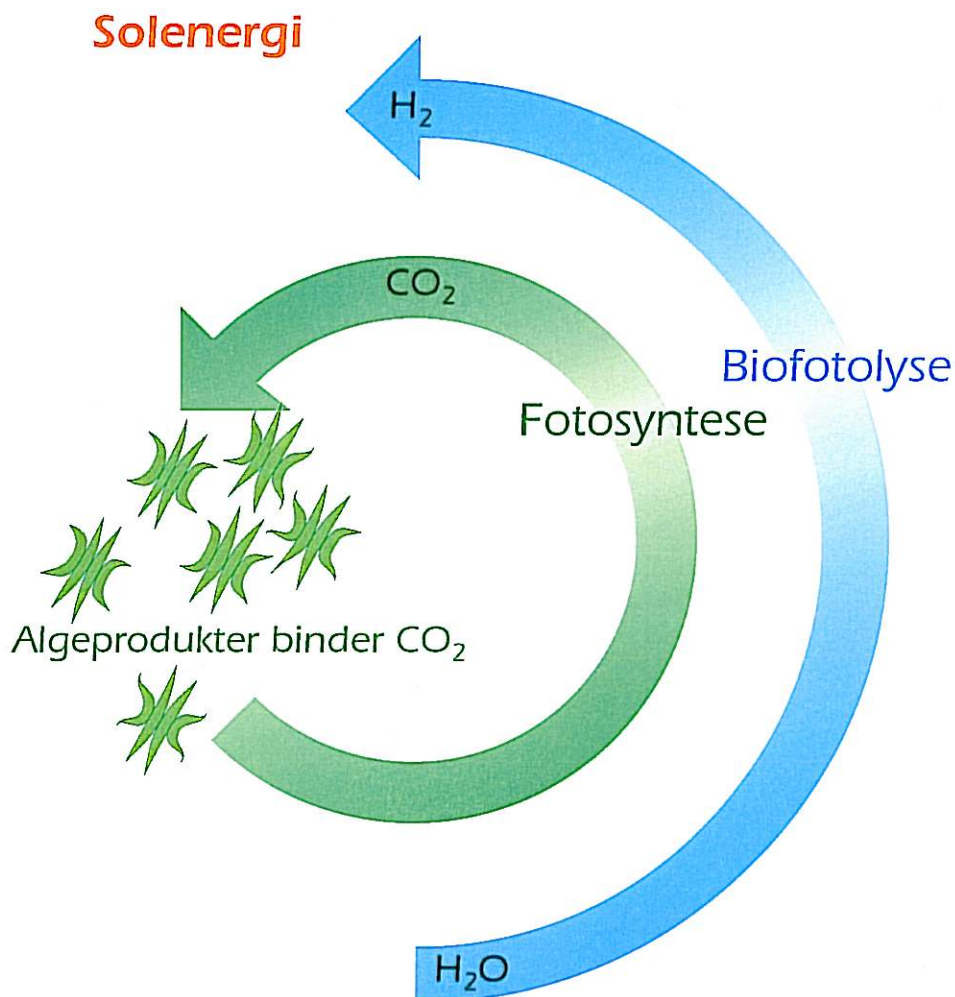
AKT

Algekulturateknologi

Eksperiment- og
produksjonsanlegg for
mikroalger i Vestfold



6 Sammendragsrapport



Norges forskningsråd (NFR):
FoU-programmet KLIMATEK.
Teknologi for reduksjon av klimagassutslipp

Algekulturateknologi

Ekspériment- og produksjonsanlegg
for mikroalger i Vestfold

RAPPORTOVERSIKT

Delrapport 1	CO ₂ -binding og H ₂ -produksjon
Delrapport 2	Livsløpsanalyser av CO ₂ -baserte algeprodukter
Delrapport 3	Utnyttelse av spillvarme og avløpsvann for produksjon av mikroalger
Delrapport 4	Algetyper, anvendelsesområder og forretningsmuligheter
Delrapport 5	Konseptbeskrivelse for hovedprosjekt
6	SAMMENDRAGSRAPPORT

Hovedkontor

Postboks 173, Kjelsås
0411 Oslo
Telefon (47) 22 18 51 00
Telefax (47) 22 18 52 00
Internet: www.niva.no

Sørlandsavdelingen

Televeien 1
4890 Grimstad
Telefon (47) 37 29 50 55
Telefax (47) 37 04 45 13

Østlandsavdelingen

Sandvikaveien 41
2312 Ottestad
Telefon (47) 62 57 64 00
Telefax (47) 62 57 66 53

Vestlandsavdelingen

Nordnesboder 5
5008 Bergen
Telefon (47) 55 30 22 50
Telefax (47) 55 30 22 51

Akvaplan-NIVA A/S

9015 Tromsø
Telefon (47) 77 68 52 80
Telefax (47) 77 68 05 09

Tittel Algekulturteknologi. Eksperiment- og produksjonsanlegg for mikroalger i Vestfold. Sammendragsrapport	Løpenr. (for bestilling) 3994-99	Dato 1999.05.07
	Prosjektnr. Undernr. 98001 09	Sider Pris 26
Forfatter(e) Gunnar Fr. Aasgaard Olav Skulberg Torsten Källqvist	Fagområde Algekulturteknologi	Distribusjon
	Geografisk område Norge	Trykket NIVA

Oppdragsgiver(e) Norges forskningsråd - FoU-programmet KLIMATEK	Oppdragsreferanse 125117/230
--	---------------------------------

<p>Sammendrag</p> <p>Forprosjektet har sannsynliggjort at det er positive forutsetninger for en mikroalgebasert næringsutvikling i Norge. Slik virksomhet vil i tillegg kunne ha betydelige miljø- og ressursmessige gevinster. Et innledende forarbeid er imidlertid nødvendig både når det gjelder produksjonsprosesser og markedsforhold. En forsøksproduksjon i pilot-skala bør danne grunnlag for en eventuell beslutning om større investeringer. Videre arbeider kan gjennomføres i regi av et nytt utviklingselskap for algekulturteknologi.</p> <p>Resultater fra forprosjektet er behandlet i følgende delrapporter:</p> <ul style="list-style-type: none"> - CO₂-binding og H₂-produksjon; Olav Skulberg og Torsten Källqvist, NIVA - Livsløpsanalyser av CO₂-baserte algeprodukter; Oddmund Brekke m. fl., Stiftelsen Østfoldforskning (STØ) - Utnyttelse av spillvarme og avløpsvann for produksjon av mikroalger; T. Källqvist og O. Skulberg, NIVA - Algetyper, anvendelsesområder og forretningsmuligheter; Roar Krogshus og Gunnar Strømmen, Næringscenteret i Vestfold AS (NIV) - Konseptbeskrivelse for hovedprosjekt; Gunnar Fr. Aasgaard m. fl. ANØ Miljøkompetanse

Fire norske emneord 1. Mikroalger 2. CO ₂ -konvertering 3. Hydrogengassproduksjon 4. Pilotanlegg	Fire engelske emneord 1. Microalgae 2. CO ₂ -converting 3. Biophotolysis 4. Pilot plant
---	--


 Gunnar Fr. Aasgaard
 Prosjektleder


 Dag Berge
 Forskningssjef

O-98001

Algekulturt Teknologi

Eksperiment- og produksjonsanlegg
for mikroalger i Vestfold

Sammendragsrapport

Oslo, 07.05.1999

Gunnar Fr. Aasgaard
Olav Skulberg
Torsten Källqvist

Forord

I mikroalgenes egenskaper og sammensetning ligger realisérbare muligheter for kommersiell og samfunnsmessig nytte. Norsk institutt for vannforskning (NIVA) har gjennom sin funksjonstid bygget opp en kultursamling av mikroalger med potensiale for økonomisk utnyttelse. Gjennom målrettet forskning og utvikling ønsker NIVA å danne faglig og praktisk forutsetning for en norsk næringsvirksomhet basert på mikroalger.

Mikroalgene, som tilhører planteriket, utnytter solenergi til sin vekst via fotosyntesen. I dette ligger en reell mulighet til å utnytte CO₂-innholdet i avgasser fra prosessindustri som vekstgrunnlag i dyrkingsanlegg for mikroalger. Dette var bakgrunnen for etableringen av forprosjektet "*Algekulturteknologi (AKT); Eksperiment- og produksjonsanlegg for mikroalger i Vestfold*". Prosessindustri i Vestfold er bl.a. vurdert som CO₂-kilder.

Forprosjektet ble 50 % finansiert av Norges forskningsråd, under KLIMATEK-programmet. Programkoordinator har vært Asle Lygre (fram til 01.06.98) og Hans-Roar Sørheim, begge fra Christian Michelsen Research AS. Øvrige finansierer: ESSO Norge AS, Vestfold Energitjenester, Larvik kommune, Vestfold fylkeskommune samt de faglige prosjektdeltakerne NIVA, Næringscenteret i Vestfold AS (NIV), Stiftelsen Østfoldforskning (STØ) og ANØ Miljøkompetanse.

Nøkkelpersoner i forprosjektet har vært:

- Gunnar Fr. Aasgaard (prosjektleder), ANØ Miljøkompetanse
- Gunnar Strømmen (assisterende prosjektleder), NIV
- Torsten Källqvist (faglig leder), NIVA
- Haakon Thaulow (adm. prosjektansvarlig og leder av referansegruppen), NIVA

Resultatene av forprosjektet presenteres i 5 delrapporter i tillegg til denne sammendragsrapporten.

Oslo, 07.05.99

Haakon Thaulow
(adm. prosjektansvarlig)

Gunnar Fr. Aasgaard
(prosjektleder)

Innhold

Oppsummerende vurderinger	5
Summary	7
1. Oversikt	9
2. Algekulturteknologi og klimagassproblemer	10
3. Livsløpsanalyse	13
4. Produksjon av mikroalger med avfallsutnyttelse	16
5. Kommersiell mikroalgedyrking - begynnelse i Vestfold	19
6. Diskusjon og perspektiv	22
7. Aktuelle publikasjoner fra NIVA	26

Illustrasjoner

Side 12	De samme egenskaper som innebærer at mikroalger kan være problemorganismer, gjør dem effektive som nyttevekster.
Side 15	Fotobioreaktor til kontinuerlig produksjon av algebiomasse.
Side 18	Karotenoider - f.eks. astaxanthin, her i <i>Haematococcus</i> sp. - er viktige verdistoffer i mikroalger.
Side 21	Pigmenter og probiotika hører til algeproduserte naturstoffer som inngår i funksjonell ernæring til dyr og mennesker.

Oppsummerende vurderinger

Forprosjektet har sannsynliggjort at det kan være forretningsmessig lønnsomt med en mikroalgebasert næringsutvikling i Norge. Slik virksomhet vil i tillegg innebære betydelige miljø- og ressursmessige gevinster. Et utviklingsarbeid må imidlertid gjennomføres både når det gjelder produksjonsprosesser og markedsforhold. En forsøksproduksjon i liten skala vil derfor være nødvendig før eventuell beslutning om større investeringer fattes.

Videre arbeider bør gjennomføres i regi av et eget utviklingsselskap for algekulturteknologi.

Idégrunnlag

I mikroalgens egenskaper og sammensetning ligger realisérbare muligheter for kommersiell og samfunnsmessig nytte. Norsk institutt for vannforskning (NIVA) har gjennom sin funksjonstid bygget opp en kultursamling av mikroalger med potensiale for slik utnyttelse.

Mikroalgene, som tilhører planteriket, utnytter solenergi til sin vekst via fotosyntesen. I dette ligger en praktisk mulighet til å utnytte CO₂-innholdet i avgasser fra prosessindustri som vekstgrunnlag i dyrkingsanlegg for mikroalger. Praktiske og økonomiske forhold gjør at det foreløpig ikke vil være formålstjenlig å benytte et slikt system som eneste løsning for punktutslipp av karbondioksid, men det er positive muligheter for å ta hånd om betydelige andeler av CO₂-utslipp til fremstilling av nyttige varer via produksjonsanlegg for mikroalger.

Miljømessig eller forretningsmessig tilnærming

Algekulturteknologi omfatter flere praktiske løsninger for produksjon av viktige stoffer og varer. Spesielt interessant, primært ut fra et miljø-/ressurshensyn, er algekulturteknologi som en helhetlig operasjon der flere formål blir tilgodesett. Gjennom integrerte systemer, hvor fremstilling av verdifulle stoffer er koblet med nyttiggjøring f.eks. i renseprosesser eller til miljøforbedrende tiltak, kan løsninger av viktige samfunnsoppgaver kombineres på hensiktsmessig måte. Slike kombinasjonsløsninger vil imidlertid kunne bli teknologisk kompliserte og/eller skape markedsmessige ulemper som ikke umiddelbart lar seg forene med krav til lønnsomhet.

Ut fra en rent forretningsmessig tenkning vil algekulturteknologi kunne benyttes til fremstilling av en rekke interessante produkter innenfor mange bransjer. Som eksempler kan nevnes ernæring, landbruk/akvakultur, industrikjemikalier, farmasi/medisin og hydrogengass. Prosessoptimale løsninger for å sikre høy lønnsomhet vil ofte ikke muliggjøre det integrerte, ressursvennlige konseptet som er nevnt over. Ikke desto mindre vil algebaserte produkter kunne ha så vel energi- som klimagassgevinster i forhold til *syntetisk* fremstilte substitutter.

Eksperiment- og produksjonsanlegg for mikroalger i Vestfold bør etableres i regi av et nytt utviklingsselskap for algekulturteknologi

Basert på internasjonale erfaringer og resultater fremkommet i forprosjektet, er en rekke faglige og forretningsmessige utfordringer identifisert. Disse spenner vidt, men kan grupperes i tre hovedområder:

- Mikroorganismer; basisegenskaper og hvordan disse kan påvirkes bl.a. gjennom optimalisering, evt. endring av vekstbetingelsene.
 - Produksjonsprosesser og teknisk/økonomiske sammenhenger.
 - Markedsmessige forhold og forretningsutvikling.
-

Det anbefales følgende strategi for det videre arbeid innen feltet:

1. En plan for et nasjonalt satsningsprogram om forskning og utvikling knyttet til økonomisk utnyttelse av mikroalger bør utarbeides og iverksettes.
2. Det etableres et utviklingsselskap med formål å realisere algekulturteknologi som ny næringsgren i Norge. Initiativet til selskapsdannelsen tas fra NIVA, som stiller kompetanse og tilgang til algekultursamlingen til disposisjon for selskapet.
3. Det etableres et eksperiment- og produksjonsanlegg ved Esso-raffineriet på Slagentangen, der hovedvirksomheten vil være fremstilling av algebiomasse for ulike utprøvinger. Forsøksanlegget skal også ha som funksjon utvikling/forbedring av prosessutstyr, primært dyrkingsreaktorer.
4. Det utarbeides prosjektplaner for de nærmeste årene, forslagsvis for perioden 2000-2005, der de sentrale utfordringer møtes. Koordinering av prosjektene gjøres via utviklingsselskapet.

Det oppnevnes et faglig råd med representanter fra vitenskap, industri, landbruk og forvaltning for å fremme koordinering og gjennomføring av et nasjonalt satsningsprogram knyttet til økonomisk utnyttelse av mikroalger. En handlingsplan til formålet bør utarbeides.

Summary

Algal culture technology (ACT) is here defined as the practical utilization of prokaryotic and eukaryotic microalgae for harvesting of biomass and production of special commodities with economic importance.

In contrast to macroalgae, the microscopic photosynthetic organisms of oceans and inland waters - the microalgae - have so far scarcely been commercially exploited. This implies that microalgae constitute one of the largest unexploited biological resources on earth. Microalgae are really a primary challenge in biotechnology for the next millennium. Phycological research has an important task to perform in the development of the emerging manufacturing industry we may designate algal culture technology.

Several indications point to photosynthetic microorganisms as biological tools for the practical fixation of CO₂ at point sources. The theoretical potential of the relevant microalgal processes in Norway has been estimated at >330 t CO₂ ha⁻¹y⁻¹.

The present state of the art of algal culture technology makes possible only a small and limited contribution to solving the CO₂-problem. However there are several avenues which are followed by national and international research programmes to improve the methods for mass cultivation of microalgae, and the processes for economic biophotolysis of water. The progress of this work is promising for the use of algal culture technology in the biofixation of important quantities of anthropogenic produced CO₂.

Life cycle assessments (LCA) have been performed on microalgal products, based on a conceptual design of a microalgal plant in Vestfold, Norway. The aim is to assess the net effect on greenhouse gas emissions by utilizing industrial emissions of CO₂ for microalgal production.

The LCA shows that the energy consumption related to the production of algal biomass is relatively high, but is very dependent on plant design. With the most optimal designs, the energy consumption related to production of algal biomass can probably be in the same range as production of soy meal, and approximately half that of fish meal.

If artificial fertilizers can be avoided for the nutrient supply (i.e. by use of waste water), the replacement of soy meal or fish meal with microalgae can result in a reduction of the greenhouse gas emissions related to the feed meal with approximately 90-95%. Artificial fertilizers contribute substantially to greenhouse gas emissions, when the main product is protein with a high nitrogen content.

Future production of hydrogen from microalgae has a potential to be performed with a reasonably good energy efficiency. Replacement of petroleum diesel with hydrogen produced from algae may reduce the contribution to the greenhouse gas emissions by 90-95%. Several biological and technological developments are necessary to achieve this.

The use of industrial waste heat, CO₂ and nutrient rich wastewater for production of microalgae has been evaluated for possible establishment of a pilot plant. Temperature is an important factor regulating the growth of microalgae and use of waste heat may increase the production potential for microalgae in Norway. Waste heat may also be useful for drying of algal biomass.

Municipal wastewater has a high content of plant nutrients, which can be converted to algal biomass. The efficiency of an algal-based treatment plant for wastewater is, however, varying with the seasonal

changes in temperature and irradiance, and the plant operation would have to be discontinued in the winter. The produced algal biomass may be used as a source of energy, as feed and/or for extraction of specific products. The use of wastewater as a source of nutrients may, however, involve certain restrictions of some applications.

The construction of a research plant for experimental- and pilot production of microalgae in Vestfold is an intrinsic part of advancing the practical solutions.

The report includes information about relevant microalgae and products which have attention connected with the preparations for algal culture technology adjusted to the circumstances in Vestfold. Geographical and economic conditions are presented and evaluated. Criteria for selection of areas suitable for a pilot plant, and the exploitation possibilities for certain strains of microalgae in question, are the subjects for comments. Based on the different factors and a comparative study a recommendation is made about a suitable site for the experimental- and pilot plant in Vestfold.

A research plant for experimental- and production purposes connected with microalgae is projected in the county of Vestfold. When established this will be a key element for the necessary research and process improvements of algal culture technology in Norway. Besides it will make possible a fruitful participation in the relevant international research activities and development.

Title: Algal culture technology. Pilot plant for production of microalgae in Vestfold, Norway.

Report 6: Epitome

Year: 1999

Author: Gunnar Fr. Aasgaard, Torsten Källqvist, Olav Skulberg

Source: Norwegian Institute for Water Research, ISBN 82-577-3591-4

1. Oversikt

Bakgrunnen for forprosjektet er tredelt:

- I Vestfold fylke er det prosessindustri med betydelige CO₂-utslipp og ressurser i form av spillvarme. Bedriftene ønsker å utnytte disse «ressursene på avveie», ved å bidra til å etablere ny næringsvirksomhet i regionen.
- Vestfold fylke har som mål å være en utviklingsarena med nasjonal oppmerksomhet ved å gjennomføre fremtidsrettede pilotprosjekter. I «Strategisk næringsplan for Vestfold» står energi- og miljøaspektene sentralt.
- Forretningsmessig utnyttelse av mikroalger - algekulturteknologi - kan være et viktig element i å realisere ovennevnte ambisjoner. Forsknings- og utviklingsarbeid i flere land, også i Norge - og i stor grad ved NIVA - indikerer at mikroalger er spesielt interessante som basis i et integrert helhetsforetak.

Hovedmålet for arbeidet er å tilrettelegge for lønnsom næringsvirksomhet, ved utnyttelse av CO₂, overskuddsvarme fra prosessindustri og eventuelt næringsfaller i avløpsvann.

Operasjonelle delmål:

- Etablere et pilotanlegg for prøveproduksjon av algebiomasse for utvikling av kommersielle produkter; f.eks. fôrtilsetning, pigmenter, hydrogengass, farmasøytika og spesialkjemikalier
- Etablere et norsk senter for forskning og utvikling innen algekulturteknologi
- Bidra til realisering av miljømessige mål og fremme næringsutvikling og sysselsetting i Vestfold fylke gjennom å anvende alternative energikilder og praktisere energiøkonomisering.

Forprosjektet har resultert i et beslutningsgrunnlag for etablering av et pilotanlegg for algekulturteknologi i Vestfold.

Forprosjektet har bestått av i alt 10 parallelle delområder. Samarbeid har gjort det mulig å utnytte ressurser i ulike kompetansemiljøer relativt effektivt innenfor en gitt tidsramme. Resultatene er rapportert i følgende skrifter:

- Delrapport 1:
CO₂-binding og H₂-produksjon.
Forfattere: Olav Skulberg og Torsten Källqvist, NIVA
- Delrapport 2:
Livsløpsanalyser av CO₂-baserte algeprodukter.
Forfattere: Oddmund Brekke, Mie Vold, Knut Magne Furuheim og Cecilia Askham, STØ
- Delrapport 3:
Utnyttelse av spillvarme og avløpsvann for produksjon av mikroalger.
Forfattere: Torsten Källqvist og Olav Skulberg, NIVA
- Delrapport 4:
Algetyper, anvendelsesområder og forretningsmuligheter.
Forfattere: Roar Krogshus og Gunnar Strømmen, NIV
- Delrapport 5:
Konseptbeskrivelse for hovedprosjekt. (Under utarbeidelse).
- Sammendragsrapport
Forfattere: Gunnar Fr. Aasgaard, ANØ Miljøkompetanse; Olav Skulberg og Torsten Källqvist, NIVA.

2. Algekulturateknologi og klimagassproblemer

Begrensning av menneskeskapte utslipp av klimagasser er nødvendig for å stabilisere nivået av disse gassene i atmosfæren. Miljøverndepartementet har i St.meld. nr. 29 (1997-1998) bl.a. formulert behovet for den reduksjonen av CO₂-utslipp som er påkrevd i Norge for oppfølging av Kyotoprotokollen. Norges forskningsråd tilrettelegger en virksomhet innenfor FoU-programmet KLIMATEK (Teknologi for reduksjon av klimagassutslipp) for forskning og utprøving av aktuelle teknologier som kan gi praktisk betydningsfull reduksjon av CO₂-utslipp og andre klimagasser. Forprosjektet, som behandles i denne rapporten, inngår i slik sammenheng.

Utvikling av teknologi som kan ta hånd om CO₂ - og som innebærer utslippsreduksjoner - er betydningsfull i miljømessig og samfunnsmessig vurdering. Fotosyntetiske mikroorganismer utgjør en ressurs med betydelig potensiale for praktisk utnyttelse. Algekulturateknologi (AKT) går ut på å anvende mikroalger til økonomiske produksjonsformål. I forbindelse med problemstillingene til KLIMATEK innebærer AKT to hovedstrategier:

1. Massedyrking av mikroalger for konvertering av CO₂ til bioenergi og/eller råvarer som erstatter produkter fremstilt via fossilt brensel.
2. Massedyrking av mikroalger for produksjon av hydrogengass som energibærer.

En hovedkonklusjon fra konferansen UNCED i Rio de Janeiro (1992) var behovet for gjennom forskning og utviklingsarbeid å kunne innordne industrisamfunnet som en del av et økologisk kretsløp. De biologiske prosesser knyttet til karbonkretsløpet er hovedfaktorer for reguleringen av CO₂-konsentrasjonen i atmosfæren. Algekulturateknologi tar mikroalgene i bruk for anvendelse av biofotolyse og fotosyntese under kontrollerte betingelser til å fremstille varer det er samfunnsmessige behov for. Sollys er energikilde; og vann, karbondioksid sammen med mineralske næringsstoffer er innsatsfaktorene.

Algenes fotosyntese er et av de viktigste naturlige omsetningsleddene for CO₂. Ved tilrettelagt produksjon og høsting av mikroalger i spesielle anlegg kan CO₂ fra forbrenning av fossile karbonkilder omsettes i energirik algebiomasse og dermed bidra til å redusere utslipp av klimagasser.

Produksjon av mikroalger forutsetter tilførsel av ressurser i form av lys (solenergi), karbondioksid, vann og mineraler (næringsalter). Så lenge disse ressursene er i overskudd, formerer algene seg ved celledeling som medfører en eksponensiell økning i algebiomasse. I praksis vil imidlertid tilgangen på lysenergi etter hvert begrense veksten i en tett algekultur.

Dersom næringsalter og CO₂ tilføres algekulturen i tilstrekkelig mengde, vil potensialet for produksjon bestemmes av tilgangen på lysenergi. Potensialet for produksjon av mikroalger basert på dagslys er derfor avhengig av innstrålingen. I Norge, hvor variasjonen i innstråling gjennom året er stor, vil helårs-produksjon neppe være aktuelt, selv om temperaturen kan holdes optimal ved hjelp av spillvarme. Produksjonspotensialet i Sør-Norge er anslått til maksimalt 20-30 g m⁻² d⁻¹ om sommeren og totalt ca. 25-40 tonn ha⁻¹ i løpet av en vekstsesong fra uke 10-40. Dette tilsvarer betydelig mer enn areal-avkastningen i landbruk i Norge.

Algebiomasse består til ca. 45% av karbon. Det innebærer at forbruket av CO₂ er ca. 1,65 kg ved produksjon av 1 kg algebiomasse. Det beregnede produksjonspotensialet for mikroalger i Sør-Norge tilsvarer et CO₂-opptak på ca. 40 - 60 tonn ha⁻¹ år⁻¹.

Masseproduksjon av mikroalger kan foregå i åpne eller lukkede anlegg. Åpne anlegg er ofte utformet som dammer eller kanaler, hvor algekulturen holdes i bevegelse ved hjelp av pumper eller skovlehjul. CO₂-tilførselen skjer som regel ved innblåsing av finfordelte bobler fra perforerte rør på bunnen.

Konstruksjonen er forholdsvis enkel, men åpne anlegg gir begrenset kontroll over vekstbetingelsene og dårlig beskyttelse av algekulturen mot infeksjoner av uønskede organismer. Dette har bidratt til at kommersiell produksjon av mikroalger i åpne anlegg er begrenset til noen få arter.

Ved produksjon av alger i lukkede reaktorer er kulturen innesluttet i gjennomsiktige rørkanaler av glass eller plast. På denne måten kan man oppnå en god utnyttelse av dagslys selv med høy biomassetetthet i kulturen. Utnyttelsen av CO₂ kan også gjøres effektiv ved at den tilsettes i et lukket system. Fordelene med lukkede algereaktorer er høyere produksjon per volum og areal, bedre beskyttelse av algekulturen og lavere høstningsomkostning (pga. høyere tetthet). Anlegg basert på lukkede reaktorer er imidlertid mer ressurskrevende, og har foreløpig mest vært brukt til produksjon av høykost-produkter fra mikroalger.

Det er i 1998 utført forsøk med to industrielle CO₂-utslipp i Vestfold, fra henholdsvis ESSO Norge AS på Slagentangen og FORESTIA Agnes AS i Larvik. Resultatene indikerer at avgass fra begge kildene er egnet for produksjon av mikroalger.

I fotosynteseapparatet til mikroalger blir strålingsenergien fra sola omdannet til kjemisk energi, i det vann blir spaltet til oksygen og protoner. Protoner og elektroner genererer molekylært hydrogen. Biofotolyse er betegnelsen på prosessen som gjennomfører dette. Den teknologiske anvendelse av biofotolyse til hydrogengassproduksjon omfatter i forsøkssammenheng bruk av blågrønnalger (cyanobakterier) eller grønnalger i aktive kulturer med vann som hydrogenkilde, eller fotosyntetiserende bakterier med organisk stoff eller hydrogensulfid som hydrogenkilde. De hydrogen-relaterte prosessene i organismene som gjennomfører biofotolyse er knyttet til enzymsystemene hydrogenase/nitrogenase.

I eksperimentell forbindelse foregår hydrogengassproduksjon i fotobioreaktorer konstruert til formålet. De fotosyntetiske mikroorganismene dyrkes i optimale næringsløsninger under kontrollerte vekstbetingelser. Ved å tilrettelegge de fysiologiske forutsetninger for hydrogengassutskillelse fra cellene kan molekylært hydrogen fremskaffes. Det teknologiske siktepunktet er å oppnå en energieffektivitet på ca 10 %.

Det er laget en oversikt over rapporter og publikasjoner utarbeidet i forskningsprogrammet til Norges forskningsråd betegnet Utnyttelse av Solenergi (IE). Norge deltar i det internasjonale forskningssamarbeidet innenfor OECD om biofotolytisk hydrogengassproduksjon (IEA Hydrogen Implementing Agreement). NIVA har vært norsk ankerinstitusjon i denne sammenheng. Virksomheten i IEA vil fortsette i et Annex 15: Photobiological hydrogen production, som er under tilrettelegging. NIVA vil bidra og har levert innspill til denne oppgaven.

Konvertering av CO₂ fra røykgasser via mikroalger med hydrogengassproduksjon bør inngå som et viktig element av algekulturteknologi i norsk sammenheng.

Med realisering av et eksperiment- og produksjonsanlegg for mikroalger i Vestfold vil det kunne bli skaffet praktisk grunnlag for positiv og betydningsfull forskningsinnsats i Norge når det gjelder biofotolyse/hydrogengassproduksjon.

Referanse

Algekulturteknologi. Eksperiment- og produksjonsanlegg for mikroalger i Vestfold. Delrapport 1: CO₂-binding og H₂-produksjon. NIVA. ISBN 82-577-3586-8. OSLO 1999. 56 pp.



De samme egenskaper som innebærer at mikroalger kan være problemorganismer, gjør dem effektive som nyttevekster.

3. Livsløpsanalyse

En livsløpsvurdering (life cycle assessment, LCA) av et produkt er definert som en systematisk kartlegging og vurdering av miljø- og ressurspåvirkninger gjennom hele livsløpet til produktet. Formålet med dette delprosjektet var å vurdere hvilken netto effekt på utslipp av klimagasser man kan ha av å produsere mikroalger basert på industrielle utslipp av CO₂, slik at den reelle klimagassreduksjonen framkommer. Hensikten er å bedre beslutningsgrunnlaget for den eventuelle videre satsningen på algekulturteknologi i klimagass-sammenheng. Vi har sett på før- og energiprodukter fra mikroalger, og jevnført disse med sammenlignbare, konvensjonelle produkter. Ut fra målsettingen har vi bare vurdert energiforbruk og utslipp av klimagasser, og begrenset oss til de delene av livsløpet som vi anser som forskjellige for de produktene vi sammenligner.

Arbeidet er en del av en forstudie som skal vurdere potensialet av å produsere alger i større skala. Fordi det er mange muligheter for design av et produksjonsanlegg for alger, har vi måttet velge noen forutsetninger som ikke nødvendigvis samsvarer med de endelige løsninger. Ved å utføre en LCA på et tidlig tidspunkt som dette, innfører en derved en større usikkerhet, men samtidig oppnår en å kunne ta hensyn til resultatene i utviklingen av produksjons-systemene (produktutvikling).

Innenfor fôrområdet er det utført tre vurderinger:

- Mikroalger som dyrefôr.
- Grunnlagsanalyse på soyamel.
- Grunnlagsanalyse på fiskemel.

Livsløpsvurderingene av soyamel og fiskemel ble basert på faktisk informasjon fremskaffet fra gjeldende prosesser, mens livsløpsvurderingene av før fra algebiomasse er mer teoretisk fundert, basert på en rekke forutsetninger, slik at resultatene her er mer usikre.

Med de forutsetninger vi har lagt til grunn for algeproduksjon, er det relativt energikrevende å produsere før fra algebiomasse i lukkede reaktorer, omtrent dobbelt så høyt som ved produksjon av fiskemel, og betydelig høyere enn ved produksjon av soyamel. Et mulig alternativ til å pumpe kulturen med høy hastighet, er imidlertid å bruke såkalte "air-lift"-systemer, som både holder kulturen i suspensjon og sørger for gassutveksling. Det betyr at pumping kan erstattes med gasskompresjon, som krever betydelig mindre energi. Det er sannsynlig at energiforbruket til selve algeproduksjonen derved kan reduseres med opptil 90%. Totalt energiforbruk vil i så fall kunne reduseres til anslagsvis 10 MJ/kg tørrstoff, som er omtrent halvparten av det som kreves for å produsere fiskemel, og i nærheten av det som kreves for å produsere soyamel.

Det må forutsettes at spillvarme kan betraktes som et avfallsprodukt og ikke belaster systemet.

Energibruken ved produksjon av alger er hovedsakelig elektrisk energi, mens den i større grad er av fossil opprinnelse ved produksjon av fiskemel og soyamel. Energi til pumping utgjør det største energiforbruket ved produksjon av alger i lukkede reaktorer, når en baserer seg på aktiv pumping av kulturen. Det vil derfor være spesielt viktig å optimalisere systemene for sirkulering av kulturen i et pilotanlegg.

Bidrag til global oppvarming (GWP) ligger på omtrent samme nivå ved produksjon av algebiomasse som ved produksjon av soyamel. Både alger og soyamel bidrar ca. 68% mindre til GWP enn produksjon av fiskemel. Ved produksjon av alger stammer bidraget i all hovedsak fra kunstgjødselproduksjonen. Dersom all kunstgjødsel kan erstattes med for eksempel næringsalter fra avløpsvann, vil utslippene av klimagasser reduseres med mer enn 90%, forutsatt at ikke utnyttelsen av utløpsvann impliserer andre utslipp av klimagasser. Erstatning av soyamel og fiskemel med "algemel" vil da føre

til en reduksjon i utslipp av klimagasser knyttet til fôrmelet med 90-95%. Selve algeproduksjonen bidrar i svært liten grad til utslipp av klimagasser.

Dersom spillvarme inkluderes som en ressurs, vil en med det aktuelle produksjonssystemet få et meget høyt energiforbruk ved algeproduksjonen. Med andre ord forutsetter dette produksjonskonseptet at spillvarmen kan betraktes som et produkt uten verdi (avfall). I dette tilfellet kan spillvarmen ekskluderes fra regnskapet.

Innenfor området energi er det utført tre vurderinger:

- Mikroalger som råstoff for produksjon av biodiesel.
- Mikroalger som hydrogenprodusent.
- Grunnlagsanalyse på fossilt brensel.

Forbruket av energi knyttet til framstilling og distribusjon av petroleumsdiesel utgjør ca. 6,5 % av energiutbyttet. For algebasert hydrogenproduksjon har vi kommet fram til et noe større forbruk, ca. 20% av energiutbyttet når gasseparasjon og -distribusjon ikke er inkludert. For produksjon av biodiesel i lukket reaktor basert på pumping av kulturen er energiforbruket betydelig større enn energiutbyttet. Dersom pumping erstattes av "air-lift"-systemer (se ovenfor), eller dyrkingen foregår i åpne anlegg, vil det trolig være mulig å få et positivt energiutbytte.

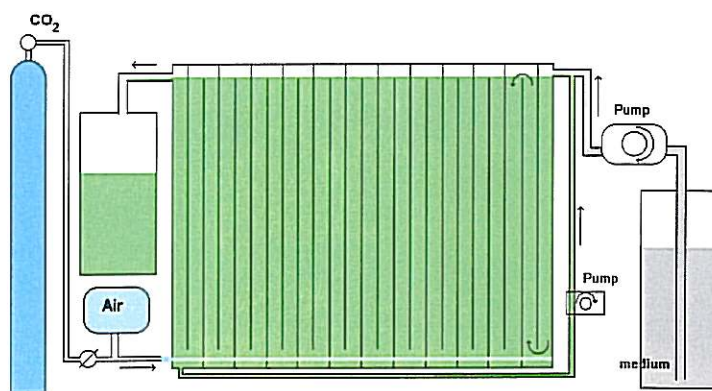
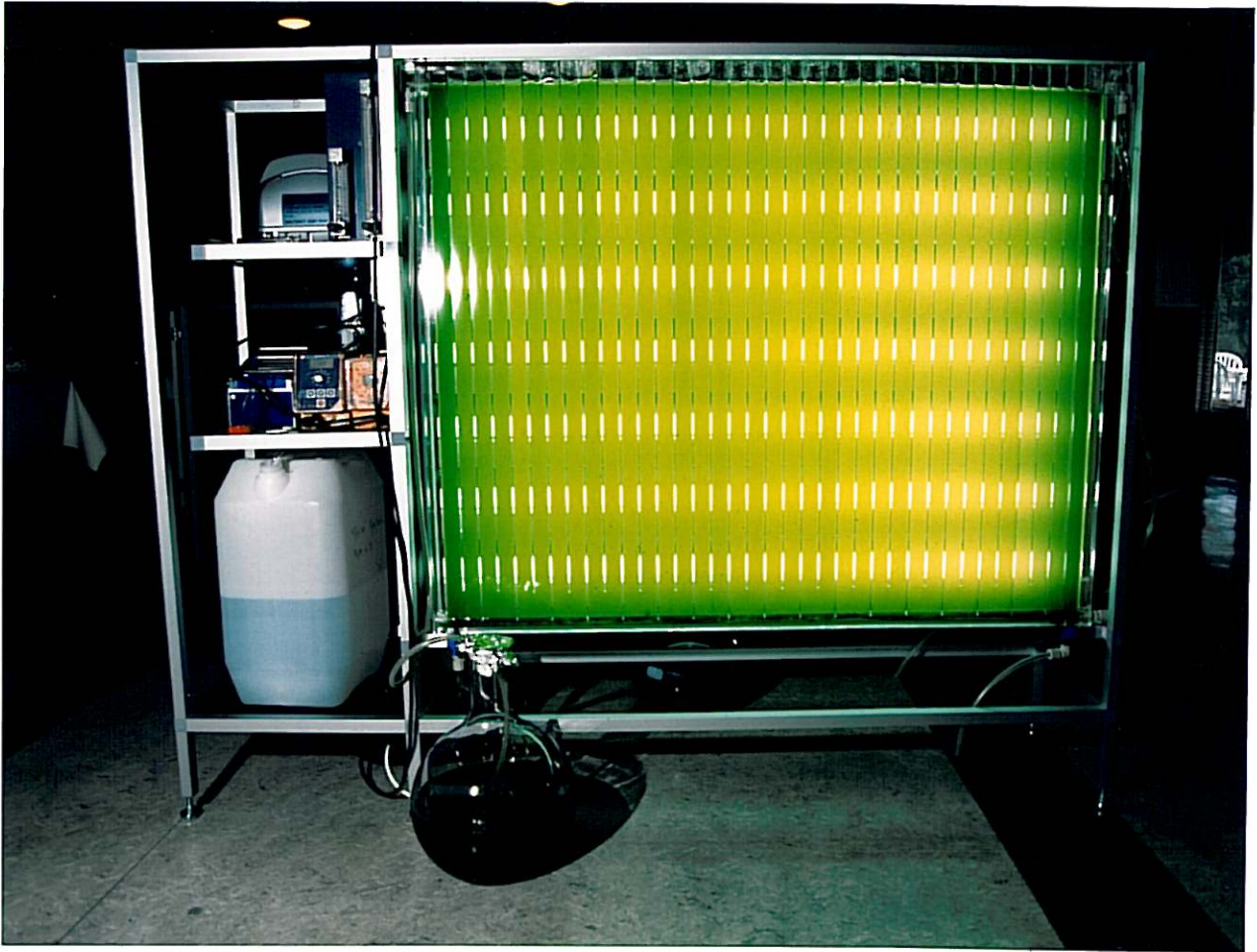
Sammenligningene av de ulike systemene viser at utslipp av CO₂ og andre klimagasser totalt er størst for petroleumsdiesel. Biodiesel kommer ut med 35% lavere påvirkning, og kan reduseres ytterligere ved resirkulering av næringsstoffene. En erstatning av petroleumsdiesel med biodiesel basert på alger vil derfor kunne føre til en reduksjon av klimagassutslippene med opp mot 50%. For begge disse systemene er de fleste bidragene knyttet til framstilling og forbrenning av brenselet. Det er relativt små bidrag fra distribusjon av brensel. Dette gjelder også forbruk av energi. Disse resultatene tyder på at plassering av anlegget og distribusjonsveier er av mindre betydning for miljøprofilen for de to systemene.

Hydrogengass-systemet gir et nærmest neglisjerbart bidrag til globalt oppvarmingspotensial (GWP). Hydrogengass fra algeproduksjon vil kunne bety en reduksjon av GWP på mer enn 90% i forhold til bruk av fossil diesel.

Vi har ikke inkludert distribusjon av hydrogengass til forbruker, siden det er sjelden med opplegg for dette i dag. For biodiesel og petroleumsdiesel var som nevnt distribusjonsleddet av relativt liten betydning. Konklusjonene blir derfor sannsynligvis uendret om man inkluderer distribusjonsleddet også for hydrogengass. Vi må dessuten poengtere at hydrogengass-systemet er basert på forutsetninger som ikke er utprøvd i stor skala, og at heller ikke separering av hydrogengass er inkludert i systemet. Det er liten grunn til å tro at separering av gassen vil bidra vesentlig til klimagassutslipp.

Referanse

Algekulturteknologi. Eksperiment- og produksjonsanlegg for mikroalger i Vestfold. Delrapport 2: Livsløpsanalyser av CO₂-baserte algeprodukter. NIVA. ISBN 82-577-3587-6. Oslo 1999. 53 pp.



Fotobioreaktor til kontinuerlig produksjon av algebiomasse.

4. Produksjon av mikroalger med avfallsutnyttelse

Spillvarme

Temperaturen påvirker de fysiologiske prosessene som er grunnlaget for vekst av mikroalger. En effektiv temperaturstyring er derfor nødvendig for å oppnå maksimal produksjon i en algereaktor. Ved dagslysbasert produksjon av mikroalger i Norge vil det være behov for tilførsel av varme til kulturen i mesteparten av vekstsesongen, og særlig på våren og høsten. Optimal temperatur vil være avhengig av hvilke arter som skal produseres, men de fleste aktuelle mikroalgene har optimumstemperaturer mellom 24 og 35°C.

Fordi både fotosyntesen, som fører til oppbygging av biomasse, og respirasjonen, som fører til tap av biomasse, er temperaturavhengige, vil det være en fordel om temperaturen i en algekultur kan tilpasses variasjonene i lysforhold gjennom døgnet. Det kan derfor være behov for et system for både kjøling og oppvarming av algereaktoren.

Når avgasser fra industri benyttes som CO₂-kilde, vil varmebehovet i algereaktoren helt eller delvis kunne dekkes av gassens varmeinnhold. Dersom dyrkingen foregår i åpne anlegg, vil varmen kunne avgis ved direkte kontakt med algekulturen. Lukkede reaktorer bør fortrinnsvis bygges inn i veksthus, som kan varmes opp av avgassene gjennom varmeveksling før gassen ledes inn i kulturen. Utover oppvarming av selve algekulturen vil det i et anlegg for produksjon av alger være behov for varmeenergi til bl.a. tørking av algebiomasse og til sterilisering av vekstmedier og utstyr.

Avløpsvann

Avløpsvann kan brukes som et alternativ til kunstgjødsel som næringskilde for algeproduksjon. Dermed kan man oppnå en effektiv rensing av avløpsvannet, samtidig som CO₂ forbrukes ved algenes fotosyntese. I et totalt klimagass-regnskap er avløpsvann å foretrekke fremfor kunstgjødsel fordi fremstilling av kunstgjødsel medfører et betydelig utslipp av klimagasser.

Arealbehovet for rensing av kommunalt kloakkvann er beregnet til minst 6 m² per person som er tilknyttet anlegget. En ulempe med å bruke algeproduksjonsanlegg for rensing av avløpsvann i Norge er at effekten vil være sesongavhengig. Dersom renseeffektiviteten skal opprettholdes, kreves derfor et større areal av anlegget på våren og høsten enn på sommeren. Det er trolig ikke hensiktsmessig å drive et slikt anlegg på vinteren pga. utilstrekkelig lysinnstråling.

Bruk av avløpsvann som næringskilde for algeproduksjon har konsekvenser for kvaliteten og mulige anvendelsesområder for algebiomassen. Det vil være begrensede muligheter til å kontrollere hvilke algearter som utvikler seg i anlegget, og kvaliteten på biomassen vil variere avhengig av dette og av variasjoner i avløpsvannets sammensetning. Videre må man ta hensyn til muligheten for at spesielle forurensningskomponenter fra avløpsvannet kan akkumuleres i algene.

Eksisterende fullskala anlegg for behandling av avløpsvann med mikroalger er basert på åpne dammer eller kanaler. I noen mindre anlegg har man brukt lukkede reaktorer hvor algekulturen holdes i rør av gjennomsiktig plast. Algene separeres i utløpet av algereaktoren ved sentrifugering, sedimentering, filtrering eller flokkulering. I noen tilfelle brukes biologisk filtrering ved hjelp av krepsdyr eller muslinger for å fjerne algene.

Systemer med immobiliserte alger kan også benyttes for rensing av avløpsvann. I disse vokser algene som en film på et fast substrat eller innstøpt i et matrix av alginat. En fordel med bruk av immobiliserte alger er at separeringen av mikroalger fra avløpsvannet blir mindre ressurskrevende.

Algebiomasse produsert i avløpsvann kan brukes som energikilde, ved direkte forbrenning eller etter fermentering til gass. Algebiomassens energiinnhold er ca. 5 kcal g^{-1} (21 kJ g^{-1}), og effektiviteten ved overføring av energi til metan er beregnet til 70-90%.

Mikroalger har et høyt innhold av ernæringsmessig verdifulle komponenter som f.eks. proteiner, vitaminer og pigmenter. Algebiomasse kan derfor brukes som førtilskudd til husdyr eller i akvakultur. Dette stiller imidlertid en del krav til det avløpsvannet som benyttes, slik at akkumulering av skadelige forurensningskomponenter eller smittestoffer fra avløpsvannet kan unngås.

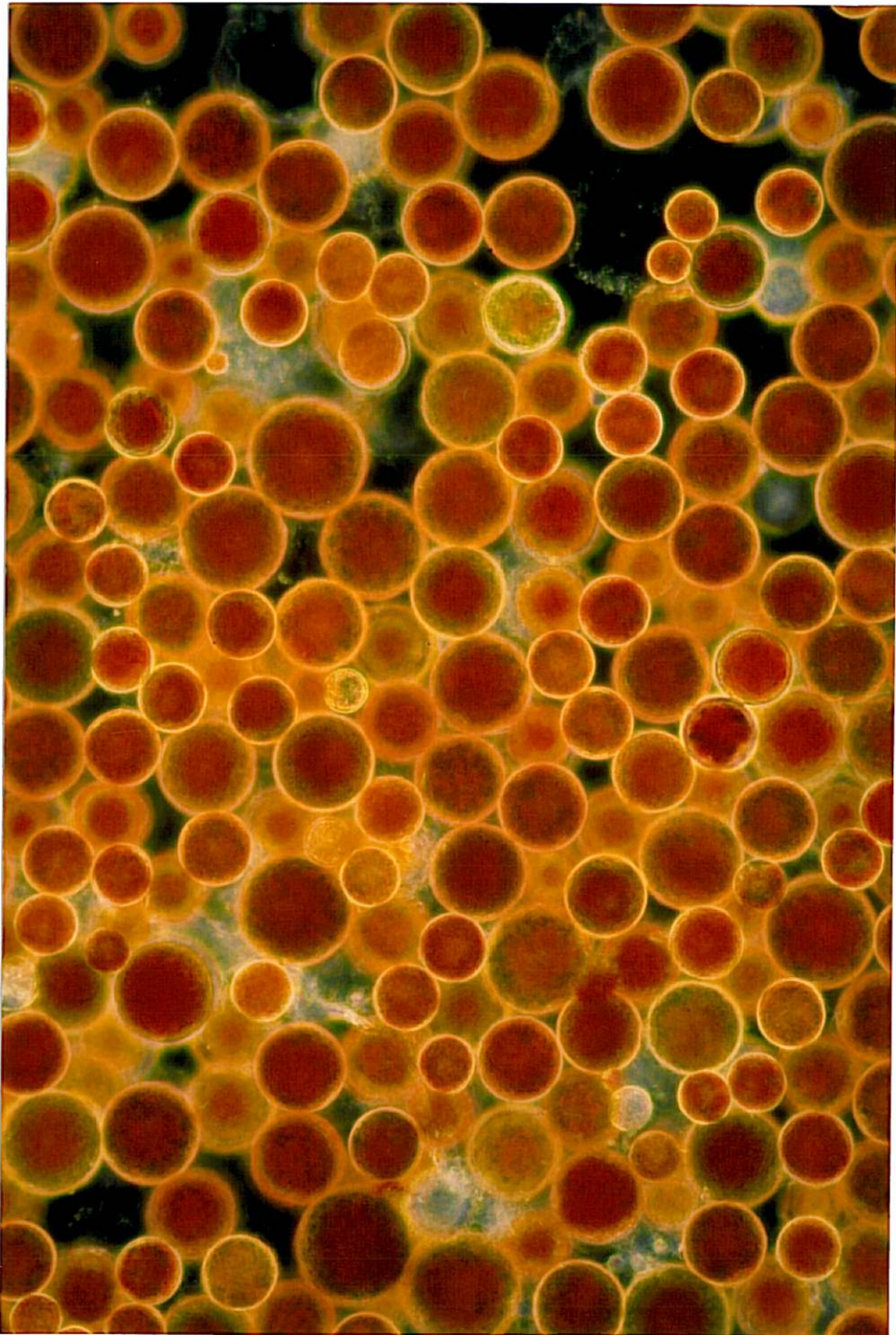
Avløpsvann som er vurdert som næringskilde for algeproduksjon i Vestfold, er kommunalt kloakkvann samt avløpsvann fra et planlagt fiskeoppdrettsanlegg på Slagentangen. Ved en lokalisering av et algeproduksjonsanlegg i tilknytning til FORESTIA Agnes fabrikk vil det være lett tilgang til avløpsvann fra det nye renseanlegget for Larvik kommune som er under bygging i samme område. Avløpsvannet antas å være egnet som vekstmedium for alger, men med de generelle ulemper som bruk av avløpsvann innebærer m.h.t. produktkvalitet.

På Slagentangen er det tilgang til sanitærvløpsvann fra Esso Norge (ca. 90 personekvivalenter). Det innebærer et potensiale for produksjon av ca. 14 kg algebiomasse per døgn. Dersom et større algeproduksjonsanlegg på Slagentangen skulle baseres på kommunalt avløpsvann, måtte derfor avløpsvannet ledes fra Tønsberg kommunes renseanlegg på Valløy.

Avløpsvannet fra Fiskeoppdrettsanlegget ved Slagentangen ventes å ha for lave konsentrasjoner av næringssalter til direkte å være egnet for produksjon av mikroalger. Mer konsentrerte delstrømmer innenfor anlegget kan eventuelt utnyttes for begrenset produksjon f.eks. for å dekke anleggets behov for alger som fôr. Samlokalisering av anlegg for algeproduksjon og fiskeoppdrett kan gi grunnlag for utvikling av integrerte alge/fisk-anlegg som er spesielt egnet for bruk i aride, tropiske områder.

Referanse

Algekulturteknologi. Eksperiment- og produksjonsanlegg for mikroalger i Vestfold. Delrapport 3: Utnyttelse av spillvarme og avløpsvann for produksjon av mikroalger. NIVA. ISBN 82-577-3588-4. Oslo 1999. 30 pp.



Karotenoider - f.eks. astaxanthin, her i *Haematococcus* sp. - er viktige verdistoffer i mikroalger.

5. Kommersiell mikroalgedyrking - begynnelse i Vestfold

Proteiner, lipider, karbohydrater, pigmenter og spesielle bioaktive stoffer er eksempler på produkter som kan fremstilles gjennom dyrking av mikroalger. Som kulturorganismer er mikroalgene egnet for genetisk seleksjon (fôredling).

Produksjon av mikroalger med kommersiell interesse tok til i 1950-1960-årene, først og fremst i Japan og USA. Samtidig ble anvendelsen av dyrkingssystemer med mikroalger for behandling av avløpsvann et nytt teknologisk virksomhetsområde. I 1980-årene ble fysiologisk egnede kulturalger tatt i bruk til storskala fremstilling av handelsprodukter. Arter av slektene *Chlorella*, *Dunaliella*, *Haematococcus* og *Spirulina* er velkjente eksempler anvendt i industriell masseproduksjon. Fôrorganismer i forbindelse med akvakultur fikk samtidig praktisk betydning - bl.a. arter i slektene *Isochrysis*, *Rhodomonas* og *Tetraselmis*, og har blitt et omfattende område innenfor algekulturteknologi. Mikroalgenes muligheter knyttet til energisektoren har i 1990-årene dessuten gitt nye utviklingstrender av praktisk interesse.

Produksjon av algebiomasse i Vestfold vil utføres i industrianlegg til formålet, eller i veksthusbaserte dyrkingsanlegg. Markedet for varen som kan fremstilles er betydelig både i volum og anvendelse. Verdistoffene som fremstilles av de relevante artene anvendes til ernæring, industrikjemikalier, farmasi/medisin og landbruk/akvakultur.

Kriterier for utvelgelse av mikroalger til utprøving i Vestfold omfatter krav til kulturalgenes vekstfysiologiske egenskaper, praktiske geografiske forhold og forretningsmessige sider knyttet til markedsbehov/økonomi for produktene det gjelder. Anvendelsesområdene for aktuelle algeprodukter vil bli lagt til grunn for utvelgelse av kulturalger til utprøving i et eksperiment- og produksjonsanlegg. Fire typer mikroalger (modellorganismer) - hvor det foreligger kloner med relevante egenskaper i NIVAs kultursamling - vil benyttes. De kommersielt interessante produkter som har første oppmerksomhet omfatter fôr til husdyr og i akvakultur, helsekost/tilsetningsstoffer i mat, og medisinske handelsvarer.

Innenfor produktkategoriene som oppfyller forutsetningene til kommersiell drift, kan følgende praktiske hensyn for virksomheten legges til grunn:

- Algene produseres i sammenheng med en allerede akseptert handelsvare.
- Markedet for vedkommende ferdigprodukt må være betydelig og/eller i sterk vekst.
- Mikroalger som råstoff må ha konkurransefortrinn i forhold til alternativer det konkurrerer med, enten når det gjelder egenskaper/kvalitet eller pris.

Synergimuligheter som kan foreligge ved en samlokalisering i Vestfold av et produksjonsanlegg for mikroalger med henholdsvis et akvakulturanlegg for oppdrett av Sea Bass, og et veksthusanlegg for planteproduksjon ("Snekkenes-modellen") er gjennomgått. For begge alternativer foreligger positive muligheter. Det er nødvendig å få utført konkrete økonomiske og markedsmessige undersøkelser før beslutninger om realisering i stor skala blir gjort.

Biomasse av mikroalger - tørket produkt - kan benyttes som råstoff til mange ulike formål. Det ble foretatt en vurdering av slike eventuelle anvendelser ved bedrifter i Vestfold (lokal ferdigvareproduksjon), og/eller ved viderefôredling utenfor fylket i Norge eller utlandet. En analyse av lokale forutsetninger er utført for å forberede et eksperiment- og produksjonsanlegg for mikroalger i Vestfold. Faktorer knyttet til arealdisponering, reguleringsmessige forhold, praktiske dyrkingsmessige forutsetninger (f.eks. lys, spillvarme, karbondioksid, vannforsyning, plantenæringsstoffer) og

infrastruktur inngikk i vurderingene.

Det ble foretatt en sammenliknende vurdering mellom de to hovedalternativene for lokalisering - henholdsvis Lillevik, Larvik kommune og Slagentangen, Sem kommune - med bakgrunn i stedsanalysene. Begge alternativer fremviste gode forutsetninger for virksomhet med algekulturteknologi. Ut fra vektlegging av de spesielle praktiske forutsetningene blir det foreslått å velge en lokalisering for et pilotanlegg ved ESSO Norge AS på Slagentangen.

En foreløpig vurdering ble gjort av forretningsmuligheter med bakgrunn i behovet på verdensmarkedet for algebiomasse og verdistoffer. Produkt- og markedsanalyser blir en betydningsfull del av det videre arbeid med tilretteleggingen av algekulturteknologi i Vestfold. Viktige hensyn knyttet til pilotfasen ved det planlagte eksperiment- og produksjonsanlegg for mikroalger er poengtert og formulert i delrapporten.

Referanse

Algekulturteknologi. Eksperiment- og produksjonsanlegg for mikroalger i Vestfold. Delrapport 4: Algetyper, anvendelsesområder og forretningsmuligheter. NIVA. ISBN 82-577-3589-2. Oslo 1999. 32 pp.



Pigmenter og probiotika hører til algeproduserte naturstoffer som inngår i funksjonell ernæring til dyr og mennesker.

6. Diskusjon og perspektiv

Norge har en solid vitenskapelig tradisjon i utforskningen av alger og algevegetasjon. Når det gjelder praktisk utnyttelse, er det makroalgene - marine ressurser av bl.a. tang og tare - som hittil har hatt særlig økonomisk betydning. En moderne storindustri har bl.a. vokst frem på dette grunnlaget.

Mikroalgene er nå i utgangsposisjon til å gi forutsetninger for en ny næringsvirksomhet. De representerer den største, nærmest ubenyttede biologiske ressurs menneskene kan ta i bruk til produksjonsformål. Internasjonalt utvikler det seg raskt en omfattende økonomisk anvendelse av mikroalger innenfor sektorer knyttet til bl.a. næringsmidler, spesialkjemikalier og energi.

NIVA har siden sin opprettelse hatt en betydelig forskningsaktivitet på fagfeltet mikroalger. I nært samarbeid med forskningsmiljøene ved universiteter og høyskoler er det fremkommet et kunnskapsgrunnlag som nå bør få aktuell praktisk/økonomisk oppmerksomhet. Positive muligheter foreligger for en næringsvirksomhet basert på mikroalger som samtidig vil gi miljømessige forbedringer. Denne bestrebelsen innenfor forskning og utvikling er det som betegnes algekulturteknologi (AKT). Det er forutsetninger og muligheter her i landet som nå trenger å utprøves for rasjonell realisering.

Algekulturteknologi som helhetlig virksomhetsområde

Algekulturteknologi går ut på å anvende mikroalger - prokaryote og eukaryote fotosyntetiske organismer - til å fremstille stoffer, eller i prosesser til spesielle formål. Mikroalgene utgjør et nytt miljøvennlig produksjonsalternativ for essensielle varer basert på fremgangsmåter innordnet prinsippene trukket opp i Agenda 21 (The Rio Declaration on Environment and Development).

Kortfattet kan virksomheten beskrives slik:

- Algekulturteknologi benytter via fotosyntesen sollys som primær energikilde. Biofotolysen av vann i fotosynteseprosessen fremskaffer kjemisk energi (lagret i form av ATP) og hydrogen (i form av NADPH₂). Ved enzymatisk reduksjon av protoner kan hydrogengass utvikles.
- Det stofflige grunnlag for algekulturteknologi utgjøres av vann, plantenæringsstoffer og karbondioksid. Innebygget i dette ligger muligheter for utnyttelse av avgasser (f.eks. CO₂) og avfallsstoffer (organisk stoff, kloakkvann, husdyrgjødsel etc.) til produksjonsformål.
- I bioreaktorer dyrkes mikroalger og fotosyntetiske prokaryoter (blågrønnalger og/eller anoxyfotobakterier) til produksjon av biomasse/hydrogen.
- Integrerte separasjons- og renseprosesser tilpasses de komponenter - ekstracellulære og intracellulære - som skal utvinnes og anrikes (hovedprodukter og biprodukter).
- Flere kategorier produkter er av praktisk interesse å fremstille:
 - høypriskomponenter i små kvantiteter (f.eks. farmasøytika)
 - lavpriskomponenter i store kvantiteter (f.eks. fôrstoffer)
- Restprodukter etter utvinning av komponenter kan eventuelt føres tilbake til bioreaktorene (bl.a. til gjenvinning av plantenæringsstoffer).

Status og utviklingsbehov

Gjennom forskning her i landet, finansiert av offentlige midler, har kunnskapen om mikroalgenes økologi, fysiologi og stofflige egenskaper blitt konkretisert. Eksperimentelle studier har i stor grad klarlagt vekstforhold og krav til miljøfaktorer. Samtidig har praktiske systemer for kultivering/produksjon av mikroalger blitt utviklet. Interessante arter med hensyn til anvendelsesmulighet og dyrkningsegenskaper er isolert som klonkulturer og oppbevart i NIVAs kultursamling. Sammen med den øvrige norske kompetanse på fagfeltet mikroalger danner dette et positivt grunnlag for å komme videre med en praktisk realisering/utlevelse av algekulturteknologi i norsk sammenheng. Det er samtidig nødvendig å nevne at gjennom fremveksten av dette fagfeltet er det etablert et fungerende kontaktnett med de internasjonale forskningsmiljøene som er ledende i utviklingen av algekulturteknologi på verdensbasis.

Det første behov som peker seg ut er å løfte AKT fra laboratorieskala opp til produksjon i et pilotanlegg. Å kunne komme fra gram-nivå til kilo-nivå i utbytte ved dyrkingen er et ufravikelig krav for å avansere i praktisk retning. I dette ligger åpningen bl.a. for utprøving og fortroliggjøring av mikroalger som råstoff og til verdiskapning.

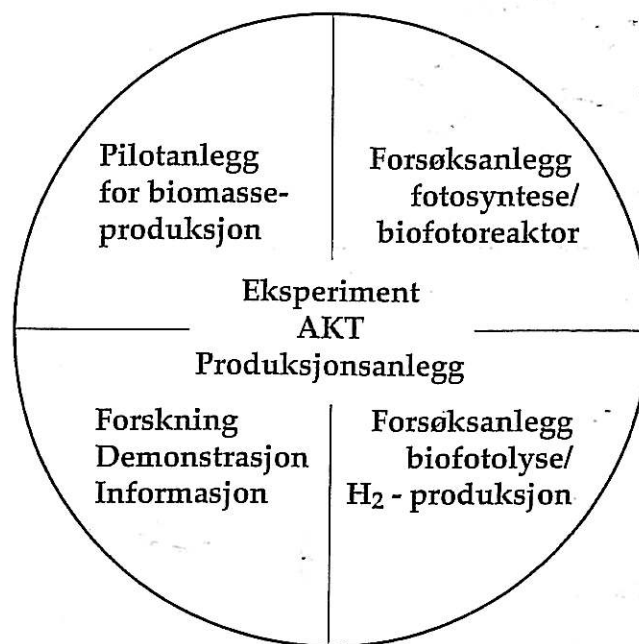
For å fremme en formålstjenlig utvikling av en aktuell næringsvirksomhet i Norge er det behov for å legge til rette for et funksjonelt samarbeid mellom forskningsmiljøene som besitter relevant kompetanse om mikroalger. Spesielt viktig er det å skape en kontaktflate med aktuelle interessenter for industri, primærnæringer og myndigheter. Videre trengs en bredt anlagt informasjonsvirksomhet for å gi kunnskap og samfunnsbevissthet om utviklingen som foregår.

Eksperiment- og produksjonsanlegg for mikroalger i Vestfold

Det er gjort et innledende arbeid med å forberede etablering av et praktisk anlegg for algekulturteknologi, AKT-ANLEGGET, på Slagentangen i Vestfold. Samarbeidspartnere er foreløpig: Næringscenteret i Vestfold AS, ESSO Norge AS, Norges forskningsråd og NIVA. Andre instanser som er i kontakt om planer for algekulturteknologi er bl.a.: Tjeldbergodden Industriforening, Larvik kommune, Tingvoll kommune, Senter for fornybar energi, Nordland fylkeskommune samt private interessenter.

Viktige mål for det planlagte AKT-ANLEGGET omfatter flere oppgaver og praktiske forhold (FIGUR 1):

- AKT-ANLEGGET skal i nært samarbeid med næringslivet utvikles til å bli et verksted for mikroalgeproduksjon, forskning, utvikling og formidling/undervisning om fotosyntetiske mikroorganismer og anvendelsen av disse.
- AKT-ANLEGGET skal fostre praktisk kompetanse som kan bidra til å grunnlegge en ny norsk næringsvirksomhet med stort potensial både teknologisk og markedsmessig.
- AKT-ANLEGGET skal bidra til å utvikle og finne anvendelse av mikroalger til å løse forurensningsproblemer, nyttiggjøre avfallsprodukter basert på fremgangsmåter innordnet i prinsippene trukket opp i Agenda 21 (The Rio Declaration on Environment and Development) og Kyotoprotokollen.
- AKT-ANLEGGET skal gi et hensiktsmessig grunnlag for eksperimentell virksomhet knyttet til biofotolyse/hydrogenproduksjon (IEA Hydrogen Agreement, Task 14: Photobiological Hydrogen Production, 1999-2002).



Figur 1. Prinsippskisse av eksperiment- og produksjonsanlegg for mikroalger i Vestfold.

Utførelse og kostnadskalkyle

I forprosjektet som ble gjennomført i 1998 er det gjort en tilrådning om at første skritt på utviklingen av AKT-ANLEGGET er installering av et fotoreaktorsystem til biomasseproduksjon på Slagentangen i Vestfold.

Stedsvalget er godt belyst og har bl.a. følgende fordeler:

- Miljøvernavdelingen i Vestfold fylke anbefaler denne lokaliseringen.
- Kommuneplanen - Sem kommune - har klarert den aktuelle anvendelsen.
- Tilgangen på røykgass og spillvarme har et langsiktig perspektiv.
- Transportveien for røykgass og spillvarme blir optimalt korte.
- Arealet planlegges leiet ut til formålet av eieren, ESSO Norge AS. Dette gir lave kostnader for nødvendig areal.

Dyrkingssystemet vil omfatte et utvalg av eksisterende typer fotobioreaktorer (NIVA-kanalreaktor, Bio-Fence Systemet og Photobioreactor Biostat). En bearbeidingsenhet for høsting og prosessering av biomasse vil bestå av utstyr for filtrering, sentrifugering, tørking, behandling og prøvepakking.

Et hus med laboratorium, verksted og kontorfunksjoner vil utgjøre et areal på ca 300 m². Laboratoriet bør bygges i tilknytning til et veksthus med muligheter også for utendørseksperimenter. Det er behov for å kunne benytte områder inne og ute til informasjonsformål (undervisning, forelesninger, veiledning, demonstrasjoner). Et personale på 6 ansatte vil inngå i forsøksvirksomheten (forskere, teknikere, assistenter).

Kostnadskalkylen for AKT-ANLEGGET beløper seg til omlag 6 millioner kroner.

Oppgaver i innledende virksomhet

De mest påtrengende funksjoner er å få brukt dyrkingssystemet til produksjon av biomasse av mikroalger til kvalitetstesting og praktisk utprøving. Et utvalg kloner fra NIVAs kultursamling vil i forsøksøyemed bli benyttet som aktuelle produksjonsorganismer. Anvendelsesområdene for mikroalgeproduktene - med spesiell økonomisk oppmerksomhet - er i første rekke knyttet til husdyrfôr, startfôr til akvakultur, helsekost, naturlige fargestoffer og bioaktive stoffer.

Samtidig med den faglige/teknologiske virksomheten vil det bli foretatt avklaring av vesentlige spørsmålsstillinger knyttet til bl.a. produkt- og markedsanalyser, foredlingsbehov og nye varer.

Norge deltar i forskningsvirksomheten i forbindelse med OECD-samarbeidet om utvikling av hydrogenenergisystemet. En sentral oppgave i forskningsaktiviteten er fotobiologisk H₂-produksjon, hvor fotosyntetiske mikroorganismer utgjør forutsetningen for den praktiske produksjonsprosessen. Det er gjort beslutning i 1999 om Annex 14 hvor bl.a. reaktorutvikling til formålet er en hovedoppgave. I første rekke dreier det seg om gjennomføringen av et treårig internasjonalt forskningsprogram for å realisere en praktisk biofotoreaktor til fremstilling av molekylært hydrogen. AKT-ANLEGGET vil kunne fungere som basis for eksperimentering med siktepunkt å ha fullverdig deltakelse i den aktuelle internasjonale forskningsvirksomheten. Sverige skal ha lederansvar for oppgaven knyttet til biofotolyse, med USA og Japan som fremtredende samarbeidspartnere. NIVA deltar i prosjektutarbeidelsen av forskningsvirksomheten.

AKT-ANLEGGETs funksjon til veiledning og demonstrasjon av hva algekulturteknologi innebærer og rommer av muligheter for næringsvirksomhet, vil få sentral oppmerksomhet. Det er nødvendig å kunne gi relevant informasjon om hvordan produksjon av mikroalger foregår, hva biomassen blir benyttet til i fremstilling av varer, og hvilken nytteverdi dyrkingen av mikroalger har som miljøforbedrende hjelpemiddel. Spesielt vil det være behov for å vektlegge den ressurs som fotosyntetiske mikroorganismer utgjør, og hvordan bruk av algekulturteknologi kan gi en fremgangsmåte til praktisk reduksjon av CO₂-utslipp og andre klimagasser. Spesielt interessant i stor skala er mulighetene for produksjon av hydrogengass som energibærer i et hydrogenenergisystem.

I samarbeid med universiteter og høyskoler vil AKT-ANLEGGETs bruk som forskningsverktøy bli planlagt og utformet. Det er behov for å kunne utføre studiearbeid knyttet til bl.a. mikroalgenes stoffskifteprosesser, vekstfaktorer, genetisk seleksjon (foredling) og dyrkingsteknologi. For å oppnå dette må det bl.a. tilrettelegges for at doktorgradsarbeid kan utføres med praktiske forsøk lagt til AKT-ANLEGGET.

Faglig råd og nasjonalt prospekt

Det oppnevnes et faglig råd - styringsgruppe - med representanter for vitenskap, industri, landbruk og forvaltning med oppgave å bistå i utførelse og drift av AKT ANLEGGET i Vestfold.

En plan for et nasjonalt satsningsprogram om forskning og utvikling knyttet til økonomisk utnyttelse av mikroalger bør utarbeides og iverksettes. Norges forskningsråd er en viktig innfallsvinkel til dette.

7. Aktuelle publikasjoner fra NIVA

- Källqvist, T. (1999): Algekulturteknologi - naturgitte forutsetninger og praktiske løsninger. *Vann* 34(1): 76-95.
- Rudi, K., Skulberg, O.M., Larsen, F. & Jacobsen, K.S. (1997): Strain characterization and classification of oxyphotobacteria in clone cultures on the basis of 16S rRNA sequences from the variable regions V6, V7, and V8. *Appl. Environ. Microbiol.* 63(7): 2593-2599.
- Skulberg, O.M. (1994): Oscillatorialean cyanoprokaryotes and their application for algal culture technology. - *Arch. Hydrobiol./Suppl.* 105, *Algological Studies* 75 265-278.
- Skulberg, O.M. (1995): Biophotolysis, hydrogen production and algal culture technology. - In: *Hydrogen Energy System*. Ed. Y. Yürüm. pp. 95-110 - Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Skulberg, O.M. (1999): Biofotolyse - produksjon av hydrogengass via fotosyntetiske mikroorganismer. *Vann* 34(1): 24-34.
- Skulberg, O.M. (1999): Dyrking av mikroalger - fra vitenskapelig spesialitet til industriell virksomhet. *Vann* 34(1): 15-23.
- Skulberg, O.M. (1999): Mikroalger - verdifull biologisk ressurs med stort praktisk potensial. *Vann* 34(1): 14.
- Skulberg, O.M., Carmichael, W.W., Andersen, R.A., Matsunaga, S., Moore, R.E. & Skulberg, R. (1992): Investigations of a neurotoxic oscillatorialean strain (Cyanophyceae) and its toxin. Isolation and characterization of homoanatoxin-a. - *Environmental Toxicology and Chemistry* 11: 321-329.
- Skulberg, R. & Skulberg, O.M. (1990): Forskning med algekulturer. - NIVAs kultursamling av alger. *Research with algal cultures - NIVA's Culture Collection of Algae*. Norsk institutt for vannforskning, Oslo. ISBN 82-577-1743-6. 32 pp.
- Østensvik, Ø., Skulberg, O.M., Underdal, B. & Hormazabal, V. (1998): Antibacterial properties of extracts from selected planktonic freshwater cyanobacteria - a comparative study of bacterial bioassays. *J. Appl. Microbiol.* 84: 1117-1124.
- Aasgaard, G. Fr. (1999): Algekulturteknologi - status og fremdrift. *Vann* 34(1): 96-103.
- Aasgaard, G.F., Englund, G., Hansen, H.E., Källqvist, T., Skulberg, O.M. & Skulberg, R. (1995): Professional background for development of algal culture technology - a perspective on progress. - Norwegian Institute for Water Research. ISBN 82-577-2900-0. Oslo. 21 pp.