



NIBIO

NORSK INSTITUTT FOR
BIOØKONOMI

NIBIO RAPPORT

VOL.: 1, NR.: 62, 2015

MIKROALGERS POTENSIAL SOM PROTEINKILDE I FÔR TIL STORFE OG GRIS

Selvberging i den nye bioøkonomien



KARI SKJÅNES

Divisjon Miljø og Naturressurser

TITTEL/TITLE

MIKROALGERS POTENSIAL SOM PROTEINKILDE I FÔR TIL STORFE OG GRIS -
Selvberging i den nye bioøkonomien

FORFATTER(E)/AUTHOR(S)

KARI SKJÅNES

DATO/DATE:	RAPPORT NR./ REPORT NO.:	TILGJENGELIGHET/AVAILABILITY:	PROSJEKT NR./PROJECT NO.:	SAKSNR./ARCHIVE NO.:
11.12.2015	1/62/2015	Åpen	8979	15/1888
ISBN-NR./ISBN-NO:	ISBN DIGITAL VERSION/ ISBN DIGITAL VERSION:	ISSN-NR./ISSN-NO:	ANTALL SIDER/ NO. OF PAGES:	ANTALL VEDLEGG/ NO. OF APPENDICES:
ISBN 978-82-17-01523-9	1	ISSN 2464-1162	26	0

OPPDRAUGSGIVER/EMPLOYER:

Folvengaard/
Fylkesmannen i Sogn og Fjordane

KONTAKTPERSON/CONTACT PERSON:

Dag Hjelle

STIKKORD/KEYWORDS:

Mikroalger, dyrefôr, protein,
fotobioreaktorer, algeproduksjon,
næringsinnhold, storfe, gris, selvforsyning

FAGOMRÅDE/FIELD OF WORK:

Mikroalgeteknologi

SAMMENDRAG/SUMMARY:

Behovet for vegetabilsk protein til dyrefôr i norsk landbruk, blir per i dag ikke dekket av norskprodusert protein, og norsk kjøtt og melkeproduksjon er i dag avhengig av import. Totalt er 44% av ingrediensene til norsk kraftfôr importert, og import utgjør 93% av proteininnholdet. Mikroalger har høyere proteininnhold enn både tradisjonelle og alternative vegetabilske proteinkilder, og har i tillegg høyt innhold av andre næringsstoff som vitaminer, mineraler, flerumettede fettsyrer og antioksidanter. Næringsinnhold vil variere mye mellom artene, og i mange tilfeller kan næringssammensetningen styres med bruk av dyrkingsbetingelser. Forsøk med mikroalger som fôrkilde til storfe, gris og andre husdyr, har gitt gode resultater mht fôraksept, fôropptak, fordøyelighet, veksthastighet, totalvekt, fertilitet, melkeproduksjon, og proteininnhold i melk. Mikroalger blir i dag produsert kommersielt mange ulike steder i verden, og det meste blir solgt som dyrefôr eller helsekost. Det har vært mye forskning innen reaktorteknologi for produksjon av mikroalger de siste tiårene, og mange varianter av fotobioreaktorer har vært utprøvd. Algedyrking på norske gårdsbruk krever at dyrkingsteknologien blir tilpasset ressursgrunnet som foreligger, for optimal produksjon og bærekraft mht økonomi, miljø og ressursbruk. Informasjon som



foreligger per i dag, tyder på at mikroalger egner seg godt som fôrkilde til husdyr, og dersom hele ressursgrunnlaget på norske gårdsbruk blir utnyttet, kan mikroalger dyrkes på gårdene som fôr. Det konkluderes derfor at mikroalger er en kilde til vegetabilsk protein som har stort potensiale som fôrkilde i norsk landbruk

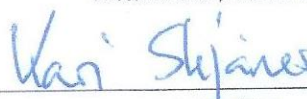
LAND/COUNTRY: Norge
FYLKE/COUNTY: Akershus
KOMMUNE/MUNICIPALITY: Follo
STED/LOKALITET: Ås

GODKJENT / APPROVED



TORMOD BRISEID

PROSJEKTLEDER / PROJECT LEADER



KARI SKJÅNES



INNHOOLD

1 INNLEDNING	6
2 NÆRINGSINNHOOLD I MIKROALGER	8
3 VALG AV ARTER	10
4 EFFEKT AV DYRKINGSBETINGELSER.....	12
5 FOTOBIOREAKTORER.....	14
6 FORBEHANDLINGAV ALGEBIOMASSE TIL FÔRPRODUKSJON.....	15
7 MIKROALGER SOM FÔR TIL STORFE OG GRIS	16
8 BÆREKRAFT	18
9 HVA GJENSTÅR?	19
10 KONKLUSJONER.....	20

1 INNLEDNING

Det er et velkjent faktum at verden er på vei mot en stor mangel på protein, som en konsekvens av rask befolkningsvekst og økonomisk vekst i utviklingsland/ tidligere utviklingsland. Etter hvert som økonomien i et land bedres, vil kravet til tilgang på proteinholdige næringsmidler øke tilsvarende (Millward & Jackson, 2004; Smil, 2002). Samtidig viser det seg at økonomisk vekst i et land fører til økt andel av animalsk protein i kosten. I norsk husdyrproduksjon er det også et økende krav til proteiner, både i melk og i slakt, i tillegg til økt melkeproduksjon per ku, noe som krever et tilstrekkelig innhold av protein i fôret. Fôrintaket til norske melkekyr fra beitemark, har gått ned fra 36% til 11% i løpet av 1950-2011. Denne nedgangen har ført til økt bruk av surfôr og kraftfôr, og i dag får norske melkekyr 45% surfôr og 42% kraftfôr. Kraftfôr til både storfe og gris inneholder hvete, bygg, havre, soya, raps, erter, melasse, potet, nepe og mais. Fôr til gris inneholder i tillegg en liten mengde animalsk fett, mens fôr til storfe inneholder vegetabilsk fett. Den største delen av kraftfôret består av korn, og en stor andel av norsk kornproduksjon går til dyrefôr (Adler & Løes, 2014; Åby et al., 2014). Korn blir brukt som en kilde til både karbohydrat og protein, men andelen protein i korn er ganske lavt, 12-14%. Soyaingredienser der oljeinnholdet er redusert, inngår som en viktig komponent i kraftfôr for å øke innholdet av protein. I kraftfôr til storfe er soyainnholdet ~7%, i kraftfôr til svin er innholdet ~10-20%. For å produsere 1kg svinekjøtt i Norge forbrukes det 0,5kg soya, og tilsvarende tall for storfe er 0,3kg soya/ kg kjøtt. (Lindahl, 2014). Etter at tilsetning av animalsk protein ble forbudt i fôr til voksne husdyr, overtok soya som den vanligste proteinkomponenten i fôret, men bruk av soya innebærer en stor ulempe: større avhengighet av import.

Selvforsyningsgraden av ulike proteinkilder i storfefôr i EU er totalt nede i 31%, og soya er desidert minst med 2% selvforsyning. I Norge er totalt 44% av ingrediensene til kraftfôr for husdyr importert, dette inkluderer 205 000 tonn/år soya. Norge er ett av svært få land der GMO i fôr er forbudt, og begrenset produksjon av GMO-fri soya i verden fører til at 80% importeres fra Brasil. Totalt 32% av karbohydratinholdet, 59% av fettinnholdet og 93% av proteininnholdet i norsk kraftfôr er importert (Lindahl, 2014; Åby et al., 2014).

Mikroalger som kilde til protein har vært i søkelyset siden 60-tallet (Woodham, 1969), men har hatt begrenset utbredelse. Det finnes mange fordeler ved bruk av mikroalger som proteinkilde til husdyr. Mikroalger har et svært høyt innhold av andre næringsstoff i tillegg til å ha et høyt innhold av protein, noe som innebærer at næringsinnholdet gir alger en høyere verdi som fôrkilde sammenlignet med konvensjonelle proteinkilder. Mikroalger kan produseres lokalt på gårdsbruk med behov for dyrefôr, og prosessering av algebiomassen kan utføres med relativt enkle metoder på samme sted, noe som effektiviserer produksjonskjeden fram til ferdig fôr. Produksjon av mikroalger har ingen behov for dyrkbar mark, og kan skje på arealer som ellers er lite hensiktsmessige å bruke til andre formål. Dermed vil produksjon av fôr fra mikroalger ikke innebære noen konkurranse med annen vegetabilsk proteinproduksjon.

Produksjonen i Norge kan skje sesongbasert ved utnyttelse av de nordiske miljøbetingelsene som lange dager med tilstrekkelig lysintensitet, og dagtemperaturer som ligger nær optimum for endel arter. Algedyrking kan også skje med en helårsproduksjon ved innendørs kontrollerte betingelser som kunstig lys og temperaturregulering. Alger kan dyrkes både autotroft (uten organisk

karbonkilde) og heterotroft (med organisk karbonkilde). Ved autotrof dyrking er CO₂ algenes eneste karbonkilde og blir i industriell algeproduksjon tilført på flaske, noe som medfører en betydelig utgift. Gårdsbruk med produksjon av husdyr har tilgang på husdyrgjødsel med potensiale som næringskilde for algedyrking. Gjødsel kan i tillegg fungere som substrat i en biogassproduksjon, der CO₂ blir produsert som et biprodukt. Biogass kan brukes til produksjon av varme som må tilføres algekulturer i perioder med lavere temperatur, der forbrenningen igjen vil avgi CO₂ som biprodukt. Dette betyr at mange av ressursene som allerede foreligger på et norsk gårdsbruk med husdyrproduksjon, kan bidra signifikant inn i en algeproduksjon både når det gjelder næringsstoff, CO₂, lysforhold og temperatur.

2 NÆRINGSINNHOOLD I MIKROALGER

Mikroalger kan inneholde svært høyt innhold av ulike næringsstoff, som protein, flerumettede fettsyrer (PUFA), mineraler, vitaminer og andre antioksidanter. Noen mikroalger kan også inneholde store mengder verdifulle stoffer som karotenoider og andre pigmenter, bioaktive polysakkarider og mange andre (Skjanes et al., 2013). Innholdet av ulike næringsstoff i mikroalgene vil variere mye mellom arter. En viktig faktor som er avgjørende for næringsinnholdet i alger, er imidlertid dyrkingsbetingelser, og dette er et element som i mange sammenhenger blir undervurdert (Hu, 2013). Dyrkingsbetingelser som er optimalisert for hurtigst mulig vekst hos hver enkelt art, vil vanligvis gi et høyt proteininnhold. Enkelte andre næringsstoff er sekundære metabolitter som blir produsert av algene under spesifikke dyrkingsbetingelser der miljøfaktorer induserer stressreaksjoner, se nedenfor. Vanlige tall i litteraturen for proteininnhold i mikroalger, er 55-60% protein (DW) hos *Spirulina*, 40-55% protein hos *Chlorella* og enkelte andre, og 30-45% hos en del andre arter (Batista et al., 2013; Becker, 2007; Chacon-Lee & Gonzalez-Marino, 2010; Gouveia et al., 2008; Guedes et al., 2015; Kent et al., 2015; Shields & Lupatsch, 2012; Tibbetts et al., 2015). Noen arter blir rapportert å ha svært ulikt proteininnhold i ulike studier, men som beskrevet nedenfor, er det grunn til å tro at det rapporterte proteininnholdet i noen arter kan økes betraktelig med optimalisering av dyrkingsbetingelsene. Til sammenligning er proteininnholdet i korn ca 12-14%, soya 35-45%, mais 3-9%, ris 8%, erter 20-25%, raps 35%, makroalger 10-40%, fiskemel 60-65%, insektmel 20-60%, egg 45-50%, gjær 40% (Chacon-Lee & Gonzalez-Marino, 2010; Gouveia et al., 2008; Meng & Slominski, 2005; Sánchez-Muros et al., 2014; Shields & Lupatsch, 2012; Yi et al., 2013).

Proteinkvalitet blir regnet som en viktig faktor når næringsinnhold i fôr skal vurderes. Proteinkvaliteten blir vurdert som en faktor av aminosyresammensetning, løselighet, kjemisk og enzymatisk hydrolyse i tarmkanalen og fysiologisk utnyttbarhet. Disse faktorene avhenger av proteinkilde, prosessering, interaksjoner med andre næringsstoff/ næringskilder, og spisevaner hos dyrene. Parametere som blir brukt i evaluering av proteinkvalitet inkluderer 'protein efficiency ratio' (PER), dvs vektøkning hos dyret per enhet protein som er tatt opp gjennom fôret og 'biological value' (BV) dvs mål på mengden nitrogen tatt opp i organismen. Andre parametere er 'digestibility coefficient' (DC) og 'net protein utilization' (NPU) (Becker, 2007).

Aminosyresammensetning viser i de fleste undersøkelser, stor variasjon mellom algearter, også innenfor samme slekt (Liu & Hu, 2013). Mikroalger har stort sett tilfredsstillende innhold av de essensielle aminosyrene, bortsett fra lavere innhold av cystein (Becker, 2004; Kent et al., 2015; Safi et al., 2013). Sammenlignet med soya, har mange algearter høyere innhold av mange essensielle aminosyrer, det gjelder for eksempel *Chlorella*, *Dunaliella*, *Scenedesmus*, *Spirulina* (Becker, 2007; Brown, 1991), *Porphyridium* og *Nannochloropsis* (Safi et al., 2013; Tibbetts et al., 2015). Sammenlignet med fiskemel, har *Nannochloropsis* og *Phaeodactylum* vist sammenlignbar aminosyresammensetning og -innhold, bortsett fra lavere lysininnhold. Isochrysis viste høyere innhold av 6 essensielle aminosyrer sammenlignet med fiskemel (Skrede et al., 2011). Det er imidlertid viktig å være oppmerksom på, at på samme måte som totalt proteininnhold og innhold av andre næringsstoff, vil innhold og sammensetning av aminosyrer variere med dyrkingsbetingelser (Samek et al., 2013).

Noen arter av mikroalger er kjent for å kunne produsere store mengder med karotenoider, for eksempel β -karoten, astaxanthin, lutein og canthaxanthin. I tillegg til å være kraftige fargestoff, har disse høy antioksidantaktivitet, med helsebringende effekter som immunstimulerende, antiinflammatoriske, nevrobekyttende, antikarsinogene, og hjerte/ karbeskyttende effekter (Dufossé et al., 2005; Guerin et al., 2003). I tillegg blir β -karoten konvertert til Vitamin A i kroppen til mennesker og mange dyr, inkludert drøvtyggere og gris, selv om konverteringsraten hos gris er lavere enn hos drøvtyggere. Astaxanthin er en nødvendig komponent i oppdrett av laksefisk for å oppnå rødfargen i kjøttet (Baker et al., 2002). Canthaxanthin, lutein og β -karoten brukes i fôr til fjørfe for å oppnå gulffarge i eggeplomme og skinn (Fredriksson et al., 2006).

Noen mikroalger kan produsere store mengder flerumettede fettsyrer (PUFA) som for eksempel omega-3 fettsyrene EPA, DHA og andre. PUFA er en nødvendig komponent i fôr til akvakultur, men kan også inngå som en ingrediens i fôr til storfe eller fjørfe dersom det er ønske om å øke innholdet av umettede fettsyrer i melk eller egg (Fredriksson et al., 2006; Vahmani et al., 2013). PUFA kan ha antiinflammatoriske effekter og andre helsebringende effekter (Simopoulos, 1999).

Mikroalger kan produsere mye vitaminer som vitamin A, C, D og E, mange produserer også Vitamin B (Brown et al., 1999). De fleste husdyr er avhengig av tilskudd av flere ulike vitaminer gjennom kraftfôret, i ulike sammensetninger avhengig av dyreslag og stadiet i livssyklusen. Mange mikroalger har også evnen til å akkumulere mineraler. Mikroalger kan brukes som kilde for tilførsel av nødvendige mineraler, som for eksempel I og Se (Gomez-Jacinto et al., 2010; Kouba et al., 2014), men det er også viktig å være oppmerksom på algers evne til akkumulering av tungmetaller (Tuzun et al., 2005). Hvilke mineraler som evt blir akkumulert i algene, kan styres ved næringstilgang i dyrkingsmediet.

Enkelte mikroalger har evnen til å akkumulere store mengder av karbohydrater som lagringsprodukt. Noen mikroalger kan også produsere spesifikke karbohydrater med helsebringende effekter, som feks β -1,3-glucan som virker immunstimulerende (Yaakob et al., 2014).

Ren algebiomasse har høyere innhold av nukleinsyrer enn mange andre matkilder. Mennesker og andre primater har dårlig evne til å bryte ned urea, som blir dannet fra nukleinsyrene, og dersom vi har for høyt inntak av disse vil det gi en toksisk effekt noe som innebærer en viss begrensning i mengde daglig inntak av mikroalger. Gris, kyr og andre dyr har imidlertid god evne til å prosessere nukleinsyrer, som dermed vil fungere som næringskilde uten negative effekter.

3 VALG AV ARTER

Mikroalger er fototrofe organismer som lever i vann, luft, jord eller på snø/is. De fleste mikroalger vokser best i vann, noen lever i saltvann, andre i ferskvann. Enkelte arter kan også vokse i begge miljøene. Mikroalger er i utgangspunktet eukaryote, men i dagligtale refererer ordet mikroalger ofte til både eukaryote mikroalger og cyanobakterier (tidligere kalt blågrønnalger), denne definisjonen er for enkelhets skyld også brukt her. Siden cyanobakterier i mange sammenhenger oppfører seg på samme måte som eukaryote mikroalger, blir enkelte av disse i praksis brukt på samme måte. Selv om det finnes flere hundre tusen arter av mikroalger, er det bare noen få som er i kommersiell produksjon. I mange tilfeller er artene valgt pga egenskaper som høyt næringsinnhold, rask vekst og ukomplisert dyrking ved de spesifikke miljøbetingelsene som er tilstede der dyrkingen skal foregå. Men det finnes også et høyt antall arter som ikke har vært testet ut i storskaladyrking og dermed ikke er kartlagt som mulige kandidater til en kommersiell produksjon. Antall arter av mikroalger som er tillatt brukt i dyrefôr er per i dag også noe begrenset. Nedenfor er en oppsummering av de viktigste mikroalgene som i dag er i kommersiell produksjon:

Chlorella: Grønnalge. De fleste *Chlorella* arter er ferskvannsarter, men det finnes også marine arter. De er kjent for å ha høyt proteininnhold, men har også evnen til å produsere store mengder stivelse, lipider og/eller karotenoider som for eksempel lutein. Ulike arter av *Chlorella* kan produseres under svært ulike betingelser, og enkelte arter er svært robuste. Det finnes termofile *Chlorella* arter som tåler temperaturer opp til 42°C, og psykrofile arter som vokser ved temperaturer ned mot 0°C (Komárek & Nedbalová, 2007). Dyrking av *Chlorella* under mange ulike klimatiske forhold er dermed mulig, men innebærer grundig forarbeid mht. artsutvelgelse. *Chlorella* har blitt dyrket i kultur siden 1975. Tall fra 2004 viser at det på verdensbasis ble produsert ca 2000 tonn *Chlorella*/år, det meste til bruk i helsekostprodukter eller i dyrefôr (Kotrbaček et al., 2015; Pulz & Gross, 2004).

Arthrospira (Spirulina): Dette er en cyanobakterie som har vært kultivert siden 1965 (Pulz & Gross, 2004). Algens korrekte slektsnavn er *Arthrospira*, men den blir i dagligtale fortsatt omtalt som sitt tidligere slektsnavn, *Spirulina*. *Spirulina* kan vokse i ulike miljø, både ferskvann og marint. Kommersielt blir vanligvis marint vann brukt til dyrking, fordi ferskvann er en begrensende ressurs de fleste steder i verden. Dyrking i ferskvann gir i mange tilfeller en raskere vekst av denne algen. *Spirulina* egner seg til dyrking i billige systemer som åpne dammer, fordi den tolererer høyere pH enn de fleste potensielle kontaminanter. Den egner seg imidlertid dårligere til dyrking i kaldt klima enn mange andre alger, da den trenger høy temperatur. Optimumstemperaturen for mange av artene ligger på rundt 35°C, og ved temperaturer under 20°C vil veksten stoppe. *Spirulina* er den algearten som det blir produsert mest av på verdensbasis, produksjon estimert til 5 500-12 000 tonn/år (Belay, 2013; Pulz & Gross, 2004).

Haematococcus: Grønnalge. Lever i ferskvann, og er i stand til å produsere store mengder av karotenoidet astaxanthin, som er et verdifullt fargestoff. *Haematococcus* blir mye brukt i lakseoppdrett og til kosmetikk, helsekost og farmasøytiske produkter. *Haematococcus* vil under optimale vekstbetingelser ha et høyt proteininnhold og samtidig lavt astaxanthininnhold, men ved spesifikke stressbetingelser vil algene bygge opp et høyt astaxanthininnhold. Mikroalger som er utsatt for betingelser som induserer karotenoidproduksjon, vil samtidig vise redusert proteininnhold (Batista et al., 2013; Wang et al., 2014). Kan høstes både i grønn fase (lite astaxanthin, men mye

protein) og i rød fase (mye astaxanthin, men lavere proteininnhold). De fleste *Haematococcus* arter dyrkes ved 23°C-28°C.

Dunaliella: Marin grønnalge. Mange arter av *Dunaliella* krever svært høy saltholdighet for å vokse, noe som er en fordel ved dyrking i åpne systemer med risiko for kontaminering. Under stressbetingelser er *Dunaliella* i stand til å produsere mye av karotenoidet β -caroten, som blant annet blir brukt som fôr til fjørfe i tillegg til helsekost og kosmetikk (Borowitzka, 2013). Kommersiell produksjon av *Dunaliella* har blitt estimert til 1200 tonn/år (Pulz & Gross, 2004). På samme måte som med *Haematococcus*, kan *Dunaliella* høstes enten i grønn fase der proteininnholdet er høyt, eller i gul fase der innholdet av β -karoten og lipid er høyt men med lavere proteininnhold. Optimal dyrkingstemperatur varierer mye mellom artene, fra 21°C-40°C.

Tetraselmis: Marin grønnalge med høyt proteininnhold. *Tetraselmis* blir solgt som fiskefôr pga både høyt proteininnhold og høyt innhold av PUFA, spesielt α -linolensyre og heksadekatetraensyre (Becker, 2013). Protein fra *Tetraselmis* har vist seg å være spesielt egnet som ingrediens i mat pga av høy løselighet (Schwenzfeier et al., 2013; Schwenzfeier et al., 2011). *Tetraselmis* er relativt robust, og optimumstemperatur for dyrking varierer mye mellom artene (Regan, 1988).

Scenedesmus: Slekten *Scenedesmus* inneholder et stort antall arter med stor variasjon mellom artene. De fleste lever i ferskvann, men marine arter forekommer også (Cho et al., 2012; Soeder & Hegewald, 1988). Mange *Scenedesmus* arter har høyt proteininnhold (Becker, 2007), kan produsere mye lutein (Ho et al., 2015), og i tillegg moderate mengder av astaxanthin (Qin et al., 2008). Mange av artene har optimumstemperatur for vekst >30°C (Soeder & Hegewald, 1988), men det finnes også arter som kan dyrkes på lave temperaturer (Andrade et al., 2014).

Nannochloropsis: Marin grønnalge, produserer store mengder PUFA, og har spesielt mye EPA. *Nannochloropsis* kan også ha mye protein, og blir mye brukt som fôr til akvakultur. (Zittelli et al., 2004).

Porphyridium: Marin rødalge som er mye brukt som fôr i akvakultur. Denne algen har høyt innhold av protein, og akkumulerer mye av det røde protein-pigmentkomplekset phycoerythrin. *Porphyridium* akkumulerer også mye PUFA, spesielt EPA, DHA og AA (Safi et al., 2013).

Andre marine mikroalger som dyrkes kommersielt for salg til fôr for akvakultur er: *Phaeodactylum*, *Isochrysis*, *Schizochytrium*. Disse artene produserer mye PUFA, spesielt EPA og DHA. Det finnes også andre arter, som blir produsert i mindre volum og med varierende tilgang (Becker, 2004; Zmora et al., 2013).

4 EFFEKT AV DYRKINGSBETINGELSER

Optimale dyrkingsbetingelser for mikroalger varierer mye mellom arter, som nevnt tidligere.

Produksjon av alger med høyt proteininnhold kan vanligvis kombineres med høy veksthastighet, i motsetning til produksjon av mange verdifulle metabolitter som er avhengig av stressbetingelser, dvs betingelser som begrenser veksten (Batista et al. 2013).

De fleste mikroalger kan vokse ved svært varierende lysintensitet, der veksthastigheten går ned ved lysintensiteter under optimum. For høy lysintensitet kan derimot ha dødelig effekt på algene (Nishiyama et al. 2006). I praktiske prosesser i ulike deler av verden vil noen ganger en naturlig dag/natt syklus gi en god nok produksjon, evt med beskyttelse fra den mest intense lysintensiteten midt på dagen. Andre ganger vil det være nødvendig å supplere det naturlige dagslyset med kunstig lys, enten for å øke lysintensiteten, for å øke daglengden, eller for å produsere kontinuerlig gjennom døgnet.

Mange algearter er i stand til å vokse både autotroft, mixotroft og heterotroft. Tilsetning av en organisk karbonkilde, som også vil fungere som en energikilde, vil i disse tilfellene føre til både raskere vekst og høyere tetthet i kulturen. Ulemper ved denne tilnærmingen er at organiske næringsstoff øker fremvekst av kontaminanter (bakterier/ sopp) (Richmond 2013).

Mikroalger har svært ulike krav til temperatur. Mikroalger har naturlige habitat både i Arktis og Sahara, og optimumstemperaturer varierer mye, både mellom ulike arter, men også mellom ulike stammer/ isolater. Psykrofile arter med lavt temperaturoptimum har vanligvis lavere maksimal veksthastighet enn arter som vokser ved høyere temperaturer. Andre viktige miljøbetingelser som er avgjørende for effektivitet av algeproduksjon, er pH, salinitet og CO₂ tilgang, i tillegg til effektivitet av gassutveksling (Richmond 2013).

Mikroalger benytter stressrespons reaksjoner for å håndtere vekstbetingelser som ikke er optimale, og mange av disse reaksjonene innebærer produksjon av sekundære metabolitter som i noen tilfeller har en høy kommersiell verdi. Det mest kjente eksempelet er karotenoider som astaxanthin eller β -karoten, som kan produseres i store mengder av enkelte alger som en stressrespons dersom algen utsettes for lys i kombinasjon med betingelser som hemmer veksten, for eksempel næringsbegrensning (Choi et al. 2002; Lamers et al. 2008). Ved absorpsjon av mer solenergi enn algene kan forbruke til vekst og andre cellefunksjoner, vil den overskytende energien i fotosystemene skape problemer og forårsake skader i cellene. For å overleve de stressende betingelsene, har algene utviklet stressreaksjoner som innebærer lagring av energi i form av lipider og karbohydrater, men også kanalisering av solenergien bort fra fotosystemene ved produksjon av pigmenter som karotenoider (Vitova et al. 2015; Hu 2013).

Det vil alltid være en sterk interaksjon mellom alle de ulike miljøbetingelsene, som er avgjørende både for algenes veksthastighet og kvalitet av biomassen (Hu 2013). Dette betyr for eksempel at informasjon om optimale temperaturbetingelser som er utarbeidet i en lokasjon med visse lysforhold, vil være mindre relevant kunnskap når dyrkingen skal skje på en annen breddegrad med andre lysforhold. På samme måte vil bestemmelse av optimal lysintensitet være avhengig av temperatur, pH, CO₂ tilgang og andre betingelser. Alle miljøfaktorer må ses på samlet i en optimaliseringsprosess, derfor er det viktig at en effektiv dyrking blir optimalisert for hver enkelt beliggenhet med de tilgjengelige ressurser som foreligger. Dette er et tema som ofte blir ignorert.

Effekt av en interaksjon mellom ulike miljøfaktorer er også et felt som har vært for lite studert, og som krever mer forskning.

5 FOTOBIOREAKTORER

Valg av dyrkingssystem er et viktig ledd i utviklingen av en prosess for algedyrking, og dette er et felt der det har vært mye forskning og utvikling de siste 20 årene. Mye av den kommersielle produksjonen av mikroalger har foregått i åpne dammer eller racewaysystemer, men algedyrking i lukkede fotobioreaktorer har de siste årene blitt mer og mer vanlig. Etter at teknologi for dyrking i lukkede systemer har blitt utviklet og forbedret har det åpnet veien for algedyrking på flere ulike lokasjoner, også på nordligere breddegrader. Det finnes et svært høyt antall med mulige reaktordesign, men mange av variantene egner seg kun til bruk i liten skala på laboratoriet. De viktigste momentene i fotobioreaktorer til algeproduksjon, er gassutveksling for tilførsel av CO₂ og fjerning av oksygen, og effektiv utnyttelse av lys. Andre momenter er omrøring vs mekanisk stress, temperaturkontroll og eventuell mulighet for pH kontroll.

Reaktortyper som er vanlig å bruke i kommersiell algeproduksjon er:

- Rørreaktorer, med horisontale rør i plast eller glass, der rørene enten er stablet i høyden, eller plassert på bakkenivå. I noen varianter foregår gassutvekslingen ved bobling med luft/CO₂ i en separat tank utenfor rørene, i andre skjer gassutvekslingen inne i rørene, ved å beholde en stor headspace over kulturen. I tilfeller der det er et poeng å maksimalt effektivisere bruk av lystilgang og areal, kan produksjonseffektiviteten optimaliseres ved valg av diameter på rør, avstand mellom rørene vertikalt og avstand mellom rørene horisontalt. Siden areal i noen lokasjoner er en begrensende faktor, har dette aspektet av bioreaktoreffektivitet blitt studert grundig.
- Flatpanelreaktorer, der gassutvekslingen og omrøringen skjer ved bobling med luft/CO₂. Disse kan bestå av glass eller plast, der lysveien kan gjøres svært kort, noe som øker effektiviteten i produksjonen. Noen utførelser består av hengende poser i ulike plastmaterialer, og hovedhensikten med denne enkle reaktortypen er at kostnadene er lave. Posene blir i mange tilfeller kastet etter bruk, noe som sparer utgifter med rengjøring. Andre utførelser består av plater av glass eller plast, evt med bafler som øker omrøringen i kulturen.
- Boblekolonner, består av vertikale rør der gassutvekslingen og omrøringen skjer ved bobling med luft/CO₂. Kolonnene kan bestå av glass eller plast. I denne reaktortypen er lysveien ofte lengre, noe som reduserer lysutnyttelsen. En variant av boblekolonner er airlift reaktorer der algene beskyttes fra det mekaniske stresset som påføres når kulturen bobles, noe som har vist seg å øke produktiviteten betraktelig.

Dyrkingssystemer og dyrkingsprinsipper for mikroalger er oppsummert: (Eriksen, 2008; Fernandes et al., 2015; Kunjapur & Eldridge, 2010; Olivieri et al., 2014; Posten, 2009; Richmond, 2004; Tredici, 2004; Wang et al., 2012; Zittelli et al., 2013).

Alle reaktortyper har fordeler og ulemper, og valg av bioreaktor må vurderes ut fra lokalitet, ressursgrunnlag, tilgjengelig infrastruktur, tilgjengelig kompetanse til daglig drift, identifisering av ønsket produkt evt produkter, kvalitet av ønsket produkt, krav til økonomisk effektivitet vs. bærekraft mhp energi og miljø. Hvilken reaktordesign som vil egne seg best til en spesifikk produksjon, vil kreve en grundig utredning av alle faktorene nevnt ovenfor.

6 FORBEHANDLING AV ALGEBIOMASSE TIL FÔRPRODUKSJON

Etter at algebiomassen er høstet, kan det være fordeler med å tørke biomassen. Algebiomasse i form av tørt pulver vil være enklere og billigere å oppbevare, transportere og distribuere som fôr enn våt pasta. Tørkemeter og tørketemperaturer påvirker næringsinnholdet i algebiomasse i ulik grad, og de vanligste tørkemeterene er frysetørking, spraytørking og konveksjonstørking. Innholdet av både protein, vitaminer, pigment, PUFA og karbohydrater vil bli påvirket av ulik tørkemeterdikk (Bennamoun et al. 2015), det gjelder også tørkemeterens effekt på proteinkvaliteten (Becker 2007). Algebiomasse kan også brukes uten tørking, men det vil da være flere begrensinger som nevnt ovenfor. Lagring av våt biomasse vil være avhengig av kjøling, og kan oppbevares i noen uker, men biomassen vil ha redusert næringsinnhold etter en tid (Welladsen et al. 2014).

Ved bruk av algebiomasse som fôr er det en stor fordel, og i mange tilfeller helt nødvendig, å homogenisere biomassen for å åpne cellene (Becker 2007). Algeceller har cellevegg av ulik komposisjon avhengig av art. Noen alger har cellevegg av cellulose (som for eksempel *Chlorella* spp.), eller andre karbohydratforbindelser, andre har kiselskall (som for eksempel *Pheodactylum* spp. og andre diatoméer) eller peptidoglukan (*Spirulina* spp.). Selv om drøvtyggere har et fordøyelsessystem som kan bryte ned cellulose, har det vist seg at en del av de hele algecellene passerer gjennom fordøyelsessystemet uten å brytes ned. Dette reduserer næringsverdien av alger i fôr betraktelig. Homogeniseringsmetoder brukt til knusing av mikroalger, inkluderer ulike mølleteknikker, ultrasonisering, trykkbehandling, enzymatisk degradering av cellevegg, og andre. Som for tørketeknikker, kan homogenisering også påvirke stabiliteten til enkelte næringsstoff (Gunerken et al. 2015).

7 MIKROALGER SOM FÔR TIL STORFE OG GRIS

Mikroalger som fôr har vært mye brukt innen akvakultur (de Pauw & Persoone, 1988; Guedes et al., 2015; Muller-Feuga, 2013), og som naturlig del av den akvatiske næringskjeden har mikroalger fungert som fôr i flere ledd, både til fisk i ulike stadier av livssyklusen, og til byttedyr. Mikroalger som fôr til landlevende dyr er ikke like utbredt, men er betraktet som et lovende område. Mikroalger har vært testet som fôr til fjørfe, mink, sau, storfe og gris med lovende resultater.

Mange ulike arter av mikroalger har vært testet som fôr, med hovedvekt på arter som allerede er i kommersiell produksjon. Algebiomasse har i hovedsak blitt testet i to ulike varianter: Tørket og knust algebiomasse blandet direkte i fôret uten videre bearbeiding, eller restbiomasse etter ekstraksjon av lipider til biodieselproduksjon, akvakultur eller helsekost.

Effekt av mikroalgebiomasse som fôr har vært testet på fordøyelse både *in vivo* og *in vitro*. Andre effekter som har vært undersøkt i *in vivo* testing, er dyrenes aksept av fôret, opptak i kroppen, effekt på vektøkning, effekt på totalvekt, 'body condition', total proteininnhold i slaktet, melkeproduksjon, proteininnhold i melk, og immunstimulerende effekter.

In vivo testing av effekten av alger som fôr til landlevende dyr er tidkrevende og kostbart, men når det gjelder proteinkvalitet finnes det gode *in vitro* metoder som gjør det mulig å teste aspekter av proteinkvaliteten i større skala, billig og effektivt. Generelt er tilgjengelig data for *in vivo* testing av mikroalgebiomasse som fôr til storfe og gris, svært begrenset.

Fordøyelighet *in vitro* har vært undersøkt med bruk av fordøyelsesenzymmer fra storfe på artene *Chlorella* og *Nannochloropsis*, og sammenlignet med soya, i prøver der proteininnholdet var ca likt (Lodge-Ivey et al., 2014). Resultater fra denne undersøkelsen viste at fordøyelsen av proteinene i mikroalgene var sammenlignbar med proteiner fra soya. Et annet eksempel på *in vitro* studie (Tibbetts et al., 2015) testet mange ulike algearter med varierende proteininnhold: *Spirulina*, *Chlorella*, *Phaeodactylum*, *Nannochloropsis*, *Botryococcus*, *Neochloris*, *Porphyridium*, *Acutodesmus* og *Tetraselmis*, med enzymer fra storfe og gris. Resultater fra komplett algebiomasse ble sammenlignet med restbiomasse etter lipidekstraksjon, en prosess som i de fleste tilfeller økte proteinkonsentrasjonen noe (80-90% av total proteinmengde). Andelen av fordøyelige protein som % av total proteinkonsentrasjon, viste også en økning.

In vivo studier på storfe har stort sett fokusert på bruk av *Spirulina* som fôr i melkeproduksjon. Resultater viser at innblanding av *Spirulina* i fôret gir økt melkeproduksjon, økt proteininnhold i melk, fetere dyr og forbedret fertilitet (Holman & Malau-Aduli, 2013; Kulpys et al., 2009). Et *in vivo* studie med en uidentifisert mikroalge viste at fôr med alger ble foretrukket av dyrene, og fordøyeligheten ble forbedret (Van Emon et al., 2015).

Et *in vivo* studie med gris viste at *Spirulina* i fôret i kombinasjon med Cu tilsetning, ga bedre leververdier, lavere kolesterolinnhold og høyere kjøttkvalitet, selv om fordøyelighet, kroppsvekt og proteininnhold i dyrene var uforandret (Saeid et al., 2013). Restbiomasse fra *Desmodesmus* etter lipidekstraksjon som tilsetning i fôret sammen med proteaseenzymer, førte til forbedret vektøkning, forbedret totalvekt og bedre fôropptak hos gris (Ekmay et al., 2014).

Spirulina som fôr til lam har i *in vivo* testing vist forbedret vektøkning, forbedret totalvekt og immunstimulerende effekter (EL-Sabagh et al., 2014; Holman et al., 2014). *Nannochloropsis*, *Phaeodactylum* og *Isochrysis* som fôr til mink viste store forskjeller i fordøyelighet mellom

algeartene. Dette kan skyldes ulike krav til forbehandling av biomassen, grunnet store ulikheter i komposisjon av cellevegger (Skrede et al., 2011). I eldre litteratur rapporteres det om dårligere opptak av protein fra mikroalger sammenlignet med andre matkilder, men det er sannsynlig at dette ble forårsaket av manglende forbehandling med åpning av celleveggen.

8 BÆREKRAFT

Livssyklusanalyser (LCA) der elementer som energibruk, vannforbruk, forbruk av andre ressurser og lønnsomhet er tatt i betraktning, har blitt utført med mikroalger sammenlignet med soya som dyrefôr til husdyr (Taelman et al. 2015). For øyeblikket krever dyrking av algeproteiner i Nederland 100X mer ressurser enn soyadyrking i Brasil, men mye av forskjellen består av fossil energi som går inn i algeproduksjonen, i tillegg til forbruk av vann. I situasjoner der forbruk av ferskvann ikke er noen begrensende faktor f.eks. ved resirkulering av vannet, eller beliggenhet med stor tilgang av rent vann, og i tillegg energien kan komme fra lokale fornybare kilder, kan ressursbruken til produksjon av protein fra mikroalger, bli sammenlignbar med soyaprotein fra Brasil.

9 HVA GJENSTÅR?

Mange av undersøkelsene som har vært gjort til nå, har fokusert på marine algearter, fra eksemplene ovenfor gjelder det *Tetraselmis*, *Nannochloropsis*, *Phaeodactylum*, *Isochrysis* og *Porphyridium*. Noe av grunnen til dette er at dyrking av mikroalger i saltvann er en fordel i deler av verden der ferskvann er en begrensende ressurs. I Norge er mangel på ferskvann ikke en problemstilling av betydning. Av ferskvannsartene nevnt ovenfor er spesielt cyanobakterien *Spirulina* og grønnalgen *Chlorella* mye brukt i dyrefôrstudier. *Spirulina* er en art som egner seg godt til dyrking i varme strøk, men dårligere under norske betingelser pga høye krav til varme. Av ferskvannsarter som allerede er undersøkt, peker *Chlorella* seg ut som en mikroalge man kan tenke seg å dyrke i Norge, men det er fullt mulig at andre potensielle arter som for øyeblikket ikke er undersøkt, kan være like godt egnet. En svært stor feilkilde i undersøkelser som har vært gjort for å sammenligne proteininnhold og annet næringsinnhold i algebiomasse fra ulike arter, er at optimalisering av dyrkingsbetingelser ikke blir tatt hensyn til. Når det gjelder proteiner blir konklusjoner i litteraturen ofte sluttet på svært tynt grunnlag, og det er behov for mer forskning på dette området.

Selv om svært mye blir gjort innen utvikling av dyrkingsteknologi for mikroalgeproduksjon, må det gjøres en evaluering i hvert enkelt tilfelle for å velge løsninger som er optimale. Selv om kommersielle fotobioreaktorer brukes, må disse tilpasses til ressursgrunnlaget som foreligger i hver enkelt beliggenhet, for å få en lønnsom og funksjonell produksjon. Eksempel på ressurser som kan være tilstede på norske gårdsbruk med behov for dyrefôr, er rent vann, lange dager med tilfredsstillende lysintensitet i sesong, og gjødsel som potensielt kan omdannes til CO₂, næringssalt og varme gjennom en biogassprosess. Enkelte beliggenheter kan også ha et potensiale for produksjon av billig strøm, for eksempel fra vannkraft. I ressursgrunnlaget inngår også bøndernes kompetanse og erfaring med biologisk produksjon, som sammen med resten av ressursene, utgjør et verdifullt utgangspunkt.

Forsøk med uttesting av mikroalger i dyrefôr har som nevnt vært begrenset, spesielt har *in vivo* testing på storfe vært gjennomført i svært liten grad. Grunnen til dette er at disse undersøkelsene er svært kostbare. Uttesting på mindre dyr som for eksempel fjørfe, er billigere og kan gjennomføres i større volum, med flere dyr som gir mer solide datasett. Det er viktig å kartlegge hvordan ulike mikroalger påvirker både produksjonen og det ferdige produktet, eksempelvis med hensyn til fôropptak, fôraksept, veksthastighet, størrelse på det voksne dyret, fertilitet, dødelighet, effektivitet av melkeproduksjon, næringsinnhold, utseende, smak og lukt på kjøtt eller melk.

Krav til investeringer og oppbygging av kunnskap om teknologi for dyrking av mikroalger på norske gårdsbruk, krever vilje til innsats politisk både lokalt og sentralt. I tillegg kreves vilje til innovasjon og nytenking fra bønderne selv.

10 KONKLUSJONER

- Redusert avhengighet av import av vegetabiliske proteinkilder som fôr i norsk landbruk må være et mål, og det innebærer at det er et stort behov for økt produksjon av vegetabilisk protein i Norge
- Mikroalger har høyere innhold av protein enn både tradisjonelle og alternative vegetabiliske proteinkilder
- Mikroalger har også høyt innhold av andre næringsstoff som for eksempel vitaminer, mineraler, flerumettede fettsyrer og antioksidanter
- Antall arter av mikroalger som er tillatt brukt i dyrefôr er per idag begrenset, men enkelte godkjente arter har egenskaper som er tilfredsstillende for dyrking i norsk klima
- Forsøk med mikroalger som fôrkilde til storfe, gris og andre husdyr, har gitt gode resultater både mht fôraksept, fôropptak, fordøyelighet, veksthastighet, totalvekt, fertilitet, melkeproduksjon, og proteininnhold i melk
- Ulike fotobioreaktorer med tilhørende dyrkingsteknologi, må tilpasses og utvikles til bruk ved norske gårdsbruk for optimal produksjon og bærekraft mht økonomi, miljø og ressursbruk
- Mikroalger er en kilde til vegetabilisk protein som har stort potensiale som fôrkilde i norsk landbruk
- På grunn av god tilgang til både ferskvann, fjord og kystnære områder, i tillegg til store areal som ikke kan utnyttes til tradisjonelt landbruk, er Sogn og Fjordane et fylke som kan være ideelt for dyrking av mikroalger.

LITTERATURREFERANSER

- Adler, S., Løes, A.-K. 2014. Vet du hva som er i kraftfôret? *Økologisk landbruk*, **2**, 20-23.
- Andrade, L., Gonzalez-Lopez, J., Fenice, M., Martinez-Toledo, M.V., Pesciaroli, C., Maza-Marquez, P., Juarez-Jimenez, B. 2014. Application of Response Surface Methodology (RSM) for Culture Conditions and Biomass Production of Psychrophilic Microalgae Isolated from High Mountains Lake During the ice-free Season. *Int J Env Res*, **8**(3), 799-812.
- Baker, R.T.M., Pfeiffer, A.M., Schöner, F.J., Smith-Lemmon, L. 2002. Pigmenting efficacy of astaxanthin and canthaxanthin in fresh-water reared Atlantic salmon, *Salmo salar*. *Anim Feed Sci Tech*, **99**(1-4), 97-106.
- Batista, A.P., Gouveia, L., Bandarra, N.M., Franco, J.M., Raymundo, A. 2013. Comparison of microalgal biomass profiles as novel functional ingredient for food products. *Algal Res-Biom Biof Bioprod*, **2**(2), 164-173.
- Becker, E.W. 2007. Micro-algae as a source of protein. *Biotechnol Adv*, **25**(2), 207-210.
- Becker, E.W. 2013. Microalgae for Aquaculture: Nutritional Aspects. in: *Handbook of Microalgal Culture - Applied Phycology and Biotechnology*, (Eds.) A. Richmond, Q. Hu, John Wiley & Sons, Ltd, pp. 671-691.
- Becker, W. 2004. Microalgae in human and animal nutrition. in: *Handbook of microalgal culture: Biotechnology and Applied Phycology*, (Ed.) A. Richmond, Blackwell Science Ltd. Oxford, pp. 312-351.
- Belay, A. 2013. Biology and Industrial Production of Arthrospira (Spirulina). in: *Handbook of Microalgal Culture - Applied Phycology and Biotechnology*, (Eds.) A. Richmond, Q. Hu, John Wiley & Sons, Ltd, pp. 339-358.
- Bennamoun, L., Afzal, M.T., Leonard, A. 2015. Drying of alga as a source of bioenergy feedstock and food supplement - A review. *Ren Sust Energy Rev*, **50**, 1203-1212.
- Borowitzka, M.A. 2013. Dunaliella: Biology, Production, and Markets. in: *Handbook of Microalgal Culture - Applied Phycology and Biotechnology*, (Eds.) A. Richmond, Q. Hu, John Wiley & Sons, Ltd, pp. 359-368.
- Brown, M.R. 1991. The amino-acid and sugar composition of 16 species of microalgae used in mariculture. *J Exp Marine Biol Ecol*, **145**(1), 79-99.
- Brown, M.R., Mular, M., Miller, I., Farmer, C., Trenerry, C. 1999. The vitamin content of microalgae used in aquaculture. *J App Phycol*, **11**(3), 247-255.
- Chacon-Lee, T.L., Gonzalez-Marino, G.E. 2010. Microalgae for "Healthy" Foods-Possibilities and Challenges. *Compr Rev Food Sci Food Safety*, **9**(6), 655-675.
- Cho, S.-C., Choi, W.-Y., Oh, S.-H., Lee, C.-G., Seo, Y.-C., Kim, J.-S., Song, C.-H., Kim, G.-V., Lee, S.-Y., Kang, D.-H., Lee, H.-Y. 2012. Enhancement of lipid extraction from marine microalga, *Scenedesmus* associated with high-pressure homogenization process. *J Biomed Biotechnol* **2012**(359432), 1-6.
- Choi, Y.E., Yun, Y.S., Park, J.M. 2002. Evaluation of factors promoting astaxanthin production by a unicellular green alga, *Haematococcus pluvialis*, with fractional factorial design. *Biotechnol Prog*, **18**(6), 1170-1175.
- de Pauw, N., Persoone, G. 1988. Micro-algae for aquaculture. in: *Micro-algal biotechnology*, (Eds.) M.A. Borowitzka, L.J. Borowitzka, Cambridge University Press. Cambridge pp. 197-221.
- Dufossé, L., Galaup, P., Yaron, A., Arad, S.M. 2005. Microorganisms and microalgae as sources of pigments for food use: a scientific oddity or an industrial reality? *Trends Food Sci Technol*, **16**(9), 389-406.
- Ekmay, R., Gatrell, S., Lum, K., Kim, J., Lei, X.G. 2014. Nutritional and Metabolic Impacts of a Defatted Green Marine Microalgal (*Desmodesmus* sp.) Biomass in Diets for Weanling Pigs and Broiler Chickens. *J Agr Food Chem*, **62**(40), 9783-9791.
- EL-Sabagh, M.R., Abd Eldaim, M.A., Mahboub, D.H., Abdel-Daim, M. 2014. Effects of *Spirulina platensis* algae on growth performance, antioxidative status and blood metabolites in fattening lambs. *J Agr Sci*, **6**(3), 92-98.

- Eriksen, N.T. 2008. The technology of microalgal culturing. *Biotechnol Let*, **30**(9), 1525-1536.
- Fernandes, B.D., Mota, A., Teixeira, J.A., Vicente, A.A. 2015. Continuous cultivation of photosynthetic microorganisms: Approaches, applications and future trends. *Biotechnol adv*, **33**(6 Pt 2), 1228-45.
- Fredriksson, S., Elwinger, K., Pickova, J. 2006. Fatty acid and carotenoid composition of egg yolk as an effect of microalgae addition to feed formula for laying hens. *Food Chem*, **99**(3), 530-537.
- Gomez-Jacinto, V., Arias-Borrego, A., Garcia-Barrera, T., Garbayo, I., Vilchez, C., Luis Gomez-Ariza, J. 2010. Iodine speciation in iodine-enriched microalgae *Chlorella vulgaris*. *Pure App Chem*, **82**(2), 473-481.
- Gouveia, L., Batista, A., Sousa, I., Raymundo, A., Bandarra, N. 2008. Microalgae in Novel Food Products. in: *Food Chemistry Research Developments*, (Ed.) K.N. Papadopoulos, Nova Science Publishers, pp. 1-37.
- Guedes, A.C., Sousa-Pinto, I., Malcata, F.X. 2015. Application of Microalgae Protein to Aquafeed - Biotechnology advances. in: *Handbook of marine microalgae*, (Ed.) S.-K. Kim, Elsevier. USA, pp. 99-113.
- Guerin, M., Huntley, M.E., Olaizola, M. 2003. *Haematococcus* astaxanthin: applications for human health and nutrition. *Trends Biotechnol*, **21**(5), 210-216.
- Gunerken, E., D'Hondt, E., Eppink, M.H.M., Garcia-Gonzalez, L., Elst, K., Wijffels, R.H. 2015. Cell disruption for microalgae biorefineries. *Biotechnol Adv*, **33**(2), 243-260.
- Ho, S.-H., Xie, Y., Chan, M.-C., Liu, C.-C., Chen, C.-Y., Lee, D.-J., Huang, C.-C., Chang, J.-S. 2015. Effects of nitrogen source availability and bioreactor operating strategies on lutein production with *Scenedesmus obliquus* FSP-3. *Biores Technol*, **184**, 131-138.
- Holman, B.W.B., Kashani, A., Malau-Aduli, A.E.O. 2014. Effects of *Spirulina* (*Arthrospira platensis*) supplementation level and basal diet on liveweight, body conformation and growth traits in genetically divergent Australian dual-purpose lambs during simulated drought and typical pasture grazing. *Small Ruminant Res* **120**(1), 6-14.
- Holman, B.W.B., Malau-Aduli, A.E.O. 2013. *Spirulina* as a livestock supplement and animal feed. *J Anim Physiol Anim Nutr*, **97**(4), 615-623.
- Hu, Q. 2013. Environmental Effects on Cell Composition. in: *Handbook of Microalgal Culture - Applied Phycology and Biotechnology*, (Eds.) A. Richmond, Q. Hu, John Wiley & Sons, Ltd, pp. 114-122.
- Kent, M., Welladsen, H.M., Mangott, A., Li, Y. 2015. Nutritional Evaluation of Australian Microalgae as Potential Human Health Supplements. *Plos One*, **10**(2).
- Komárek, J., Nedbalová, L. 2007. Green cryosestic algae. in: *Algae and cyanobacteria in extreme environments*, (Ed.) J. Seckbach, Springer. Dordrecht, Netherlands, pp. 323-344.
- Kotrbaček, V., Doubek, J., Doucha, J. 2015. The chlorococcalean alga *Chlorella* in animal nutrition: a review. *J App Phycol*, **27**(6), 2173-2180.
- Kouba, A., Velisek, J., Stara, A., Masojidek, J., Kozak, P. 2014. Supplementation with Sodium Selenite and Selenium-Enriched Microalgae Biomass Show Varying Effects on Blood Enzymes Activities, Antioxidant Response, and Accumulation in Common Barbel (*Barbus barbus*). *Biomed Res Int*, **2014**(408270), 1-8.
- Kulpys, J., Paulauskas, E., Simkus, A., Jeresiunas, A. 2009. The influence of weed *Spirulina platensis* on production and profitability of milking cows. *Veterinarija Ir Zootechnika*, **46**(68), 24-29.
- Kunjapur, A.M., Eldridge, R.B. 2010. Photobioreactor Design for Commercial Biofuel Production from Microalgae. *Ind Eng Chem Res*, **49**(8), 3516-3526.
- Lamers, P.P., Janssen, M., De Vos, R.C.H., Bino, R.J., Wijffels, R.H. 2008. Exploring and exploiting carotenoid accumulation in *Dunaliella salina* for cell-factory applications. *Trends Biotechnol*, **26**(11), 631-638.
- Lindahl, H. 2014. Godt Brasiliansk. En kartlegging av soyaforbruket i norsk landbruk og oppdrettsnæring. Framtiden i våre hender. 4.
- Liu, J., Hu, Q. 2013. Chlorella: Industrial Production of Cell Mass and Chemicals. in: *Handbook of Microalgal Culture - Applied Phycology and Biotechnology*, (Eds.) A. Richmond, Q. Hu, John Wiley & Sons, Ltd, pp. 327-338.

- Lodge-lvey, S.L., Tracey, L.N., Salazar, A. 2014. RUMINANT NUTRITION SYMPOSIUM: The utility of lipid extracted algae as a protein source in forage or starch-based ruminant diets. *J Anim Sci*, **92**(4), 1331-1342.
- Meng, X., Slominski, B.A. 2005. Nutritive values of corn, soybean meal, canola meal, and peas for broiler chickens as affected by a multicarbohydase preparation of cell wall degrading enzymes. *Poultry Sci*, **84**(8), 1242-1251.
- Millward, D.J., Jackson, A.A. 2004. Protein/energy ratios of current diets in developed and developing countries compared with a safe protein/energy ratio: implications for recommended protein and amino acid intakes. *Publ Health Nutr*, **7**(3), 387-405.
- Muller-Feuga, A. 2013. Microalgae for Aquaculture: The Current Global Situation and Future Trends. in: *Handbook of Microalgal Culture - Applied Phycology and Biotechnology*, (Eds.) A. Richmond, Q. Hu, John Wiley & Sons, Ltd, pp. 613-627.
- Nishiyama, Y., Allakhverdiev, S.I., Murata, N. 2006. A new paradigm for the action of reactive oxygen species in the photoinhibition of photosystem II. *Biochim Biophys Acta-Bioenerg*, **1757**(7), 742-749.
- Olivieri, G., Salatino, P., Marzocchella, A. 2014. Advances in photobioreactors for intensive microalgal production: configurations, operating strategies and applications. *J Chem Technol Biotechnol*, **89**(2), 178-195.
- Posten, C. 2009. Design principles of photo-bioreactors for cultivation of microalgae. *Eng Life Sci*, **9**(3), 165-177.
- Pulz, O., Gross, W. 2004. Valuable products from biotechnology of microalgae. *App Microbiol Biotechnol*, **65**(6), 635-648.
- Qin, S., Liu, G.-X., Hu, Z.-Y. 2008. The accumulation and metabolism of astaxanthin in *Scenedesmus obliquus* (chlorophyceae). *Proc Biochem*, **43**(8), 795-802.
- Regan, D.L. 1988. Other micro-algae. in: *Micro-algal biotechnology*, (Eds.) M.A. Borowitzka, L.J. Borowitzka, Cambridge University Press. Cambridge pp. 135-150.
- Richmond, A. 2013. Biological Principles of Mass Cultivation of Photoautotrophic Microalgae. in: *Handbook of Microalgal Culture - Applied Phycology and Biotechnology*, (Eds.) A. Richmond, Q. Hu, John Wiley & Sons, Ltd, pp. 169-204.
- Richmond, A. 2004. Principles for attaining maximal microalgal productivity in photobioreactors: an overview. *Hydrobio*, **512**(1-3), 33-37.
- Saeid, A., Chojnacka, K., Korczyński, M., Korniewicz, D., Dobrzański, Z. 2013. Effect on supplementation of *Spirulina maxima* enriched with Cu on production performance, metabolic and physiological parameters in fattening pigs. *J Appl Phycol*, **25**(5), 1607-17.
- Safi, C., Charton, M., Pignolet, O., Pontalier, P.-Y., Vaca-Garcia, C. 2013. Evaluation of the protein quality of *Porphyridium cruentum*. *J Appl Phycol*, **25**(2), 497-501.
- Samek, D., Misurcova, L., Machu, L., Bunka, F., Fisera, M. 2013. Influencing of amino acid composition of green freshwater algae and cyanobacterium by methods of cultivation. *Turk J Biochem-Turk Biyokimya Dergisi*, **38**(4), 360-368.
- Sánchez-Muros, M.-J., Barroso, F.G., Manzano-Agugliaro, F. 2014. Insect meal as renewable source of food for animal feeding: a review. *J Cleaner Prod*, **65**, 16-27.
- Schwenzfeier, A., Helbig, A., Wierenga, P.A., Gruppen, H. 2013. Emulsion properties of algae soluble protein isolate from *Tetraselmis* sp. *Food Hydrocol*, **30**(1), 258-263.
- Schwenzfeier, A., Wierenga, P.A., Gruppen, H. 2011. Isolation and characterization of soluble protein from the green microalgae *Tetraselmis* sp. *Biores Technol*, **102**(19), 9121-9127.
- Shields, R.J., Lupatsch, I. 2012. Algae for aquaculture and animal feeds. *Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis* **21**(1), 23-37.
- Simopoulos, A.P. 1999. Essential fatty acids in health and chronic disease. *Am J Clinical Nutr* **70**(3 suppl.), 560S-569S.

- Skjanes, K., Rebours, C., Lindblad, P. 2013. Potential for green microalgae to produce hydrogen, pharmaceuticals and other high value products in a combined process. *Crit Rev Biotechnol*, **33**(2), 172-215.
- Skrede, A., Mydland, L.T., Ahlstrom, O., Reitan, K.I., Gislerod, H.R., Overland, M. 2011. Evaluation of microalgae as sources of digestible nutrients for monogastric animals. *J Anim Feed Sci*, **20**(1), 131-142.
- Smil, V. 2002. Nitrogen and food production: Proteins for human diets. *Ambio*, **31**(2), 126-131.
- Soeder, C.J., Hegewald, E. 1988. Scenedesmus. in: *Micro-algal biotechnology*, (Eds.) M.A. Borowitzka, L.J. Borowitzka, Cambridge University Press. Cambridge pp. 59-84.
- Taelman, S.E., De Meester, S., Van Dijk, W., da Silva, V., Dewulf, J. 2015. Environmental sustainability analysis of a protein-rich livestock feed ingredient in The Netherlands: Microalgae production versus soybean import. *Res Conserv Recyc*, **101**, 61-72.
- Tibbetts, S.M., Milley, J.E., Lall, S.P. 2015. Chemical composition and nutritional properties of freshwater and marine microalgal biomass cultured in photobioreactors. *J Appl Phycol*, **27**(3), 1109-1119.
- Tredici, M.R. 2004. Mass Production of Microalgae: Photobioreactors. in: *Handbook of Microalgal Culture: Biotechnology and Applied Phycology*, Blackwell Publishing Ltd, pp. 178-214.
- Tuzun, I., Bayramoglu, G., Yalcin, E., Basaran, G., Celik, G., Arica, M.Y. 2005. Equilibrium and kinetic studies on biosorption of Hg(II), Cd(II) and Pb(II) ions onto microalgae *Chlamydomonas reinhardtii*. *J Env Man*, **77**(2), 85-92.
- Vahmani, P., Fredeen, A.H., Glover, K.E. 2013. Effect of supplementation with fish oil or microalgae on fatty acid composition of milk from cows managed in confinement or pasture systems. *J Dairy Sci*, **96**(10), 6660-6670.
- Van Emon, M.L., Loy, D.D., Hansen, S.L. 2015. Determining the preference, in vitro digestibility, in situ disappearance, and grower period performance of steers fed a novel algae meal derived from heterotrophic microalgae. *J Anim Sci*, **93**(6), 3121-3129.
- Vitova, M., Bisova, K., Kawano, S., Zachleder, V. 2015. Accumulation of energy reserves in algae: From cell cycles to biotechnological applications. *Biotechnol Adv*, **33**(6), 1204-1218.
- Wang, B., Lan, C.Q., Horsman, M. 2012. Closed photobioreactors for production of microalgal biomasses. *Biotechnol Adv*, **30**(4), 904-912.
- Wang, B., Zhang, Z., Hu, Q., Sommerfeld, M., Lu, Y., Han, D. 2014. Cellular capacities for high-light acclimation and changing lipid profiles across life cycle stages of the green alga *Haematococcus pluvialis*. *Plos One*, **9**(9).
- Welladsen, H., Kent, M., Mangott, A., Li, Y. 2014. Shelf-life assessment of microalgae concentrates: Effect of cold preservation on microalgal nutrition profiles. *Aquacult*, **430**, 241-247.
- Woodham, A.A. 1969. The alleviation of the world protein shortage. *Proc Nutr Soc*, **28**(1), 76-81.
- Yaakob, Z., Ali, E., Zainal, A., Mohamad, M., Takriff, M.S. 2014. An overview: biomolecules from microalgae for animal feed and aquaculture. *J Biol Res-Thessaloniki*, **21**.
- Yi, L., Lakemond, C.M.M., Sagis, L.M.C., Eisner-Schadler, V., van Huis, A., van Boekel, M.A.J.S. 2013. Extraction and characterisation of protein fractions from five insect species. *Food Chem*, **141**(4), 3341-3348.
- Zittelli, G.C., Biondi, N., Rodolfi, L., Tredici, M.R. 2013. Photobioreactors for Mass Production of Microalgae. in: *Handbook of Microalgal Culture - Applied Phycology and Biotechnology*, (Eds.) A. Richmond, Q. Hu, John Wiley & Sons, Ltd, pp. 225-266.
- Zittelli, G.C., Rodolfi, L., Tredici, M.R. 2004. Industrial production of microalgal cell-mass and secondary products - Species of high potential: Mass cultivation of *Nannochloropsis* in closed systems. in: *Handbook of Microalgal Culture: Biotechnology and Applied Phycology*, Blackwell Publishing Ltd, pp. 298-303.
- Zmora, O., Grosse, D.J., Zou, N., Samocha, T.M. 2013. Microalga for Aquaculture: Practical Implications. in: *Handbook of Microalgal Culture - Applied Phycology and Biotechnology*, (Eds.) A. Richmond, Q. Hu, John Wiley & Sons, Ltd, pp. 628-652.

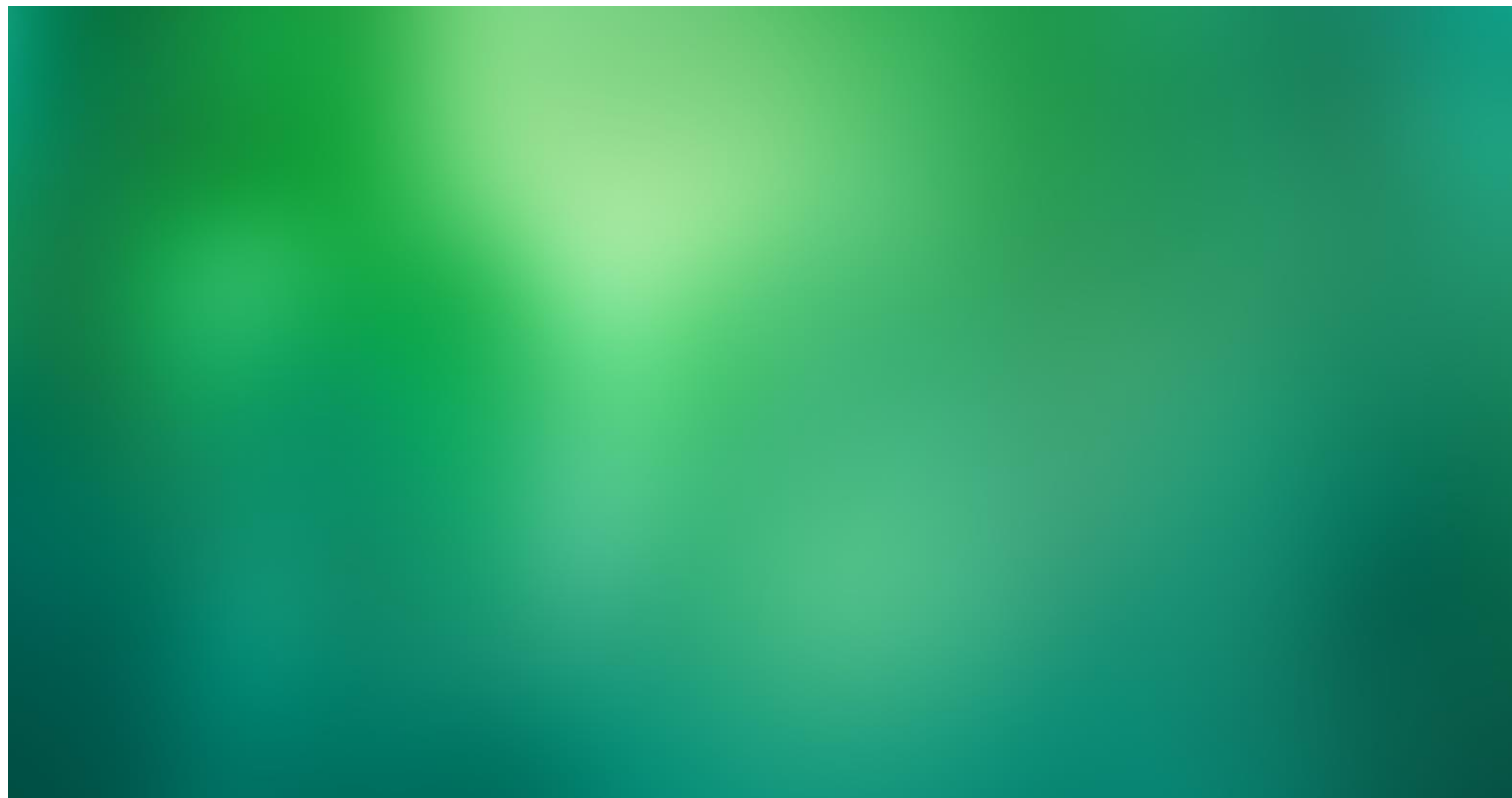
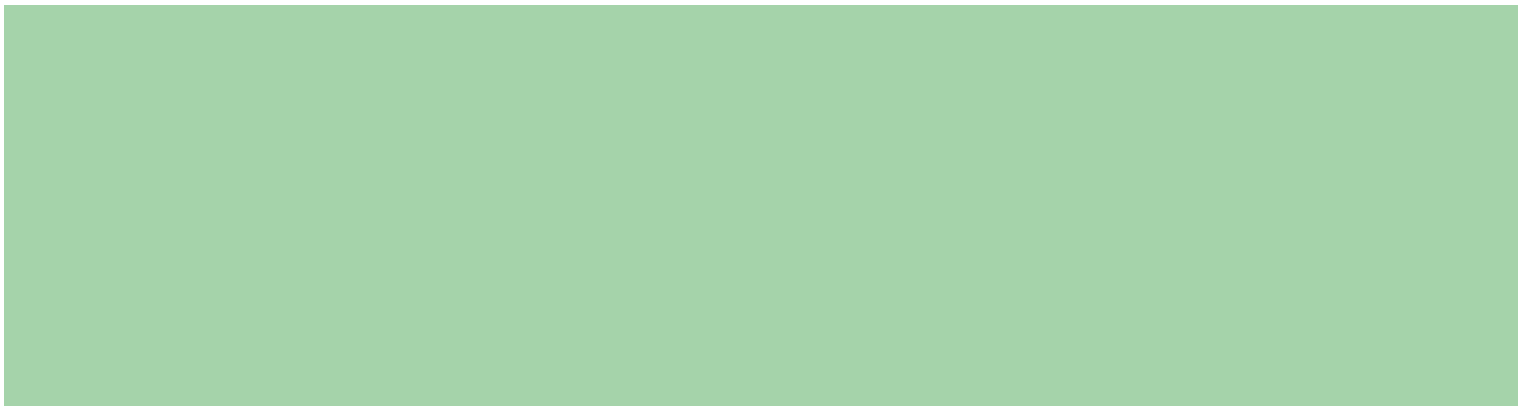
Åby, B.A., Kantanen, J., Aass, L., Meuwissen, T. 2014. Current status of livestock production in the Nordic countries and future challenges with a changing climate and human population growth. *Acta Agr Scand, Section A – Anim Sci*, **64**(2), 73-97.

Norsk institutt for bioøkonomi (NIBIO) ble opprettet 1. juli 2015 som en fusjon av Bioforsk, Norsk institutt for landbruksøkonomisk forskning (NILF) og Norsk institutt for skog og landskap.

Bioøkonomi baserer seg på utnyttelse og forvaltning av biologiske ressurser fra jord og hav, fremfor en fossil økonomi som er basert på kull, olje og gass. NIBIO skal være nasjonalt ledende for utvikling av kunnskap om bioøkonomi.

Gjennom forskning og kunnskapsproduksjon skal instituttet bidra til matsikkerhet, bærekraftig ressursforvaltning, innovasjon og verdiskaping innenfor verdikjedene for mat, skog og andre biobaserte næringer. Instituttet skal levere forskning, forvaltningsstøtte og kunnskap til anvendelse i nasjonal beredskap, forvaltning, næringsliv og samfunnet for øvrig.

NIBIO er eid av Landbruks- og matdepartementet som et forvaltningsorgan med særskilte fullmakter og eget styre. Hovedkontoret er på Ås. Instituttet har flere regionale enheter og et avdelingskontor i Oslo.



Forsidefoto: Luftfoto av Folvengaard, Hjelledalen, med fotobioreaktor for algeproduksjon til dyrefôr. (Folvengaard/ Dag Hjelle)