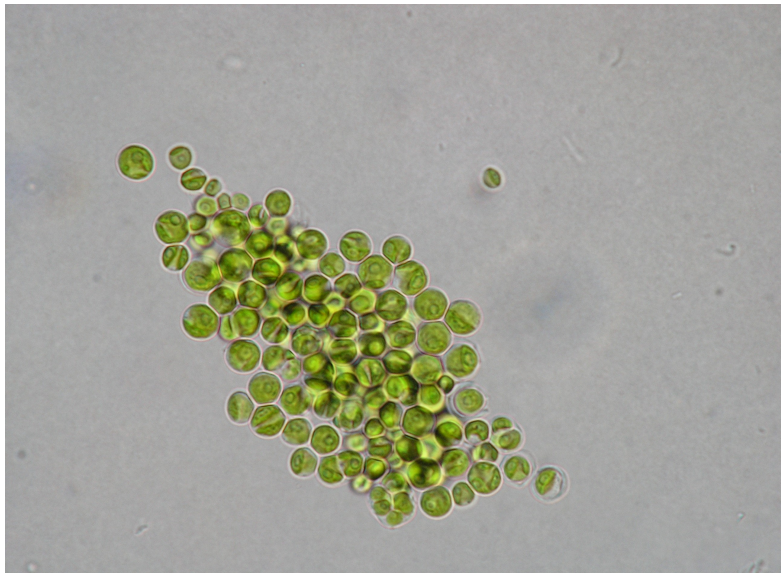


Mikroalger för hållbar energiproduktion

– *Chlorella vulgaris* i en kretsloppsanpassad alg-biogasprocess

Microalgae for sustainable energy production

– *Chlorella vulgaris* in a loop adapted algae-to-biogas process



C-uppsats i Miljövetenskap

Eva Hedenfelt

MV109A, VT10, Urbana studier

Malmö Högskola

den 18 augusti 2010

Handledare: Joe Strahl

Abstract

Odling av mikroalger för framställning av biogas är ett relativt outforskat område. Den forskning som hittills utförts har påvisat lovande resultat tack vare möjligheten att utnyttja resurser som idag går till spillo, eller till och med utgör miljöproblem; mikroalgerna kan rena både näringsrikt vatten (exv. avloppsvatten) och koldioxidutsläpp (rökgaser från industrin) då de tar upp föreningar innehållande kväve, fosfor och kol från dessa källor. Den producerade biogasen kan ersätta fossila bränslen. Dessutom skapas en rötrest som kan återföras till odlingsmarker vilket sluter näringskretsloppet. Mikroalgen *Chlorella vulgaris* undersöks gällande dess egenskaper i alg-biogasprocessen för att aktuella flöden ska kunna sammanlänkas genom industriell symbios. Mikroalger kan skapa unika möjligheter till kretsloppsanpassad energiproduktion bland annat tack vare att vissa av dem har potential att fungera både som växt och som djur. För att energiproduktionen ska kunna kretsloppsanpassas måste de olika systemen i alg-biogasprocessen lokaliseras strategiskt med avseende på dess flöden.

Nyckelord: mikroalger, biogas, mixotrofi, näringsupptag, industriell ekologi, avloppsvatten, koldioxid, rökgaser

Abstract (English)

The area of microalgae cultivation for the production of biogas is quite uninvestigated. Research has shown promising results due to the possibility to make use of resources that are unused or even cause negative environmental impact: the microalgae can purify nutrient rich water (waste water) as well as exhausts rich in carbon dioxide (flue gas) as they take up compounds containing carbon, nitrogen and phosphorus from these sources. The produced biogas can replace fossil fuels. In addition, a digest is produced which can be returned to cropland which closes the nutrient loop. The microalgae *Chlorella vulgaris* is studied regarding its traits in the algae-to-biogas process in order to evaluate if the flows present can be interlinked through industrial symbiosis. Microalgae can create unique possibilities for loop adapted energy production partly thanks to their potential to function both as plant and as animal. For a loop adapted energy production the different systems in the algae-biogas process need to be located strategically with regards to the flows in the process.

Keywords: microalgae, biogas, mixotrophy, nutrient uptake, industrial ecology, waste water, carbon dioxide, flue gas

Innehållsförteckning

1. INLEDNING, SYFTE OCH DISPOSITION.....	1
1.1 INLEDNING	1
1.2 STUDIENS SYFTE.....	2
1.3 DISPOSITION.....	2
2. UTVECKLING AV PROBLEMSTÄLLNINGEN.....	3
2.1 FORSKNINGSPRÅGOR.....	3
2.2 BIOGAS.....	3
2.2.1 Biogasen i en samhällskontext.....	3
2.2.2 Biogasframställning.....	4
2.3 MIKROALGER.....	5
2.3.1 Bakgrund och tidigare forskning.....	6
2.3.2 Odling och skörd av mikroalger.....	7
2.3.3 Generella krav på en mikroalg för en hållbar alg-biogasprocess	8
2.3.4 Näringsstrategier hos mikroalger.....	8
2.3.5 Svårigheter med odling av mikroalger.....	9
2.4 INDUSTRIELL EKOLOGI OCH KRETSLOPPSANPASSNING.....	9
2.4.1 Bakgrund.....	9
2.4.2 Tre grenar inom industriell ekologi.....	10
2.4.3 Vad innebär industriell symbios?.....	11
2.4.4 Den valda analysmodellen.....	13
2.4.5 Kolets, kvävet och fosforns naturliga kretslopp	14
2.5 ETT OMRÅDE UNDER UTVECKLING.....	14
3. METOD, MATERIAL OCH AVGRÄNSNINGAR.....	15
3.1 METOD.....	15
3.2 KÄLLOR OCH KÄLLHANTERING.....	15
3.3 AVGRÄNSNINGAR.....	16
4. ANALYS AV C. VULGARIS I ALG-BIOGASPROCESSEN.....	18
4.1 CHLORELLA VULGARIS.....	18
4.1.1 C. vulgaris ljusbehov och näringsstrategi	18
4.1.2 Koldioxidupptag hos C. vulgaris.....	18
4.1.3 Kväveupptag hos C. vulgaris.....	19
4.1.4 Fosforupptag hos C. vulgaris.....	20
4.2 RÖTNING AV ALGBIOMASSA AV C. VULGARIS.....	20
4.2.1 C. vulgaris egenskaper vid rötning till biogas	21
4.2.2 Näringsinnehåll i algbiomassa från C. vulgaris.....	22
4.2.3 Rötresten som biogödsel?	23
5. KRETSLOPPSANPASSNING AV ALG-BIOGASPROCESSEN	25
5.1 INDUSTRIELL SYMBIOS I EN KRETSLOPPSANPASSAD ALG-BIOGASPROCESS.....	25
5.1.1 Analysmodellen applicerad på alg-biogasprocessen.....	27
5.1.2 Symbios i den kretsloppsanpassade alg-biogasprocessen.....	29
5.2 KOLETS, KVÄVETS OCH FOSFORNS KRETSLOPP I ALG-BIOGASPROCESSEN.....	31
5.2.1 Kolets kretslopp i alg-biogasprocessen.....	31
5.2.2 Kvävet och fosforns kretslopp i alg-biogasprocessen.....	32
5.3 INDUSTRIERNA I DEN KRETSLOPPSANPASSADE ALG-BIOGASPROCESSEN.....	33
5.3.1 Algodlingen – tillförsel av avloppsvatten och rökgaser.....	33
5.3.2 Biogasanläggningen.....	35
5.3.3 Uppgraderingsanläggningen.....	35
5.3.4 Samhället.....	35
5.3.5 Reningsverket.....	35
5.3.6 Energiflöden.....	36
6. SAMMANFATTANDE REFLEKTIONER OCH SLUTSATSER.....	37
6.1 DISKUSSION KRING FORSKNINGSPRÅGORNA.....	37
6.1.1 Hur ser C. vulgaris upptag av näringsämnen ut?.....	37
6.1.2 Är C. vulgaris lämplig som råvara för biogasproduktion?.....	38
6.1.3 Kan alg-biogasprocessen bli ekologiskt hållbar genom kretsloppsanpassning?.....	38

6.2 VIKTEN AV STRATEGISK LOKALISERING.....	40
6.3 SLUTSATSER.....	40
6.4 VIDARE FORSKNING OCH UTVECKLING.....	41
REFERENSER.....	42
BILAGA 1.....	48
BILAGA 2.....	49

Förord

Under den intensiva tid som detta arbete fortskridit finns det vissa i min omgivning som förtjänar särskilt omnämnande. Ett tack riktas till BioMil Ab, som upplåtit en kontorsplats där jag haft möjlighet att arbeta i närvaro av personer som gärna delat med sig av sina goda kunskaper inom biogasområdet. Vidare vill jag tacka Tony Fagerberg på LTH som generöst bidragit med sin knappa tid och diskuterat mina frågor med en entusiasm utan dess like!

Ett stort tack till min mor, Elisabeth Hedenfelt, som gjort ett enastående arbete med att redigera de språkliga märkligheter som jag lyckats knåpa ihop under arbetets gång. Och till Jolsson: chokladen kom som ett brev på posten – vilken god omtanke!

Slutligen, världens största tack till min fina familj; Jakob, Max och Muskot! Ni har visat oändlig förståelse för min mikroalg-mani och sett till så att livet har rullat vidare även utan mina vardagsinsatser.

– Ett stort tack till er alla!

Begreppslista

alg-biogasprocess	de industrier som ingår i processen från mikroalger till biobränsle: algodling, biogasanläggning och uppgradering. Den kretsloppsanpassade alg-biogasprocessen omfattar dessutom reningsverk, kraftvärmeverk och samhälle.
autotrofi	en organisms förmåga att av helt oorganiskt material bilda alla för livet nödvändiga organiska ämnen.
biomassa	inom energitekniken material med biologiskt ursprung som utnyttjas för produktion av biobränslen
fotoautotrofi	en organisms förmåga att utnyttja ljus för sin energiförsörjning och koldioxid som kolkälla vid uppbyggandet av cellmaterial
fotobioreaktor	odlingssystem där mikroalger reproducerar sig med möjlighet till ljusinsläpp
heterotrofi	en organisms förmåga att syntetisera cellmaterial med organiska föreningar som kolkälla
industriell ekologi	industriell produktion som härmar relationer i naturliga ekosystem
industriell symbios	industrier länkas samman genom sina resursflöden, härmar naturlig symbios
mixotrofi	en organisms förmåga att tillväxa både genom fotoautotrofi och heterotrofi
MWh	megawattimme, används vid mätning av elektrisk energi, en miljon wattimmar där wattimme definieras som en effekt på en watt under en timme
NO _x	kväveoxider, kvävet's föreningar med syre. Några är miljömässigt betydelsefulla, som till exempel dikväveoxid som är en potent växthusgas
rötkammare	sluten tank för rötning av organiskt material där mikroorganismer bildar biogas då de bryter ner det organiska materialet (substratet)
SO _x	svaveloxider, till exempel svaveloxid, en giftig gas som uppstår vid förbränning av svavelväte och som orsakar luftföroreningar
uppgradering	en process där biogas delas upp i koldioxid och metangas så att metangasen kan användas som fordonsgas

1. Inledning, syfte och disposition

1.1 Inledning

Svensk miljölagstiftning säger att ”Alla som bedriver en verksamhet eller vidtar en åtgärd skall hushålla med råvaror och energi samt utnyttja möjligheterna till återanvändning och återvinning. I första hand ska förnybara energikällor användas” (Miljöbalken 1998:808, 2 kap 4§ MB). Denna paragraf kallas också *kretsloppsprincipen* och innebär att material och energi ska återvinnas eller återanvändas i den mån det är möjligt – åtgärden ska *kretsloppsanpassas*. När en åtgärd granskas ur ett kretsloppsperspektiv betyder det således att den bedöms ur ett perspektiv där fokus ligger på kretsloppet. Kretsloppsanpassning är en del av den ekologiska hållbarheten, som innebär att allt levande och alla ekosystem, liksom biologisk mångfald och andra naturvärden, ska skyddas (Björndahl et al., 2005).

Det finns idag ett intresse av att minska de utsläpp som uppstår vid förbränning av fossila bränslen eftersom förbränningen tillför koldioxid i atmosfären som skyndar på den globala uppvärmningen (Houghton, 2009). Ett sätt att minska denna tillförsel är att använda alternativa drivmedel, till exempel biogas (som är ett biobränsle). Biogas kan under framställningen ha betydligt lägre emissioner av växthusgaser än fossila bränslen (Börjesson et al., 2010; Börjesson et al., 2003). Förbränning av biogas leder förvisso till koldioxidutsläpp precis som förbränning av fossila bränslen gör, men med skillnaden att koldioxiden från biogas är del av ett mer kortsiktigt kolkretslopp och därför inte höjer koldioxidhalten i atmosfären. Kålet i fossila bränslen ingår i ett långsiktigt kretslopp och när de förbränns tillförs kol i det kortsiktiga kretsloppet vilket resulterar i ökade halter av atmosfärisk koldioxid.

Om efterfrågan på biogas ökar i framtiden finns det en risk att de råvaror som vanligen används vid produktion av biogas inte räcker till. Därför undersöks alternativa råvaror, till exempel några av världens minsta livsformer – mikroalger. Tack vare deras höga tillväxttakt kan de omvandla förhållandevis stora mängder solenergi till energi som blir tillgänglig för människan – till exempel genom biogasproduktion. Mikroalger kan skördas från naturliga bestånd i sjöar och hav eller odlas med syfte att utgöra en energikälla för bränsleproduktion (Converti et al., 2009; De Schampelaire & Verstraete, 2009; Doucha et al., 2005; Gouleke & Oswald, 1959; Liang et al., 2009). Denna studie är ett första försök att utreda om mikroalgen *Chlorella vulgaris* lämpar sig som råvara för framställning av biogas och hur den produktionsprocessen kan kretsloppsanpassas.

1.2 Studiens syfte

Syftet med denna studie är att ta reda på om det är möjligt att framställa ett miljömässigt hållbart biobränsle genom att dels studera hur den gröna mikroalgen *C. vulgaris* fungerar i processen från alg till biogas och dels titta på hur den processen kan kretsloppsanpassas. Kunskapen om mikroalgens näringsupptag bidrar till att utreda huruvida det är möjligt att producera biogas med en så liten miljöpåverkan som möjligt och hur detta i så fall kan gå till. Studien bygger på tidigare forskning genom studier av aktuell litteratur samt på kommunikation med personer som är involverade i odling av mikroalger.

1.3 Disposition

Detta arbete är uppdelat i två huvudsakliga delar och sex kapitel. Den första delen utgörs av kapitel 4 som behandlar mikroalgen *C. vulgaris* näringsupptag och egenskaper som råvara för biogasframställning. Den andra delen är kapitel 5 som beskriver alg-biogasprocessen ur ett kretsloppsperspektiv genom industriell symbios.

Kapitel 1 inleder studien och presenterar dess syfte. I kapitel 2 utvecklas problemställningen och översiktliga beskrivningar ges av biogas, mikroalger och industriell ekologi. Forskningsfrågorna redovisas, relevant teori presenteras och aktuella begrepp beskrivs. Kapitel 3 redogör för hur studien utförts och vilken typ av material den baserats på. Även källhantering och avgränsningar tas upp. I kapitel 4 ges en beskrivning av den aktuella algens egenskaper i fråga om näringsupptag och dess funktion i alg-biogasprocessen. I kapitel 5 redovisas de kretslopp processen är del av och alg-biogasprocessen beskrivs ur ett industriekologiskt perspektiv. I kapitel 6 diskuteras de redovisade resultaten och slutsatser dras utifrån dessa. Slutligen lämnas förslag på ämnen inom området som är intressanta att studera vidare.

2. Utveckling av problemställningen

Denna studie kopplar samman de sinsemellan mycket olika områdena *biogas*, *mikroalger* och *industriell ekologi*. Förhoppningen är att skapa en ingång till en mer miljövänlig energiproduktion som kan möta kraven på miljömässig hållbarhet och på en eventuell framtida ökad efterfrågan på sådan energi. Efter att forskningsfrågorna presenterats nedan beskrivs de tre områdena översiktligt.

2.1 Forskningsfrågor

För att utreda om det är möjligt att på ett miljömässigt hållbart sätt framställa biobränsle med hjälp av mikroalgen *C. vulgaris* studeras följande frågor:

1. Hur ser *C. vulgaris* upptag av näringsämnen ut?
2. Är *C. vulgaris* lämplig som råvara för biogasproduktion?
3. Kan alg-biogasprocessen bli ekologiskt hållbar genom kretsloppsanpassning?

Svaret på den första forskningsfrågan utgör grunden för det fortsatta resonemanget kring näringsflöden som tas upp i den tredje frågeställningen. Forskningsfråga två visar om det är möjligt att skapa den hållbara energiproduktion som eftersträvas i den tredje forskningsfrågan.

Frågeställningarna bidrar till att bygga upp en schematisk modell för hur en algodling kan placeras med avseende på närhet till potentiella näringskällor och näringsrecipienter genom kretsloppsanpassning. Modellen bör kunna användas som informationsmaterial i samband med lokaliseringsbeslut för biogasproduktion baserad på ekologiskt hållbart odlade mikroalger.

2.2 Biogas

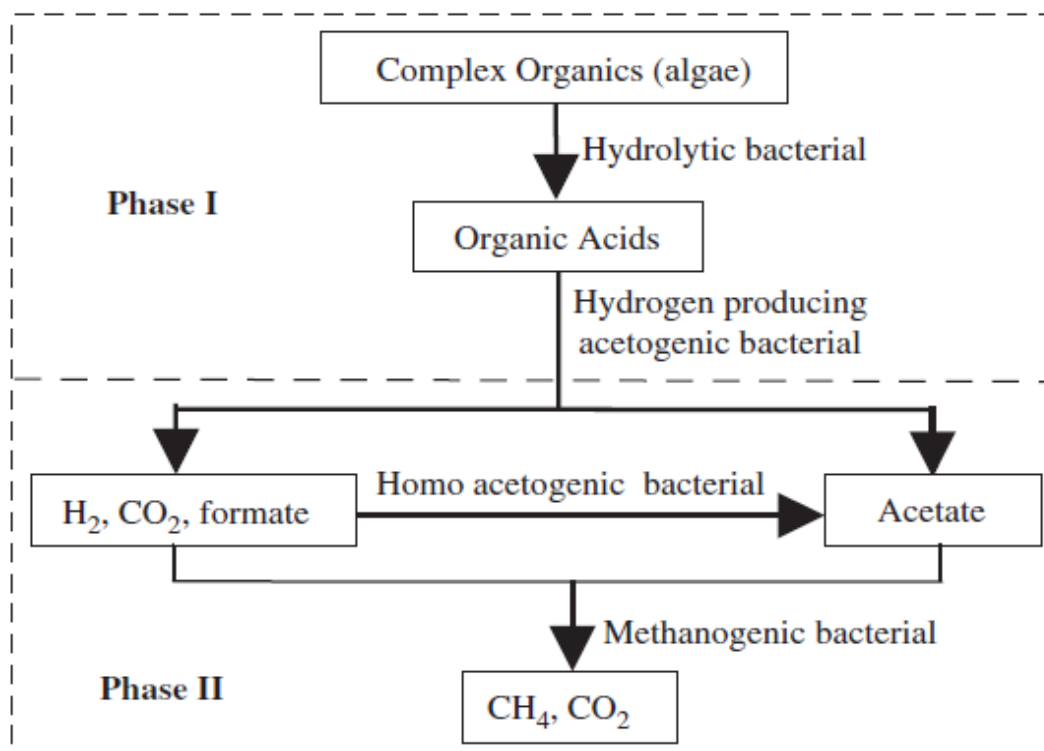
2.2.1 Biogasen i en samhällskontext

För att miljöproblem som kan relateras till förbrukningen av fossila bränslen ska kunna förhindras måste det finnas ekonomiskt realistiska bränslealternativ att tillgå som dessutom är förnybara, alltså producerade av återbildande, biologiskt material. Ett sådant alternativ är biogas. Inför år 2020 ska Sverige enligt EU:s hållbarhetsdirektiv (vilket införlivas i svensk lagstiftning i slutet av 2010) ha ökat andelen förnybara drivmedel inom transportsektorn till 10 procent (Paulsson, 2009). Det finns även nationella mål som ska minska användningen av fossila drivmedel, bland annat miljömålen *begränsad klimatpåverkan* och *god bebyggd miljö*. Användningen av ett

förnybart drivmedel som biogas kan bidra till att de uppsatta målen nås, särskilt om den produceras på ett så ekologiskt hållbart sätt som möjligt. I regeringens nyligen presenterade vårbudget (Prop. 2009/10:100) föreslås dessutom att skatten på biogas mellan producent och konsument ska slopas från och med 2011, detta med förhoppning om ökade satsningar på biogas. Det är positivt inte bara ur miljösynpunkt utan även ur beroendeperspektiv att vara självförsörjande på drivmedel, vilket denna typ av energiframställning kan bidra till. Det finns flera anledningar till varför biogas kan bli ett bränsle att räkna med i framtiden och därför är det viktigt att redan idag undersöka potentiella energikällor som behövs för att en ökad efterfrågan ska kunna tillgodoses.

2.2.2 Biogasframställning

Biogas framställs genom att mikroorganismer utför anaerob (syrefri) nedbrytning av organiskt material (kolhydrater, fetter och proteiner sönderdelas) i en rötkammare varpå en gas frigörs bestående av främst metangas och koldioxid (Ek, 2007), i de ungefärliga proportionerna 70 respektive 30 procent (Bioenergiportalen, 2010a). Processen visas i Figur 1 nedan.



Figur 1. Biogasprocessen (Vergara-Fernández, 2008, s. 339)

För att biogasen ska kunna användas som drivmedel behöver den genomgå en uppgradering vilket innebär att bland annat koldioxid (CO₂) och metangas (CH₄) åtskiljs. Metangasen kan sedan användas som drivmedel under benämningen fordonsgas (vilket också är benämningen för fossil

naturgas) (Bioenergiportalen, 2010a). En energimässig nackdel med att använda biogasen som drivmedel är att den värme som avges vid förbränning inte tas tillvara. Om kraftvärme istället produceras av biogasen kan energiinnehållet i bränslet utnyttjas maximalt, då en tredjedel blir el och resten blir till användbar värme (Lantz, 2004). Biogas är ett miljömässigt bra alternativt bränsle eftersom det i de allra flesta fall minskar utsläppen av både växthusgaser och partiklar samt övergödande och försurande ämnen jämfört med fossila bränslen (Börjesson & Berglund, 2003; Lantz et al., 2009).

Biogas är ett förnybart bränsle som traditionellt produceras av organiska råvaror som matavfall, gödsel, lantbruksgrödor (Baky et al., 2006) eller slam från reningsverk (Bioenergiportalen, 2010a). Ur hållbarhetsperspektiv är det fördelaktigt att biogas framställs av råvaror som inte utnyttjas på andra, effektivare sätt. Matavfall är ett sådant exempel. När lantbruksgrödor odlas för energiproduktion istället för livsmedelsproduktion skapas konkurrens och detta utgör ett stort hinder för att biogasen ska kunna ta större plats på energimarknaden (United States Joint Forces Command, 2010). Ett annat problem som kan uppstå är om den biologiska mångfalden påverkas negativt vid odling av energigrödor (SOU 2007:36). För att undvika konkurrens mellan olika sätt att utnyttja mark behöver produktionen av biobränsle separeras från livsmedelsproduktionen, särskilt om efterfrågan på biogas ökar. Genom att ta fram nya råvaror för biogasframställning kan behovet av ett miljömässigt hållbart bränsle tillgodoses utan konkurrens med livsmedelsproduktionen och utan negativ inverkan på den biologiska mångfalden.

2.3 Mikroalger

I denna studie kommer mikroalgen *Chlorella vulgaris* att studeras. Anledningen till att just *C. vulgaris* valts för närmare undersökning är att den är väl dokumenterad i litteraturen och är konkurrenskraftig och robust (T. Fagerberg, personlig kommunikation, april 2010). Dessutom har andra arter av *Chlorella* påvisat goda resultat vid försöksodling i svenskt klimat (Avfall Sverige, 2009b). *C. vulgaris* är en grön mikroalg som det utförts mycket forskning på tack vare dess goda egenskaper för vattenrening och förmåga att stå emot konkurrens och förändringar i livsmiljön (Agrawal, 2007; Chinnasamy et al., 2009; Converti et al., 2009; Gouveia & Oliveira, 2009; Jeanfils et al., 1993; Megharaj et al., 1992; Rachlin & Grosso, 1991). Olika arter av *Chlorella* odlas främst i Taiwan, Tyskland och Japan och produktionen uppgår till 2000 ton per år (Brennan & Owende, 2010). Algerna används då främst som kosttillskott, kosmetika och vid vattenbruk. Mikroalger kan också användas för energiproduktion i form av etanol, biodiesel eller biogas (ibid.). Tack vare deras förmåga att utnyttja solenergin mycket effektivt har de hög tillväxttakt – jämfört med landväxande

energigrödor har vissa mikroalger upp till fyra gånger högre produktion av biomassa (Brune, 2009) och under goda förhållanden kan de mer än dubblera sitt antal under ett dygn (Fagerberg, 2009).

2.3.1 Bakgrund och tidigare forskning

Idén att använda alger till biogasproduktion lades fram på femtiotalet av bland andra Golueke och Oswald (1959; 1962; Golueke et al., 1957) i samband med vattenrening, och under sjuttioalets energikris blommade idén upp igen. Dock skiftades fokus bort från biogasproduktionen då det upptäcktes att vissa mikroalger producerar stora mängder olja vilken kan användas för biodieselproduktion (Sheenan et al., 1998).

Intresset för att använda mikroalger för biogasproduktion har åter vaknat tack vare deras förmåga att omvandla biologiskt avfall till förnybar energi (Sialve et al., 2009). I tidsskriften Ny Teknik beskrivs till exempel hur mikroalger kan utgöra en helt ny industri där man inte längre talar om utsläpp, utan där koldioxid och ljus istället skapar energi (Feuk, maj 2007). Det finns dock begränsningar för att producera bränsle av mikroalger: till exempel är teknologin generellt outvecklad och kostnaderna för odlingsprocessen är höga (Avfall Sverige, 2009b). Eftersom slutna, högproducerande fotobioreaktorer fortfarande är relativt ovanliga saknas det också erfarenhet av att driva dem (Berg-Nielsen, 2006), vilket innebär att mycket av den utförda forskningen ännu inte prövats i praktiken.

Under 2004 till 2006 utfördes ett projekt där nordiska länder samarbetade kring odling av mikroalger för produktion av foder och kosttillskott, och i ett andra steg energi. Där placerades fotobioreaktorerna (konstruktioner för mikroalgodling) i växthus (Berg-Nielsen, 2006). I Figur 2 syns de transparenta, vattenfyllda tuber där mikroalgerna växer.



Figur 2. Slutna, tubulära fotobioreaktorer i växthus (Berg-Nielsen, 2006)

Det finns några projekt gällande odling av mikroalger som genomförs/är pågående i Sverige, bland annat från Avfall Sverige, Sveriges Tekniska Forskningsinstitut (SP) och Lunds Universitet (LU). De två förstnämnda behandlar odling av mikroalger men av olika anledningar: Avfall Sverige undersöker hur en algodling kan användas för att rena avloppsvatten och ta upp koldioxid (Avfall

Sverige, 2009b). SP tittar på hur algodling – även av *C. vulgaris* som är aktuell i denna studie – med utnyttjande av hög koldioxidhalt respektive med rökgaser fungerar i svenska ljusförhållanden (S. Ekendahl, personlig kommunikation, mars 2010). Projektet är finansierat av Värmeforsk och pågår i 1,5 år. På LU (Limnologi och Marin ekologi/Biologiska Institutionen) görs under sommaren 2010 en utvärdering av vilka mikroalger som passar bra att odla i svenskt klimat (T. Fagerberg, personlig kommunikation, april 2010), vilket är en viktig utgångspunkt om odlingen av mikroalger ska kunna ske så effektivt som möjligt.

2.3.2 Odling och skörd av mikroalger

Mikroalger som odlas intensivt kan växa i slutna fotobioreaktorer bestående av transparenta, vattenfyllda rör (se Figur 2). Material och utformning kan skilja sig åt, men enligt T. Fagerberg (personlig kommunikation, april 2010) bör en fotobioreaktor vara utformad så att så mycket ljus som möjligt når algerna genom att ytan per volym är stor. Detta medför även högre kostnader för material och eventuellt avgifter för att större yta tas i anspråk. Fotobioreaktorerna kan också placeras i växthus vilket minskar uppvärmningsbehovet och samtidigt tillåter stort ljusinflöde (Berg-Nilsen, 2006). De kan placeras vertikalt och kompakt (Satyanarayana et al., 2010) vilket innebär att både yttertak och ytterväggar på byggnader skulle kunna utnyttjas (De Schamphelaire & Verstraete, 2009). Fotobioreaktorn behöver någon form av värmekälla – ett hållbart sätt är att utnyttja varmt kylvatten från en industri, eller att använda biogas för kraftvärmeproduktion och värma odlingen med restvärmen. För sammanställningar av olika typer av fotobioreaktorer rekommenderas Fredin (2009), Mata et al. (2010) eller Brennan & Owende (2010).

Innan mikroalgerna kan rötas till biogas måste de skördas. Skörden är normalt (dvs. vid algodling för produktion av biodiesel) den mest kostsamma faktorn i algproduktionen (Brune, 2009; Mata et al., 2010; Megharaj et al., 1992; de la Noue & de Pauw, 1988) och utgör 20-30 procent av den totala kostnaden för att producera algbiomassa då det ännu inte utvecklats någon riktigt kostnadseffektiv skördemetod (Mata et al., 2010). Vid biogasframställning kan den kostsamma skördeprocessen ersättas av en kort tids sedimentering och koncentrerings (Sialve et al., 2009) vilket är en betydligt mindre krävande process. Ju högre densitet algerna har desto bättre ur skördesynpunkt eftersom mindre mängd vatten behöver extraheras. De Schamphelaire & Verstraete (2009) har visat att den totala mängden biomassa ökar när skörden utförs mer frekvent och slutsatsen av detta är att produktiviteten i odlingen begränsas av en maximal biomassakoncentration. En del av mikroalgerna finns kvar i vattnet efter skörden och kan då återföras till algodlingen där de får fortsätta sin tillväxt (Lardon et al., 2009; Mata et al., 2010). En annan skördemetod är att odla mikroalger som inte lever fritt i vattnet utan växer på en yta av till

exempel gel, vilket resulterar i att skördeprocessen blir mindre komplicerad (Megharaj et al., 1992; Moreno-Garrido, 2008). För mer information om skördetekniker rekommenderas Fredin (2009), Mata et al. (2010) eller Satyanarayana et al. (2010).

2.3.3 Generella krav på en mikroalg för en hållbar alg-biogasprocess

Alger kan vara större växter (makroalger) som exempelvis tång, eller mikroskopiska organismer (mikroalger) i form av diatoméer, dinoflagellater eller grönalger (Starr, 2005). Mikroalger har enligt flera studier visat sig vara en effektiv metankälla (De Schamphelaire & Verstraete, 2009; Sheenan et al., 1998; Sialve et al., 2009). Om en för ändamålet välanpassad mikroalg kan identifieras ökar möjligheterna att uppnå eko-effektivitet genom effektivt utnyttjande av tillförda resursflöden. Teoretiskt sett bör detta också leda till en hög biogasproduktion även om det finns många andra faktorer som också påverkar resultatet. Den alg som passar för biogasproduktion såväl som vatten- och luftrening bör ha hög tillväxt även i lite tuffare förhållanden (T. Fagerberg, personlig kommunikation, april 2010):

- om odlingen tillförs näring genom avloppsvatten kan näringshalten variera, varför algen särskilt måste tåla höga halter av näringsämnen
- beroende på hur odlingssystemet ser ut bör algens tillväxt inte försämrats av kraftig omrörning eller vattengenomströmning
- att odla en alg med lägre krav på ljusstillgång är positivt ur både tillväxt- och energisynpunkt
- beroende på hur uppvärmning av odlingen sker kan algen behöva vara okänslig mot fluktuerande temperaturer
- algen bör vara konkurrenskraftig om det föreligger risk för kontaminering, vilket kan hända vid tillförsel av avloppsvatten

2.3.4 Näringsstrategier hos mikroalger

Organismer kan kategoriseras olika beroende på från vilka källor de tar upp energi och kol. De flesta mikroalger är liksom gröna växter fototrofa (energikällan är ljus) och autotrofa (kolkällan är koldioxid) (Raven et al., 1999), alltså fotoautotrofa, då de bygger upp cellmaterial genom fotosyntes. I vissa fall kan mikroalger vara både fotoautotrofa och heterotrofa. De utnyttjar då både koldioxid och kol som är bundet i organiska föreningar, en näringsstrategi kallad mixotrofi. Denna näringsstrategi kan innebära en stor fördel om tillgången på ljus eller näring är begränsad (Burrell et al., 1984a; Burrell et al., 1984b; Burrell et al., 1985; Carvalho, 2007; Liang et al., 2009).

2.3.5 Svårigheter med odling av mikroalger

Utöver de nämnda svårigheterna med att skörda algerna, den outvecklade teknologin och de höga investeringskostnaderna finns det forskningsresultat som tyder på andra, mer miljörelaterade problem som påvisats i mikroalgodlingar i bland annat USA. Enligt van Beilen (2010) har bevattnade, tropiska grödor högre produktivitet än storskaliga mikroalgodlingar. Han menar att det är för dyrt att odla mikroalger enbart för biobränsleproduktion och att den begränsade datamängd som finns pekar åt en dålig energibalans, alltså att det kan åtgå nästan lika mycket energi under produktionen som sedan kan produceras med hjälp av mikroalgerna. Algodlingar kan också ha en påtaglig negativ miljöpåverkan på grund av hög energiåtgång, utsläpp av växthusgaser och hög vattenförbrukning – särskilt behovet av koldioxid och konstgödning (vilka behövs för algernas tillväxt) orsakar miljöproblem (Clarens et al., 2010). Nämnda problem är realistiska, och för att mikroalger ska kunna bli en konkurrenskraftig råvara för biogasframställning behöver de lösas – detta skulle delvis kunna ske genom att processen kretsloppsanpassas.

2.4 Industriell ekologi och kretsloppsanpassning

2.4.1 Bakgrund

Materialanvändningen i det moderna samhället har till stor del varit linjär (Harper & Graedel, 2004) och representerat en ”slit och släng-mentalitet” som lett till ett ohållbart utnyttjande av jordens resurser. I slutet av åttiotalet publicerades *Strategies for manufacturing*, en banbrytande artikel av Robert Frosch and Nicholas Gallopoulos (1989), som lade grunden på vilken idéer inom industriell ekologi byggts vidare. Frosch och Gallopoulos menade att industriella flöden av material och energi skulle kunna liknas vid de flöden som finns i de naturliga ekosystemen, och att produkter måste utformas på ett sätt som gör dem enkla att återvinna (1989).

Termen industriell ekologi definieras av Smith (1998, s. 13) som ”en vetenskapsgren som förespråkar slutna flöden [...] där resurser används eller återanvänds i effektiva kretslopp”. Ekologi definieras som läran om relationerna mellan de levande och icke-levande komponenterna i ett system (Garner & Keoleian, 1995). Industriell ekologi innebär att naturliga ekosystem används som modell med syftet att integrera restprodukter och avfall i produktionsprocessen och på så sätt minska avfallsmängderna. Tillämpningen av industriell ekologi mellan olika industrier kan enligt Garner & Keoleian (1995) beskrivas som att gå från linjära (öppna) processer till kretsloppsanpassade (slutna) processer, så att avfall från en industri blir råvaran till en annan. Det kan genomföras genom återanvändning och återvinning av resurser (Ehrenfeld & Gertler, 1997), till

exempel genom att utnyttja avfallsprodukter eller spillvärme. I processen från alg till biogas finns det olika flöden att ta hänsyn till, framför allt i form av näringsämnen, vatten och energi. Flödena av kol, kväve och fosfor kommer att behandlas i kapitel 5 i samband med beskrivningar av hur kretslopp och flöden kan se ut i alg-biogasprocessen, medan energiflöden tas upp kort och vattenflöden inte inkluderas alls.

När flödena effektiviseras ger detta ofta både ekonomiska och ekologiska fördelar – *ekoeffektivitet* – vilket är ett viktigt synsätt inom fältet för industriell ekologi (Côté et al., 2005). Utgångspunkten i denna studie är hållbarhet, vilket per definition också kan inkludera begreppet *ekoeffektivitet*: en hållbar utveckling ”tillfredsställer dagens behov utan att äventyra kommande generationers möjligheter att tillfredsställa sina behov” (Världskommissionen för miljö och utveckling, 1987). Swedish Standards Institute (SIS) beskriver *ekoeffektivitet* som ”att göra mer för mindre” (2008, s.1) vilket innebär att produktionen kan öka medan miljöbelastningen och kostnaden relativt sett minskar. *Ekoeffektivitet* kan enligt SIS i ISO 14045 utredas genom en livscykelanalys (LCA). En LCA utförs när ett produktionssystem ska analyseras i sin helhet avseende energi- och materialflöden hela vägen från råvaruutvinning till avfallshantering (Björndahl et al., 2005).

2.4.2 Tre grenar inom industriell ekologi

Industriell ekologi beskrivs av Harper & Graedel (2004) som läran om industriella organismer och deras interaktioner med omgivningen. Industriell ekologi kan indelas i en *konceptuell*, en *operativ* och en *systematisk* gren (ibid.).

Inom den *konceptuella* industriella ekologin dras paralleller mellan naturliga och industriella ekosystem. I alg-biogasprocessen studeras näringsflöden mellan olika industrier, och dessa flöden skulle – i form av en industriell näringsväv – kunna motsvara en ekologisk näringsväv där näringsämnena flödar i ett slutet kretslopp. De naturliga ekosystemen bygger på att nedbrytare omvandlar dött organiskt material till näring som åter blir tillgänglig för andra organismer (Starr, 2005). I det industriella ekosystemet kan nedbrytarens funktion liknas vid industrier som återvinner avfall, exempelvis avloppsreningsverk. När industriell ekologi studeras som koncept ställs enligt Harper & Graedel (2004) frågor som

- När är liknelser mellan naturliga och industriella ekosystem relevanta?
- Hur kan liknelserna appliceras på industriella ekosystem?
- Medför sådana appliceringar nödvändigtvis hållbara industriella ekosystem?

De verktyg som används för att besvara frågor som ställs i den konceptuella industriella ekologin har tagits fram inom den *operativa* grenen av industriell ekologi. Detta kan vara

livscykelanalyser (LCA) eller metoder för att designa produkter som medför en hållbar produktion (ibid.). Ett exempel är producentansvaret som innebär att det är producenten som ansvarar för att samla in och ta omhand uttjänta produkter, vilket i Sverige utgör ett styrmedel för att uppnå miljömålen (Naturvårdsverket, 2009).

Systematisk industriell ekologi syftar till att ge ett övergripande perspektiv av de komplexa funktioner som industriella ekosystem utgör och kan enligt Harper & Graedel (2004) studeras genom urban ekologi, materialflödesanalyser samt *industriell symbios*. Industriell symbios är ett begrepp som baserats på den symbios som förekommer i naturliga ekosystem och detta diskuteras närmare i nästa avsnitt. När industriell symbios studeras kan materialflödesanalyser vara ett användbart verktyg som möjliggör kartläggning och kvantifiering av ett ämne (exempelvis kol) som flödar genom ett system. Analyserna kan ge information om vilka symbiotiska relationer som kan upprättas inom ett industriellt ekosystem. Någon materialflödesanalys utförs inte i denna studie – det kan dock vara en effektiv metod för att göra en mer detaljerad utvärdering av näringsflödena i alg-biogasprocessen eller en omfattande utredning av processens möjligheter till ekologisk effektivitet.

2.4.3 Vad innebär industriell symbios?

I denna studie är det *systematisk* industriell ekologi som ligger i fokus, särskilt genom idén om industriell symbios. Ekologisk symbios innebär att individer av olika arter interagerar med varandra på ett för en eller båda parter fördelaktigt sätt (Starr, 2005), och när dessa typer av samarbeten sker mellan industrier kallas det industriell symbios. Resurser som material, energi, vatten och biprodukter är viktiga att ta hänsyn till när industriell symbios eftersträvas (Harper & Graedel, 2004). Ett exempel på ett industrisystem där industriell symbios råder är Kalundborg i Danmark. De symbiotiska relationerna mellan Kalundborgs industrier har, främst med ekonomiska incitament, vuxit fram successivt från början av sjuttioalet och grundar sig på fyra huvudsakliga industrier: ett kraftverk, ett oljeraffinaderi, ett läkemedelsföretag och en gipsskivetillverkare. Exempel på resurser som sammanlänkar olika industrier är värme, vatten, rökgaser, ånga och flygaska (Ehrenfeldt & Gertler, 1997). Numera är kärnverksamheterna dubbelt så många som vid starten och det totala antalet industrier som är symbiotiskt sammanlänkade är över tjugofem stycken (Industrial Symbiosis Institute, 2008).

När industriell symbios skapas mellan industrier utgår processen från vad som kan skapas av det befintliga. För att fullständigt slutna kretslopp ska bildas mellan industrier i ett industriellt ekosystem kan det krävas att industrier byggs upp endast i syfte att sluta de länkar där flöden inte kunnat kretsloppsanpassas. Detta beskriver Jelinski et al. (1992) i samband med idén att industriella

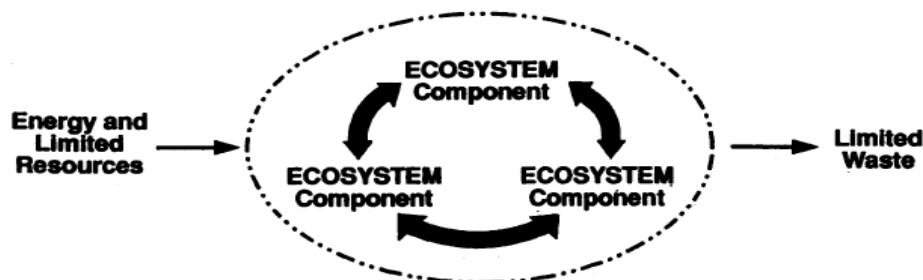
system kan delas in i tre typer:

Typ I (Figur 3) utgörs av ett linjärt flöde där obegränsade mängder resurser går in och obegränsade mängder avfall går ut. De linjära flödena tär på jordens resurser och skapar en ohållbar produktion. Denna produktionstyp kan förekomma när råvaruresurserna är till synes oändliga.



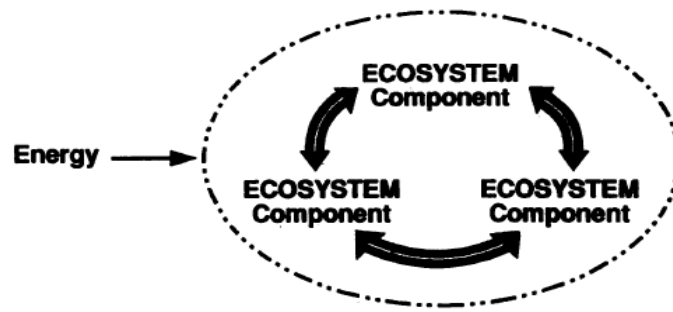
Figur 3. Typ I. Linjära flöden där resurser går in och avfall kommer ut (Jelinski et al., 1992, s. 793).

Typ II (Figur 4) utgörs av ett delvis slutet system. Anledningen kan vara att råvaran som används är dyr eller svår att utvinna, som till exempel är fallet inom metallindustrin. Energi och begränsade resurser går in i systemet och en begränsad mängd avfall kommer ut. Industrier tenderar att röra sig från typ I till typ II.



Figur 4. Typ II. Ett delvis slutet system (Jelinski et al., 1992, s. 794).

I typ III (Figur 5) tillförs inga nya resurser, inget avfall släpps ut och endast energi flödar in i systemet. Så fungerar de naturliga ekosystem vilka ligger till grund för utvecklingen av idén om industriell symbios. När industriell symbios tillämpas i praktiken är typ III svår att få till stånd eftersom det kräver att alla flöden av resurser har sammanlänkats i kretslopp. Alg-biogasprocessen skulle kunna utformas för att efterlikna ett sådant slutet system. I denna studie studeras i huvudsak flödena av föreningar innehållande kol, kväve och fosfor. Om alg-biogasprocessen drivs med en strategi, som tar hänsyn till de idéer som lyfts fram inom industriell ekologi av typ III-modell, finns det möjlighet att organisera en genuint hållbar och ekologiskt effektiv energiproduktion.



Figur 5. Typ III. Ett slutet system där endast energi flödar in (Jelinski et al., 1992, s. 794).

2.4.4 Den valda analysmodellen

Det finns flera sätt att strukturera modellering av industriekologiska koncept. Till exempel kan modellen utgå från befintliga industriella ekosystem som Kalundborg i Danmark vilket beskrivits ovan. Det industriekologiska konceptet tillämpas i alg-biogasprocessen genom en modell som skapats i en artikel av Liwarska-Bizukoje et al., *The conceptual model of an eco-industrial park based upon ecological relationships* (2009). Modellen innebär att industrierna i processen delas in i *producenter, konsumenter* och *destruenter*, och är användbar vid utvärdering av 1) om industriell symbios är möjlig mellan olika industrier, 2) vilka övriga åtgärder som måste vidtas för att skapa symbiotiska relationer samt 3) till vilken ansträngning eller kostnad detta kan ske. I alg-biogasprocessen och för studiens syfte är det främst den första punkten som är aktuell. Den faller inom ramen för *systematisk* industriell ekologi som beskrivits ovan enligt Harper & Graedel (2004) då den fokuserar på industriell symbios och möjliga symbiotiska relationer som kan upprättas både inom och omkring alg-biogasprocessen. Genom kunskap om vilka typer av industrier som finns och vad de har för funktioner kan modellen på ett enkelt sätt användas för utvärdering av möjligheterna att skapa symbios mellan industrier i det industriella ekosystemet.

Modellen kommer i denna studie att appliceras på alg-biogasprocessen för att ytterligare utveckla diskussionen kring de aktuella kretsloppen. Den huvudsakliga fördelen med modellen är att den ger möjlighet att på ett tidigt stadium i planeringen av ett industriellt ekosystem avgöra vilken typ av industrier som måste finnas där för att processerna ska kunna kretsloppsanpassas, genom att den tar hänsyn till möjligheterna att skapa symbiotiska relationer mellan industrierna. De kan sedan sammankopplas baserat på behov och biprodukter och på så vis skapas ett industriellt ekosystem där material- och energiflödena är ekologiskt och ekonomiskt effektiva. Denna strategi beskrivs applicerat på alg-biogasprocessen i kapitel 5.1.

Eftersom studien främst tar upp kolets, fosfors och kvävet kretslopp är det också här fokus ligger vid tillämpningen av idéer från fältet för industriell symbios. Flödet av energi mellan ”organismerna” i det industriella ekosystemet är dock så viktigt att det inte kan förbises, varför det behandlas kort i kapitel 5.3.6.

2.4.5 Kolets, kvävet och fosfors naturliga kretslopp

Mikroalgernas tillväxt, och därmed också biogasframställningens effektivitet, beror av deras möjligheter att ta upp näring. Detta är en viktig del av studien och bidrar till att besvara forskningsfrågorna som gäller *C. vulgaris* näringsupptag, dess lämplighet som energiråvara samt möjligheterna till kretsloppsanpassning av biogasproduktionen. Mikroalger såväl som alla andra organismer behöver näringsämnen som bland annat innehåller kol (C), kväve (N) och fosfor (P), och relationerna mellan dessa påverkar organismens produktion, ämnesomsättning och roll i näringsväven (Elser et al., 2000). Hos mikroalger som odlas för biogasframställning är sammansättningen viktig att ta hänsyn till både vid val av näringssubstrat och för algens egenskaper i rötkammaren. I denna studie kan föreningar innehållande både kol, kväve och fosfor inkluderas i termen *näringsämne*. Kol kan dock anses vara en energikälla snarare än en näringskälla eftersom kolet utnyttjas av mikroalgerna under fotosyntesen, då solenergi, koldioxid och vatten omvandlas till syre och energi i form av socker som används för tillväxt (Smith & Smith, 2003). Generellt kan sägas att alla flöden i grunden drivs av energi från solen och att de kan omfatta både atmosfären (luften), biosfären (allt levande), geosfären (marken) och hydrosfären (vattnet).

För information om flödena av kol, kväve och fosfor i alg-biogasprocessen hänvisas till kapitel 5.2 och översiktliga beskrivningar av ämnens naturliga kretslopp finns i Bilaga 1.

2.5 Ett område under utveckling

Innehållet i denna studie består av flera relativt utforskade områden. Intresset för intensiv odling av mikroalger har ökat i takt med att efterfrågan på förnybar energi har ökat, och forskningen i Sverige har precis kommit igång. Biogasområdet är också förhållandevis nytt och det pågår forskning för att förbättra rötningstekniker och andra processer (Bioenergiportalen, 2010a). Inom industriell ekologi framhävs koncept som matchar behovet av att hushålla med resurser vilket även det är en relativt ny företeelse. De tre områdena har genom denna studie länkats samman för att ge en uppfattning om hur ett miljömässigt hållbart bränsle kan framställas. Innehållet i studien bygger på litteratur som finns tillgänglig fram till och med mars 2010 – eventuella förändringar i forskningsunderlaget efter detta datum tas inte i beaktande.

3. Metod, material och avgränsningar

3.1 Metod

För att besvara de presenterade forskningsfrågorna genomfördes en studie av litteratur som skrivits inom området. Det innebär att det empiriska materialet i huvudsak består av tidigare utförd forskning i form av originalartiklar publicerade i internationella tidsskrifter. Sökningarna utfördes i databaser som Wiley Interscience, Springer Link, Academic Search och Science Direct. Sökorden som användes var till exempel *Chlorella vulgaris*, micro algae, anaerobic digestion, biogas, fluegas, waste water, biodiesel, industrial ecology, industrial symbiosis och olika kombinationer av dessa. Eftersom det var svårt att hitta rätt artiklar bara med hjälp av sökorden undersöktes också enligt snöbollsmetoden intressanta artiklars referenslistor, som gav många exempel på andra lämpliga källor att studera.

Källorna söktes upp både under förberedelserna då den grundläggande informationen samlades in men till stor del även under arbetets gång. Detta för att det fanns mycket få artiklar som hade en övergripande infallsvinkel gällande *C. vulgaris* förutsättningar för anaerob nedbrytning (rötning). Den önskade informationen samlades ihop bitvis från många källor som tar upp olika delar av alg-biogasprocessen och kunskapen om vilken information som behövde sökas upp växte efterhand som arbetet pågick. Antalet artiklar som berör industriell ekologi var något större. Inga artiklar påträffades som tog upp samma kombination av forskningsområden som denna studie gör.

3.2 Källor och källhantering

Mycket information har hämtats från forskning om mikroalger för biodieselproduktion. De två typerna av drivmedelsframställning ställer dock olika krav på mikroalgernas egenskaper varför bara vissa delar av informationen kring algodling för biodiesel går att applicera i biogassammanhang. Ett fåtal *reviews* (sammanställningar av forskning inom ett område) med anknytning till odling av mikroalger eller mikroalger för energiproduktion har gett insikt om de huvudsakliga moment som ingår i en algodlingsprocess men inte så mycket om mikroalger i en biogasprocess.

Vid genomgång av aktuell litteratur har noterats att en del av den senare forskningen om odling av mikroalger bygger på ett relativt litet antal studier som gjordes runt 50- och 60-talen. Om det skulle finnas felaktigheter i de äldre studierna kan det påverka även en viss del av dagens forskning. Det har också noterats att forskare ibland gör obefogade generaliseringar, till exempel när egenskaper som kan finnas hos släktet *Chlorella* tas för givet gälla även *C. vulgaris*. I denna

studie framgår det i den aktuella texten där egenskaper för en ej specificerad art av *Chlorella* beskrivs i samband med egenskaper hos *C. vulgaris* genom att den omnämns just *Chlorella*.

Ytterligare en viktig informationskälla inom ämnet algodling har varit personlig kommunikation med Tony Fagerberg som bland annat forskar kring mikroalger på avdelningen för Limnologi och Marin ekologi vid Biologiska Institutionen på Lunds Universitet. Inom biogasområdet har konsulter på BioMil AB, ett kunskapsföretag som arbetar med kretsloppslösningar för biogas och miljö, bistått med information. En internetkälla (www.bioenergiportalen.se) har använts vid införskaffandet av information kring bioenergi. Den har skapats på uppdrag av Jordbruksverket och riktar sig till energirådgivare, myndigheter och andra som vill hålla sig informerade om bioenergimarknaden.

Inga artiklar kunde hittas som behandlar industriell ekologi där odling av mikroalger tas upp. Information om industriell ekologi har huvudsakligen hämtats i *Industrial Ecology in Practice* (Ehrenfeld & Gertler, 1997), *Industrial Ecology: A Teenager's Progress* (Harper & Graedel, 2004), *Industrial Ecology: Concepts and Approaches* (Jelinski et al., 1992) samt *The conceptual model of an eco-industrial park based upon ecological relationships* (Liwarska-Bizukojc et al., 2009).

3.3 Avgränsningar

För att kunna avgöra hur de flöden som ingår i alg-biogasprocessen kan struktureras på ett ekologiskt effektivt sätt måste tydliga gränser sättas för vad som ska ingå i denna studie.

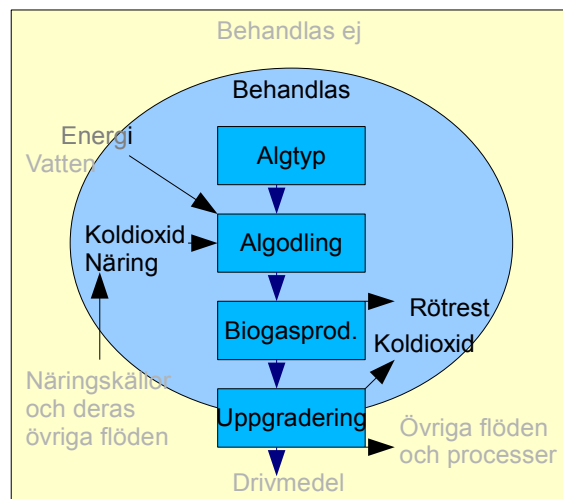
Studien baseras på ett scenario där *C. vulgaris* odlas intensivt i fotobioreaktorer (transparenta tuber där mikroalgerna förökar sig) för att sedan rötas till biogas. Alg-biogasprocessen startar med själva algodlingen där valet av alg påverkar den efterföljande processen och där odlingens inflöden av näringsämnen räknas från sina källor (exempelvis industrier och reningsverk). Biogasprocessens näringsflöde inkluderas i sin helhet, medan den biprodukt som skapas i form av en rötrest tas upp avseende dess lämplighet som gödsel. Uppgraderingen av biogas omfattar endast den koldioxid som skiljs från metangasen – resterande processer och flöden i uppgraderingen faller utanför ramarna för denna studie. Fokus ligger på flöden som rör algodlingen och biogasproduktionen, i huvudsak kol, kväve och fosfor. Kolupptaget under heterotrof tillväxt (kolkällan är inte koldioxid) tas inte upp då det tycks fattas underlag för detta. I Figur 6 syns studiens avgränsningar avseende processen från alg till biogas.

Det huvudsakliga ändamålet med den typ av algodling som studien baseras på ska vara att skapa en råvara för biogasframställning på ett hållbart sätt, till skillnad från algodlingar som främst finns för att rena vatten eller rökgaser. Tanken är inte att beskriva en biogasutvinning som ska

optimeras till varje pris – det huvudsakliga syftet är att de dynamiska system som resursflödena utgör optimeras genom effektivt användande av resurserna.

För att uppnå syftet för denna studie skulle det vara möjligt att göra en eller flera livscykelanalyser, särskilt eftersom de dessutom kan användas som verktyg vid utredningar om hur industriens flöden kan sammanlänkas i praktiken (Garner & Keoleian, 1995). Istället, med livscykel tänkande som informativt perspektiv, har fokus riktats mot alg-biogasprocessen med målsättningen att effektivisera processer och använda avfallsprodukter som inflöden genom tillämpning av industriekologiska koncept som kretsloppsanpassning. Detta innebär att de teoretiska referensramarna i studien främst tar avstamp inom industriell ekologi enligt definitionen av Smith (1998, s. 13) i kapitel 2.3.1 och enligt en modell av Liwarska-Bizukojc et al. (2009) som beskrivs i kapitel 2.3.4 och 5.1.1.

Ekoeffektivitet är ett begrepp som används inom fältet för industriell ekologi. Genom begreppet introduceras både ett ekologiskt och ett ekonomiskt perspektiv på alg-biogasprocessen. I denna studie är det främst den ekologiska delen av begreppets innebörd som appliceras; inga ekonomiska beräkningar eller kostnadsangivelser för exempelvis produktionssystem presenteras och inga kvantiteter på flöden beräknas. Vidare används därför uttrycket ekologisk effektivitet istället. Det antas också att ekologisk effektivitet kan leda till ekonomisk effektivitet genom effektiv användning och återanvändning av resurser.



Figur 6. Översikt av studiens avgränsningar i processen från alg till biogas.

4. Analys av *C. vulgaris* i alg-biogasprocessen

I detta kapitel analyseras alg-biogasprocessen med avseende på *C. vulgaris* egenskaper. Härigenom kan forskningsfrågorna *Hur ser C. vulgaris upptag av näringsämnen ut?* samt *Är C. vulgaris lämplig som råvara för biogasproduktion?* besvaras.

4.1 *Chlorella vulgaris*

4.1.1 *C. vulgaris* ljusbehov och näringsstrategi

Mixotrofa mikroalger har en konkurrensfördel gentemot mikroalger som är endera heterotrofa eller fotoautotrofa eftersom de kan tillgodogöra sig både organiskt och oorganiskt kol och leva i både ljus och mörker. Enligt Burrell et al. (1985) har *C. vulgaris* god tillväxt både i ljusa och mörka miljöer så länge den har tillgång till bra näring för heterotroft energiintag (i mörker), vilket även konstaterats av Carvalho (2007).

Vid fotoautotrof tillväxt i kvävefattig miljö har mikroalgcellen ett högre lipidinnehåll (upp till 38 procent) än vid god tillgång på kväve, men den totala producerade lipidmängden i biomassan blir ännu högre under mixotrof och heterotrof tillväxt (Liang et al., 2009). Mängden biomassa är viktig när mikroalger odlas för biogasframställning. Vid jämförelse mellan de tre näringsstrategierna bildas mest biomassa vid mixotrof tillväxt, något mindre vid heterotrof (utan ljusberoende) tillväxt och minst vid fotoautotrof (ljusberoende) tillväxt (ibid.). Även Orus et al. (1991) konstaterar att mixotrof tillväxt vid tillgång till näringssubstrat i form av glukos (vilket behövs under heterotrof tillväxt i mörker) ger högre produktion än hos de mikroalger som enbart växer fotoautotroft. Burrell et al. (1984b) drar slutsatsen att *C. vulgaris* har hög kapacitet att även heterotroft omvandla organiskt substrat till biomassa. Detta är en fördel ur hållbarhetsperspektiv eftersom det kan möjliggöra algodling med minskat behov av artificiell belysning vilket är positivt inte bara ur energi-, miljögift- och materialresurssynpunkt utan även genom mindre beroende av utrymme och teknik som ännu inte forskats fram.

4.1.2 Koldioxidupptag hos *C. vulgaris*

En algs förmåga att ta upp koldioxid är viktig ur ett hållbarhetsperspektiv. Möjligheten att skapa en resurs av ett miljöproblem medför att en algodling som tillförs rökgaser från till exempel en industri blir mer hållbar: dels kan den vid ljustillgång ta upp koldioxid från industrins rökgaser och skapa ökad tillväxt av mikroalger (vilket beskrivs närmre i kapitel 5.3), dels ersätter den

upptraderade biogasen fossila bränslen. Det är naturligtvis också en fördel att rökgaserna som släpps ut från industrin innehåller lägre halter koldioxid än om de inte renats av mikroalger. Vid förbränning av den mikroalgbaserade fordonsgasen frigörs sedan koldioxid som åter kan tas upp i algodlingen eller av andra växter.

Mikroalgers koldioxidupptag i odlingar har undersökts i framför allt Japan och USA under det senaste decenniet i samband med rening av rökgaser från förbränning (Doucha et al., 2005) och kombinationen av mikroalger och koldioxidrika rökgaser har visat sig vara positiv (Avfall Sverige, 2009b; Doucha et al., 2005; de Morais & Costa, 2007; Travieso et al., 1993; Yue & Chen, 2005; Yun & Park, 1997) eftersom *C. vulgaris* fotoautotrofa egenskaper tillåter ett effektivt upptag av koldioxid från atmosfären. Enligt försök gjorda i tubulära, vertikala fotobioreaktorer, då gasen bubblas genom algbiomassan, har *C. vulgaris* god tillväxt vid koldioxidhalter på 10 - 12 procent (de Morais & Costa, 2007; Yue & Chen, 2005; S. Ekendahl, personlig kommunikation, mars 2010). Detta är den ungefärliga mängd koldioxid som rökgaser från ett kraftvärmeverk kan innehålla (Avfall Sverige, 2009b).

C. vulgaris kan också *vänjas* vid högre halter koldioxid än de nyss nämnda (Lee et al., 2000; Yun et al., 1996). Enligt en studie av Yun och Park (1997), där en algodling tillfördes luft med 20 procent koldioxid, kunde alger fixera tre fjärdedelar av den tillförda koldioxiden, som tilläts cirkulera i fotobioreaktorn. I Avfall Sveriges undersökning (2009b) fixerades cirka 2 kg koldioxid per kilogram producerad algbiomassa vilket också stämmer överens med resultat presenterade av Berg-Nilsen (2006). Koldioxidupptaget kan bero på exempelvis initiala koldioxidhalter, vald odlingsmetod eller under hur lång tid alger exponeras för gasen. *C. vulgaris* besitter enligt ovanstående goda egenskaper för ett effektivt upptag av koldioxid ur rökgaser.

4.1.3 Kväveupptag hos *C. vulgaris*

Mikroalger tar upp näring bland annat i form av kväve, antingen fotoautotroft genom att de tar upp det i oorganisk form (nitrat eller ammonium) eller heterotroft genom att de tar upp organiskt bundet kväve, ofta lagrat som protein (Starr, 2005). Enligt Megharaj et al. (1992) har *C. vulgaris* mycket stor potential att under goda förhållanden ta upp kväve. I laboratorieförsök tog mikroalgen upp ca 70 procent av kvävet under tillväxtperioden. *Chlorellas* goda kväveupptag har även konstaterats av Tam & Wong (1989) samt av González et al. (1997) och enligt den studie som gjorts av Avfall Sverige (2009b) har en art av *Chlorella* efter 5 respektive 12 dagar fixerat 40 respektive 95 procent av kvävet som i låga halter (40 mg N_{tot} L⁻¹, totalkväve per liter) tillförts via avloppsvatten.

Kväve i form av nitrat (NO₃⁻) påverkar tillväxten negativt vid begränsade halter (Yun & Park,

1997) – dock gäller den hämmande verkan inte lipidproduktionen, som tvärtom ökar: enligt Converti et al. (2009) medförde en sänkning av nitrathalten en fördubblad lipidproduktion. Att skapa en kvävefattig miljö för att algerna ska öka fettproduktionen är ofta aktuellt när de odlas för biodiesel (Scragg et al., 2002). I denna studie är det dock av större intresse att algerna tillåts fixera de mängder kväve som tillförs odlingen via exempelvis avloppsvatten, dels eftersom det finns en ekologisk fördel i detta och dels för att den totala mängden biomassa är viktigare än lipidinnehållet i varje cell då mikroalger odlas som råvara för biogasframställning. Vid höga halter kväve påverkas inte produktionen av biomassa hos *C. vulgaris* negativt förrän det rör sig om nitrathalter på uppåt 1.9 g NO₃⁻ L⁻¹ (Jeanfils et al., 1993). Beroende på förutsättningarna kan en lämplig koncentration ligga runt 0,74 g L⁻¹ NO₃⁻ (ibid.).

4.1.4 Fosforupptag hos *C. vulgaris*

Fosfor tas upp av mikroalger antingen fotoautotroft i oorganisk form (som fosfat) eller heterotroft genom att de tar upp fosfor bunden i organiskt material (Starr, 2005). *C. vulgaris* har visat sig effektivt kunna ta upp fosfor (för närmare beskrivning av fosfors kretslopp se kapitel 5.2.2 samt Bilaga 1) ur näringsrikt vatten som exempelvis avloppsvatten (Megharaj et al., 1992; Tam & Wong, 1989; González et al., 1997). Enligt Megharaj et al. (1992) kan över hälften av den tillgängliga fosfor tas upp under *C. vulgaris* tillväxtfas vid en halt på 3,10 mg PO₄-P L⁻¹ (fosfatfosfor per liter). Under 5 respektive 12 dagar har en art av *Chlorella* visat sig kunna minska mängden fosfor med 50 respektive >95 procent då renat avloppsvatten tillförts en algodling (0,42 mg P_{tot} L⁻¹) (Avfall Sverige, 2009b) vilket innebär ett mycket effektivt upptag vid låga halter fosfor.

När *Chlorella* lever mixotroft har den ett effektivare upptag av fosfor jämfört med när den växer heterotroft, vilket kan bero på att upptaget är som allra effektivast under fotoautotrof tillväxt (Qu et al., 2006). Detta innebär att om det tillförda näringssubstratet innehåller höga halter av fosfor och det finns intresse av att denna fosfor ska minska så effektivt som möjligt bör ljusmängden vara tillräcklig för att *Chlorella* ska kunna växa fotoautotroft i större utsträckning.

4.2 Rötning av algbiomassa av *C. vulgaris*

Mikroalgen är en ny och relativt outforskad råvarukälla för framställning av biogas. För en bättre förståelse av hur mikroalgen fungerar i biogasprocessen, och därmed också förståelse för vilka ämnen som är viktiga för denna process, beskrivs här algens egenskaper under anaerob nedbrytning. Detta är också intressant ur effektivitetssynpunkt då alg-biogasprocessens potential att utformas på ett hållbart sätt till stor del beror på den ekologiska effektiviteten, alltså hur väl *C. vulgaris* lämpar sig som råvara för biogasproduktion (forskningsfråga 2).

4.2.1 *C. vulgaris* egenskaper vid rötning till biogas

Råvaror, eller substrat, som ska rötas till biogas kan vara bättre eller sämre lämpade för detta. Ett bra substrat genererar mycket metan per mängd substrat som förs in i rötkammaren och det finns ett stort antal parametrar som kan påverka utfallet. Enligt både Sialve et al. (2009) och Travieso et al. (1993) kan andelen metan i mikroalgbaserad biogas ligga kring 70 procent för ett flertal arter och under olika odlingsförhållanden, vilket innebär ett högt metanutbyte förutsatt att biogasutbytet (genererad biogas per mängd substrat) är högt (Carlsson & Uldal, 2009). Det är den utvunna mängden metan per mängd tillfört substrat som visar hur effektivt substratets metanutbyte är. För att kunna ställa algbiomassans biogasutbyte i relation till andra energiråvaror syns i Tabell 1 biogasutbytet för olika substrat. Biogasutbytet för algbiomassa syns i Tabell 2.

Tabell 1. Biogasutbyte och torrsubstanshalt för olika substrat (Berglund och Börjesson, 2003, s. 9)

Substrat	TS-halt (%)	Gasutbyte ($\text{m}^3\text{CH}_4\text{kg}^{-1}\text{TS}$)
Svingödsel	8	0,2
Nötgödsel	8	0,18
Vall	23	0,3
Betblast	19	0,3
Halm	82	0,2
Organiskt hushållsavfall	30	0,35
Slakteriavfall	17	0,27
Fettavskiljarslam	4	0,63

Tabell 2. Möjligt biogasutbyte och torrsubstanshalt för algbiomassa (baserat på De Schamphelaire & Verstraete, 2009)

Substrat	TS-halt (%)	Gasutbyte ($\text{m}^3\text{CH}_4\text{kg}^{-1}\text{TS}$)
Algbiomassa	6	0,3

Baserat på ett exempel från De Schamphelaire & Verstraete (2009) har den möjliga utvunna energimängden per hektar räknats ut (se bilaga 2) för att ge en ungefärlig uppfattning om vilken storleksordning energiutvinningen av biogas från mikroalger kan befinna sig i. Enligt detta exempel är den producerade energin 78 MWh per hektar och år. Detta kan ställas i relation till biogasutbytet från vallgrödor, som av gräs- och baljväxterna är det hittills mest intressanta substratet för biogasproduktion i Sverige (Carlsson & Uldal, 2009). Energiproduktionen för vall är 23 MWh per

hektar och år, och motsvarande siffra för majs är 39 MWh per hektar och år (Bioenergiportalen, 2010b). Denna jämförelse visar att det potentiella biogasutbytet från odlade mikroalger är högt.

4.2.2 Näringsinnehåll i algbiomassa från *C. vulgaris*

När organiskt material ska rötas till biogas är det viktigt att ta hänsyn till dess näringsinnehåll så att mikroorganismerna i röt-kammaren trivs och biogasproduktionen därmed blir så effektiv som möjligt (Carlsson & Uldal, 2009). I rötningssprocessen utgör kolet i algbiomassan mikrofloras energikälla och kvävet påverkar dess tillväxthastighet (Carlsson & Uldal, 2009). Ofta medför ett högt proteininnehåll en låg C/N-kvot (kol/kväve, anger förhållandet mellan kol och kväve i organiskt material) (Brown et al., 1997). Enligt en studie av De Schampheleire & Verstraete (2009) kan C/N-kvoten för mikroalger ligga mellan 10 och 17, och det högre värdet är acceptabelt ur rötningssynpunkt: en C/N-kvot runt 20 är lämplig i röt-kammaren, förutsatt att det organiska materialet finns i tillgänglig form för mikroorganismerna (Carlsson & Uldal, 2009). Till exempel kan en begränsande faktor vara om mikroalgernas cellväggar inte kan brytas ner, eftersom mikroorganismerna då inte kan tillgodogöra sig energin och näringen i algerna (Sialve et al., 2009). En C/N-kvot specifikt för *C. vulgaris* har, liksom för mikroalger generellt, inte kunnat fastställas. Enligt Mata et al. (2010) kan detta bero på vilken tillväxtfas mikroalgerna befinner sig i: under olika skeden innehåller mikroalger varierande mängder protein och kolhydrater varför C/N-kvoten är svår att fastställa.

Kväve är en viktig beståndsdel i protein, och proteinhalten i *C. vulgaris* kan ligga på uppåt 50 procent (Sialve et al., 2009). Ett för högt proteininnehåll i algbiomassan (låg C/N-kvot) kan resultera i hämmad metanbildning på grund av ammoniumackumulering i röt-kammaren (Yen & Brune, 2007) eftersom de anaeroba mikroorganismerna drabbas av ammoniuminhibering (Sialve et al., 2009). Samson & LeDuy (1983) fann att metanproduktionen kan öka till den dubbla om algbiomassa rötas tillsammans med lika mycket avloppsslam, eftersom det höga kväveinnehållet i algbiomassan ihop med det kolrika avloppsslammet har en positiv effekt på metanogen aktivitet, det vill säga ger upphov till lägre ammoniumavgång (Sialve et al., 2009). Enligt S. Ekendahl (personlig kommunikation, mars 2010) kan problem med höga kvävehalter också förhindras genom att en mikroalg med hög kolhydrathalt används. Kolhydrater ger dock ett lågt gasutbyte och en låg metanhalt, till skillnad från fett som ger ett högt gasutbyte och en hög metanhalt (Carlsson & Uldal, 2009).

Mikroalger som har en fetthalt (lipidhalt) på strax under 40 procent ger maximal tillväxt och maximal metanproduktion; här infinner sig alltså en optimal energibalans (Sialve et al., 2009). Alger som innehåller mycket höga halter av fettsyror kan orsaka problem i biogasproduktionen (S.

Ekendahl, personlig kommunikation, mars 2010) eftersom pH sjunker och resulterar i att mikroorganismernas tillväxt hämmas (Carlsson & Uldal, 2009). Lipidinnehållet i *C. vulgaris* ligger mellan 15 och 58 procent (Converti et al., 2009; Mata et al., 2010; Gouveia & Oliveira, 2009; Scragg et al., 2002) och beror som nämnt bland annat på den tillgängliga mängden kväve. Alla mikroalger innehåller enligt Gouveia & Oliveira (2009) ungefär samma typer av lipider: omättade fettsyror (50-65 %) och palmitrinsyra (mättad) (17-40 %). Enligt Avfall Sverige (2009a) bryts omättade lipider lättare ner i rötkammaren medan till exempel palmitrinsyra är svårare att bryta ner. Lipiderna i algbiomassa består således till större delen av typer som är lättillgängliga för mikroorganismerna.

C. vulgaris växer optimalt i en pH-nivå på 7,5-8 (Rachlin & Grosso, 1991). Vilket pH som är optimalt i rötkammaren beror på anläggningen, men normalt ligger pH i en rötkammare runt 7-8,5 (M. Linné, personlig kommunikation, april 2010). Metanandelen i biogasen påverkas till stor grad av pH, som upp till en viss gräns (som kan avgöras av mängden alstrad ammoniak) kan ge upphov till högre metanbildning (Sialve et al., 2009). En annan faktor som påverkar metanalstringen är mikroalgens cellmembran. För att mikrofloran under rötningsprocessen ska kunna tillgodogöra sig näringen från algerna måste de ta sig igenom cellmembranet, och beroende på algens egenskaper kan detta vara olika svårt. Hos *C. vulgaris* saknas den yttre, motståndskraftiga cellvägg som finns hos många andra arter (Afi et al., 1996) vilket gör att dess cellinnehåll blir mer lättåtkomligt för de anaeroba mikroorganismerna.

4.2.3 Rötresten som biogödsel?

När algbiomassan rötats till biogas återstår en rötrest med högt näringsinnehåll som kan återföras till mark där växtlighet utnyttjar näringen, vilket är ett viktigt moment i kretsloppsanpassningen av alg-biogasprocessen. Rötresten kan ersätta konstgödsel som tillverkas i en mycket energikrävande process, vilket kan ge stora energibesparingar (Berglund & Börjesson, 2003).

Biogödsel är rötrest från biogasproduktion vilken ur smittskydds- och metallinnehållsaspect certifierats som lämplig att sprida på odlingsmark som näringssubstrat (Baky et al., 2006). Det är inte känt hur väl rötrest från algbiomassa som tillförts avloppsvatten som näringsämne lämpar sig som gödselmedel, men risken finns att algerna tagit upp tungmetaller från avloppsvattnet vilka sedan hamnar i rötresten. *C. vulgaris* är kapabel att ta upp bland annat kadmium (Carr et al., 1998; Rachlin & Grosso, 1991) som kan hamna i rötresten ihop med andra ämnen som funnits i det avloppsvatten mikroalgerna livnärt sig på. Kadmium är en tungmetall som kan orsaka allvarlig skada på levande organismer (Huynh, 2005).

Det är inte klart hur behovet av förbehandling ser ut när algbiomassan tillförts avloppsvatten (de la Noue & de Pauw, 1988), men det kan finnas krav på uppvärmning (hygienisering) av algbiomassan (Carlsson & Uldal, 2009) beroende på dess innehåll av sjukdomsalstrande organismer. Det är dock troligt att rötresten från algbiomassa som närts på avloppsvatten faktiskt kan motsvara rötresten från källsorterat, organiskt avfall – vilket kan certifieras som biogödsel – eftersom avloppsvattnet som leds till odlingen till större delen är renat från föroreningar. Hur rötresten ska klassas i praktiken är alltså inte klart då det beror på innehållet i avloppsvattnet som mikroalgerna närts med, vilket i sin tur beror på var i reningsprocessen avloppsvattnet leds ut till fotobioreaktorn.

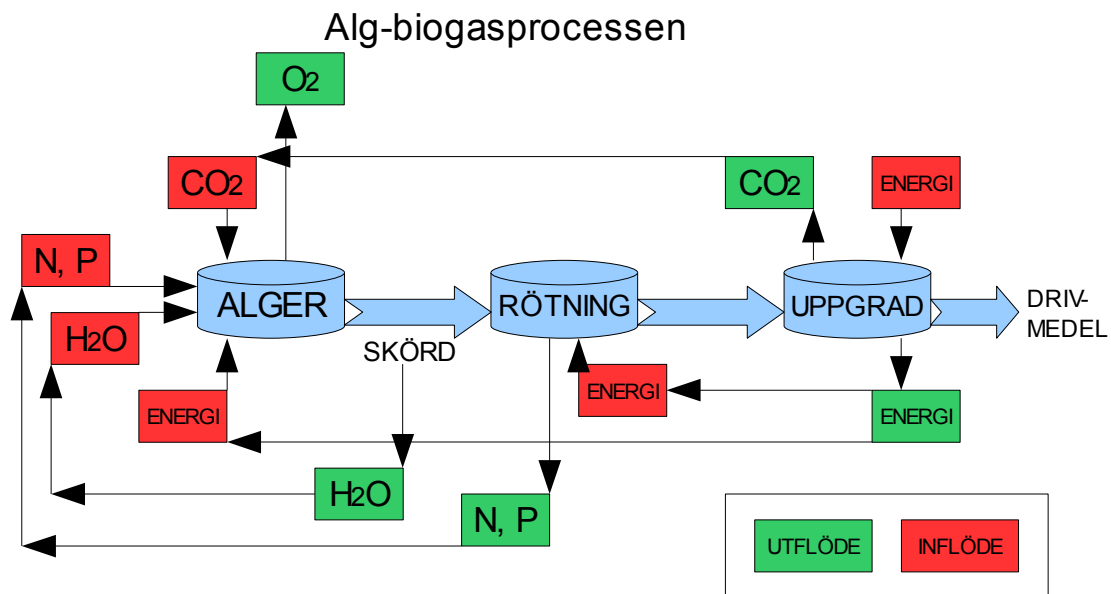
Om det skulle visa sig att rötresten inte går att använda som gödselmedel på grund av förorening är alternativet att deponera (lagra) den. En grundläggande del av en kretsloppsanpassad produktion av biogas är dock att den näring som finns kvar i rötresten kan återföras till odlingsmark. Deponering av förorenad rötrest innebär att näringskretsloppet bryts och att odlingsmark så småningom måste tillföras konstgödsel eftersom den ursprungliga näringen har blivit otillgänglig. Detta är helt oförenligt med en kretsloppsanpassad energiproduktion. För att undvika problemet måste tungmetaller som kadmium skiljas ut innan de når algodlingen så att mikroalgerna aldrig får möjlighet att ta upp dessa ämnen.

5. Kretsloppsanpassning av alg-biogasprocessen

Hittills har *C. vulgaris* egenskaper för näringsupptag (kapitel 4.2), algbiomassans funktion i en röt-kammare samt rötrestens egenskaper beskrivits (kapitel 4.3). Informationen ligger till grund för utvecklingen av detta kapitel som syftar till att besvara forskningsfrågan *Kan alg-biogasprocessen bli ekologiskt hållbar genom kretsloppsanpassning?*

5.1 Industriell symbios i en kretsloppsanpassad alg-biogasprocess

I alg-biogasprocessen är det en förutsättning att de råvaror som krävs finns tillgängliga genom återanvändning av andra industriers restprodukter för att processen inte ska påverka miljön negativt (Clarens et al., 2010). I Figur 7 visas potentiella kretslopp i alg-biogasprocessen. De gröna rutorna visar utflöden och de röda inflöden. I denna studie ligger fokus på flödena av näringsämnen innehållande kol (C), kväve (N) och fosfor (P), men i figuren har även energi och vatten inkluderats. Energiflöden tas översiktligt upp i kapitel 5.3.6 medan vattnet syns i figuren för att illustrera ytterligare en möjlighet till kretsloppsanpassning men tas ej upp i övrigt.



Figur 7. Flödesschemat visar en förenklad bild av de möjligheter till kretslopp som alg-biogasprocessen erbjuder. Även solenergi går in i algodlingen.

Modellen av Liwarska-Bizukoje et al. (2009) används som utgångspunkt i resonemanget om

näringsflöden i den kretsloppsanpassade alg-biogasprocessen (modellen har beskrivits i kapitel 2.3.3). Författarna drar tydliga paralleller till ekologiska ekosystem när de söker svara på de frågor som ställs inom systematisk industriell ekologi och använder sig främst av idén om industriell symbios när de applicerar denna modell på existerande industriers material- och energiflöden. I modellen klassificeras industrierna i ett industriellt ekosystem som *energiproducenter*, *producenter*, *konsumenter* och *destruenter* (nedbrytare). I alg-biogasprocessen saknas enligt denna modell både energiproducent, konsument och destruent (Tabell 3).

Enligt modellen producerar en energiproducent energi av marknadsvärde, en producent producerar varor av marknadsvärde, en konsument förbrukar varorna och skapar avfall, och en destruent omvandlar slutligen avfall till nya råvaror. Som minst måste en producent eller en destruent finnas i ett industriellt ekosystem för att symbiotiska relationer ska vara möjliga (Liwarska-Bizukojc et al., 2009). Om industriell symbios dessutom ska upprättas med hänsyn till det kretsloppsanpassade ekosystem (typ III) som presenterats av Jelinski et al. (1992) (se kapitel 2.3.3) måste industrier som sammanlänkar näringsflöden tillföras alg-biogasprocessen för att flöden ska kunna slutas i kretslopp. Därför kommer *ytterligare tre industrier att läggas till* i alg-biogasprocessen, som möjliggör symbiotiska relationer: dessa är *samhället* (ses här som en industri), som bistår med avfallsprodukter innehållande näringsämnen, medan *reningsverket* och *kraftvärmeverket* möjliggör användningen av avloppsvatten som näringskälla respektive förser systemet med energi. Denna utökade alg-biogasprocess kommer vidare att benämnas den *kretsloppsanpassade alg-biogasprocessen*. Andra industrier skulle också kunna vara del av det industriella ekosystemet. I Tabell 3 delas industrierna in enligt denna klassificering av Liwarska-Bizukojc et al. (2009).

Tabell 3. Ekologisk klassificering av industrierna i en kretsloppsanpassad alg-biogasprocess enligt modellen av Liwarska-Bizukojc et al. (2009). Grå markeringar visar de industrier som alg-biogasprocessen utökats med för att samtliga klassificeringar (producent, konsument och destruent) ska finnas med i den kretsloppsanpassade alg-biogasprocessen.

Industriella producenter	Industriella konsumenter	Industriella destruent
Algodling	Samhälle	Reningsverk
Biogasanläggning		
Uppgraderingsanläggning		
Kraftvärmeverk (energiprod.)		

Eftersom det är av intresse att titta på kolets, kvävet och fosfors väg genom systemet noteras i Tabell 4 under TYP vilket av dessa ämnen (eller energi) det huvudsakligen rör sig om i det aktuella flödet. Ämnena är C (kol), N (kväve) och P (fosfor).

Tabell 4. In- och utflöden i alg-biogasprocessen. De näringsämnen som går in som råvaror och ut i form av produkter beskrivs under TYP som C (kol), N (kväve) och P (fosfor). Även energin visas.

IN- OCH UTFLÖDEN AV NÄRINGSÄMNINGEN (C, N, P)				
INDUSTRI	RÅVARUBEHOV	TYP	PRODUKT/RESTPRODUKT	TYP
Reningsverk	Avloppsvatten	N, P	/Näringsrikt vatten	N, P
Algodling	Koldioxid, näring	C, N, P	Algbiomassa/rent vatten, ren luft	C, N, P
Biogasanläggning	Algbiomassa	C, N, P	Biogas/Rötrest	C, N, P
Uppgraderingsanl.	Biogas	C	Biobränsle/koldioxid	C
Samhälle	Livsmedel etc.	C, N, P	/avfallsprodukter	C, N, P
Kraftvärmeverk	Biogas	Energi	Elektricitet/värme	Energi

5.1.1 Analysmodellen applicerad på alg-biogasprocessen

I det följande beskrivs varje typ av näringsstrategi i det industriella ekosystemet närmare, både genom definitionerna av dem och hur indelningen av industrierna i alg-biogasprocessen har skett. Denna indelning skulle också kunna göras på andra sätt. Där inget annat anges är informationen hämtad ur Liwarska-Bizukoje et al. (2009).

Industriella producenter

De industriella producenterna producerar enligt modellen varor av marknadsvärde, vatten och energi inkluderat. Producenterna kan delas in i två grupper, där den ena utgörs av industrier som använder råvaror eller återvunnet material samt vatten och energi i sin produktion, vilka kan vara primära, sekundära eller tertiära (ekologiska producenter är alltid primära). Deras industriella metabolism resulterar i biprodukter. Till denna grupp hör *algodlingen*, *biogasanläggningen* och *uppgraderingsanläggningen*. Den andra gruppen utgörs av industrier som producerar energi, alltså energiproducenter. Hit hör *kraftvärmeverket*. Indelningen kan göras på olika sätt, och i detta fallet har biogasanläggningen inte räknats som energiproducent eftersom biogasen måste behandlas eller omvandlas på något sätt innan den blir användbar på ett effektivt sätt. Inte heller uppgraderingsanläggningen räknas som energiproducent eftersom energin inte produceras där utan bara koncentreras.

Algodlingen kan räknas som en industriell producent eftersom den tar en återvunnen råvara i form av delvis renat vatten från reningsverket samt en biprodukt i form av koldioxidrik gas från uppgraderingsanläggningen och skapar med hjälp av detta biomassa. Biomassan är en vara med marknadsvärde eftersom den är energirik. Uppgraderingsanläggningen är också en industriell producent som omvandlar en råvara i form av biogas till fordonsbränsle och därigenom producerar en vara som har högt marknadsvärde. Även biogasanläggningen är en industriell producent eftersom den producerar biogas av råvaran algbiomassa. Biogasen har ett högt marknadsvärde först då den uppgraderats, vilket gör biogasanläggningen beroende av uppgraderingsanläggningen – tvärtom är också uppgraderingsanläggningen beroende av biogasanläggningen. Detta ömsesidiga beroende kallas för industriell obligat symbios och finns även mellan algodlingen och biogasanläggningen då ingen av dem kan fungera bra utan den andra. Detta är till skillnad från den symbios som finns mellan till exempel uppgraderingsanläggningen och algodlingen som istället kan benämnas kommensalistisk; det är positivt för algodlingen att kunna ta upp koldioxid från uppgraderingsanläggningen, som i sin tur inte påverkas varken positivt eller negativt av detta. Det energiproducerande kraftvärmeverket förser anläggningarna i systemet med elektricitet och värme.

Industriella konsumenter

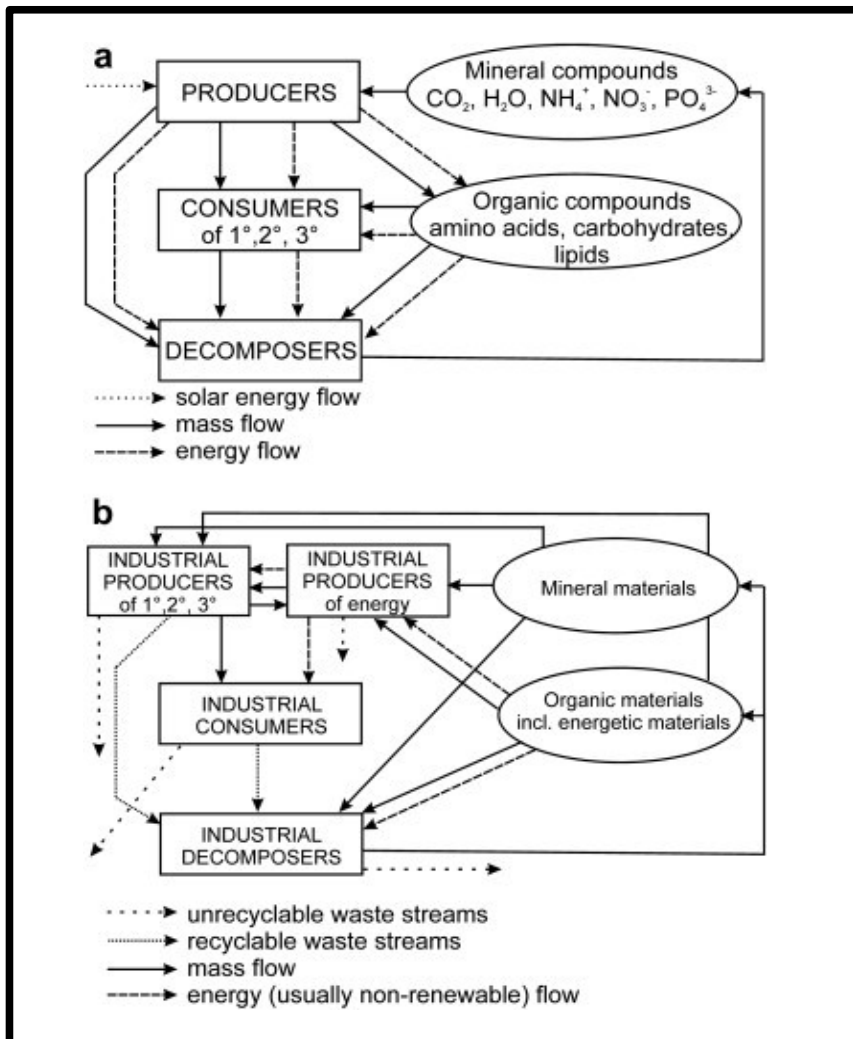
Industriella konsumenter är de som behöver material från producenterna. I detta fallet är det *samhället* som står för konsumtionen, i andra symbiotiska relationer kan det vara affärer, restauranger eller sjukhus. Konsumenterna använder produkter, vatten och energi, och producerar endast restprodukter i form av avfall då de metaboliserar. Samhället är en del av den kretsloppsanpassade alg-biogasprocessen genom att det näringsrika avloppsvatten som renas i reningsverk kan ledas till en algodling för ytterligare rening genom näringsupptag. Samhället skulle också kunna vara del av processen genom att det i slutänden konsumerar produkter som producenterna producerar i processer som bland annat skapar koldioxidrika rökgaser. Dessa skulle också kunna komma till nytta i algodlingen, men i det aktuella exemplet tillförs koldioxid istället från uppgraderingsanläggningen.

Industriella destruenten

De industrier som är ämnade att återvinna, omvandla eller rena biprodukter i form av avfall från producenter och konsumenter i de industriella ekosystemen kallas destruenten. Här är *vattenreningsverket* ett sådant exempel. Destruenternas huvudsakliga syfte är att ombilda avfallsprodukter till något mer miljövänligt material, önskat eller oönskat på marknaden. Deras

metabolism genererar ofta energi, som till exempel fjärrvärmeverk gör. I detta fallet genererar reningsverket vatten som genom alg-biogasprocessen bidrar till energiproduktion.

Figur 8 synliggör det naturliga och det industriella ekosystemet som beskrivs av Liwarska-Bizukoje et al. (2009), där grundläggande flöden av material och energi visas. Den påvisar de skillnader i flöden som finns mellan ett naturligt och ett industriellt ekosystem, exempelvis genom det naturliga ekosystemets enkelhet och dess enkelriktade flöden, men framförallt genom dess avsaknad av ej återvinningsbart avfall.



Figur 8. Grundläggande flöden av massa och energi i det naturliga (a) och det industriella (b) ekosystemet (Liwarska-Bizukoje et al., 2009).

5.1.2 Symbios i den kretsloppsanpassade alg-biogasprocessen

I Figur 9 har industrierna som ingår i den kretsloppsanpassade alg-biogasprocessen organiserats enligt strukturen i Figur 8 vilket möjliggör jämförelser mellan de två figurerna. Här förutsätts att samtliga industrier som ingår i det industriella ekosystemet är lokaliserade inom

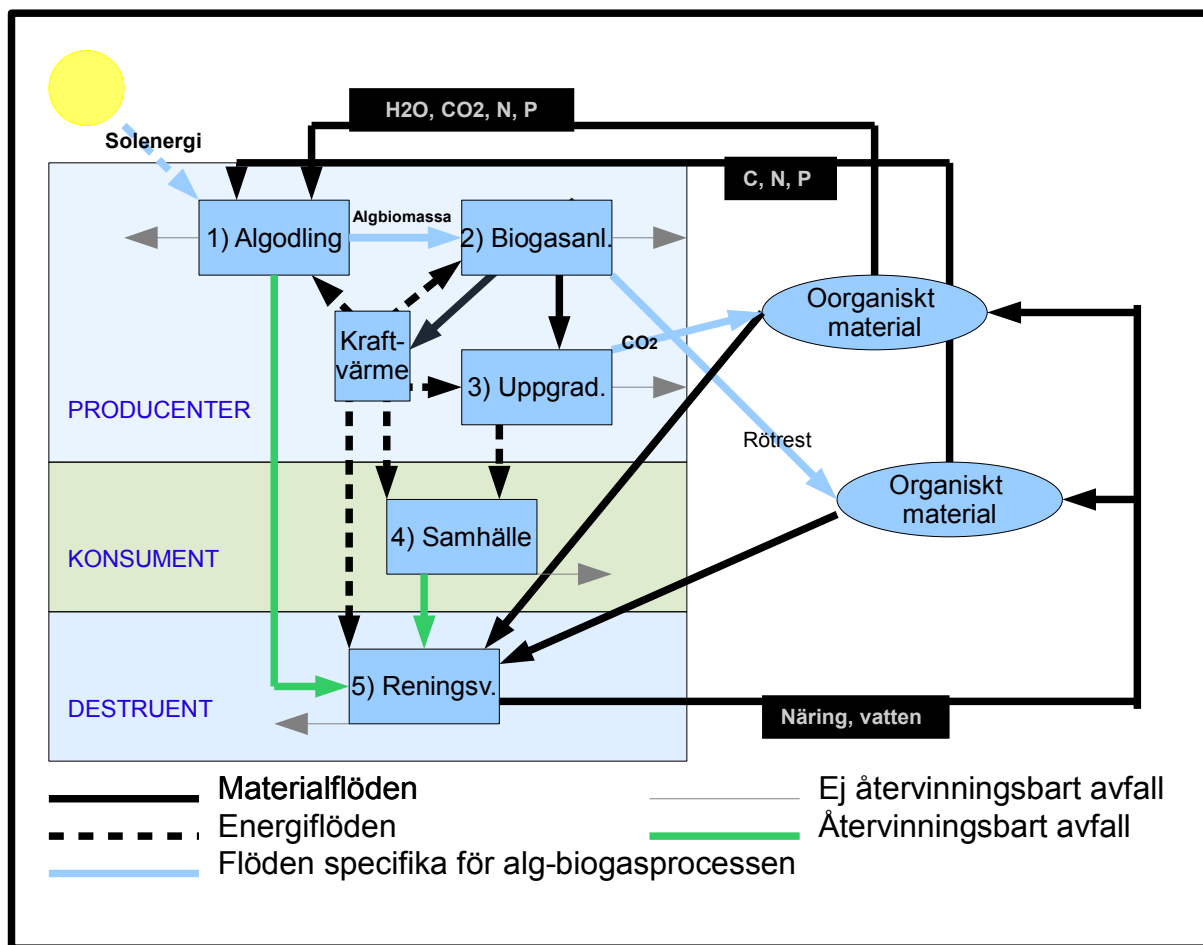
samma område för att längre transporter av material ska kunna undvikas. Notera att flera av de flöden som i Figur 8 endast förekommer i det naturliga ekosystemet här finns även i det industriella ekosystemet – detta eftersom två av industrierna i alg-biogasprocessen faktiskt utgörs av levande organismer (algodlingen och biogasproduktionen). Hos samtliga producenter produceras små mängder ej återvinningsbart avfall som deponeras. I Textruta 1 beskrivs de olika industriernas funktion i den kretsloppsanpassade alg-biogasprocessen som illustreras i Figur 9.

Resursflödena i den kretsloppsanpassade alg-biogasprocessen

Baserat på upplägget i Tabell 4 och Figur 9 efter modellen av Liwarska-Bizukojc et al. (2009)

- 1) Algodlingen**, i egenskap av producent, producerar biomassa av näringsrikt vatten från reningsverket och av rökgaser från uppgraderingsanläggningen. Biomassan skördas och leds till en biogasanläggning. Restprodukterna utgörs av rent vatten och ren luft.
- 2) Biogasanläggningen**, i egenskap av producent och i symbios med uppgraderingsanläggningen, producerar energirik biogas. En restprodukt är rötresten som kan spridas som gödselmedel och på så vis sluta näringskretsloppet. Biogasen leds till uppgraderingsanläggningen.
- 3) Uppgraderingsanläggningen**, i egenskap av producent och i beroende av biogasanläggningen, skapar ett förnybart drivmedel i form av fordonsgas vilken konsumeras av samhället. En biprodukt är koldioxidrika rökgaser som leds till algodlingen.
- 4) Samhället**, i egenskap av konsument, konsumerar energi och material och producerar avfall, bland annat i form av avloppsvatten som leds till ett reningsverk.
- 5) Reningsverket**, i egenskap av destruent, renar till viss del det förorenade vattnet som leds till en algodling där näringen utnyttjas för tillväxt.

Textruta 1. Resursflödena i den kretsloppsanpassade alg-biogasprocessen



Figur 9. Industriell symbios har skapats i alg-biogasprocessen. Grundläggande flöden av material och energi. Notera att flera av de flöden som i figur 8 endast förekommer i det naturliga ekosystemet även förekommer här tack vare de biologiska komponenterna i systemet. Se beskrivning i Textruta 1 ovan.

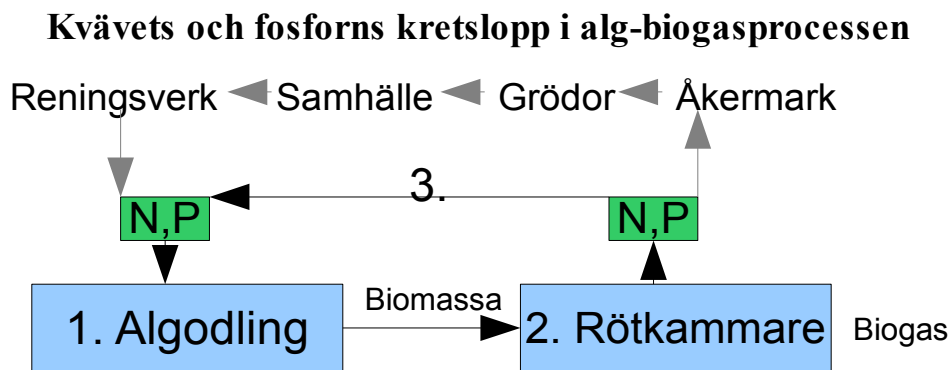
5.2 Kolets, kvävet och fosforns kretslopp i alg-biogasprocessen

I detta kapitel beskrivs kretsloppen av kol, kväve och fosfor som alg-biogasprocessen är involverad i och hur dessa kan sammanlänka industrier genom de symbiotiska relationer som tagits upp. Ur hållbarhetsperspektiv är även vattnets kretslopp och energins flöde intressanta att studera. De faller dock utanför ramarna för studien, med undantag för en kort diskussion om energiflöden (kapitel 5.3.6) eftersom de är en viktig del i industriell ekologi och för att möjligheterna till värmeåterföring i alg-biogasprocessen är stora.

5.2.1 Kolets kretslopp i alg-biogasprocessen

Kolets kretslopp presenteras här applicerat på dess hypotetiska väg genom den kretsloppsanpassade alg-biogasprocessen, främst i form av koldioxid. Siffran framför varje steg

1. Mikroalger tar upp näring (N och P) fotoautotroft eller heterotroft och tillväxt sker.
2. Algerna skördas och förs till röt-kammaren där anaeroba bakterier bryter ned det organiska materialet. Den organiskt bundna delen av kvävet bildar ammoniumkväve (Kirchmann, 1988) som avgår som gas. Resterande näring finns kvar i rötresten ihop med fosfor, som inte har förmågan att gasifieras (Starr, 2005), och andra ämnen.
3. Rötresten kan antingen återföras som näring till algodlingen eller spridas som gödningsmedel på åkermark eller energiodlingar, så länge den inte är förorenad.



Figur 11. Svarta pilar anger näringens väg genom kretsloppet inom det industriella ekosystemet. Gråa pilar visar hur näringen kan flöda utanför det industriella ekosystemet.

5.3 Industrierna i den kretsloppsanpassade alg-biogasprocessen

Här beskrivs hur varje industri inom den kretsloppsanpassade alg-biogasprocessen kan fungera med avseende på de aktuella ämnena kol, kväve och fosfor när *C. vulgaris* odlas som råvara för biogasframställning. Först tas algodlingen upp, sedan biogasanläggningen, uppgraderingsanläggningen, samhället och sist reningsverket. Energiflöden tas upp kort i slutet av kapitlet.

5.3.1 Algodlingen – tillförsel av avloppsvatten och rökgaser

Här diskuteras de resursflöden som leds in i algodlingen för att mikroalgerna ska få möjlighet till god tillväxt på hållbar väg. Utflödet av återvinningsbart avfall tas inte upp närmare men utgörs av eventuella restprodukter som går ut i avloppet och andra sorterade material som återvinns. Mikroalgernas förmåga att fotosyntetisera beskrivs inte närmare eftersom fokus ligger på de flöden som kan skapas mellan industrier.

Avloppsvatten från reningsverk

I denna studie har avloppsvatten huvudsakligen använts som exempel på näringskälla för mikroalgerna. Det innehåller bland annat kväve och fosfor och produceras i överflöd i våra samhällen. När avloppsvatten används som näringskälla blir miljön i en fotobioreaktor inte kontrollerad i samma grad som om rent vatten används och till exempel glukos tillförs som näring. I de undersökningar som studerats verkar detta inte ha orsakat några tillväxtproblem. Det finns dock en risk för tillväxt av exempelvis bakterier, varför detta potentiella problem bör uppmärksammas när avloppsvatten är aktuellt som näringskälla i en algodling (Scragg et al., 2002). Även turbiditeten (ett mått på vattens partikelinnehåll; grumlighet) i avloppsvattnet kan vara viktig, särskilt vid fotoautotrof tillväxt då turbiditeten kan avgöra hur mycket av det instrålade ljuset som når mikroalgerna (Wang et al., 2010) och därmed har inverkan på tillväxten.

Rökgaser från industrin

En algodling kan förses med koldioxid från en närliggande industri med rökgasutsläpp, i detta fall en uppgraderingsanläggning i form av en producent, eller ett kraftvärmeverk i form av en energiproducent. Tillförseln av koldioxid under mikroalgernas fotoautotrofa tillväxt leder till ökad produktion av biomassa samtidigt som det är ett sätt att på hållbar väg rena dessa rökgaser (Doucha et al., 2005; Travieso et al., 1993; Yun & Park, 1997).

I dagsläget är det vanligt att den avskilda koldioxiden från uppgraderingsprocessen släpps ut i atmosfären (B. Goffeng, personlig kommunikation, april 2010) vilket dock inte orsakar problem eftersom den har producerats från ett förnybart material och således inte bidrar till ökningen av växthusgaser. Ett alternativ är dock att leda denna koldioxid tillbaka till algodlingen för att öka tillväxten av mikroalger. Detta sätt att återanvända koldioxiden är, liksom mycket annat i algbiogasprocessen, ännu relativt utforskat men verkar ha potential att fungera väl (Avfall Sverige, 2009b; Doucha et al., 2005; Travieso et al., 1993; Yun & Park, 1997).

Rökgaser som tillförs en algodling består inte av bara koldioxid. I rökgaserna finns ofta både NO_x (kväveoxider) och SO_x (svaveloxider) såväl som andra gaser i låga halter. NO_x behöver enligt ett flertal undersökningar (Doucha et al., 2005; Hauck et al., 1996; Negoro et al., 1993) inte ha någon inverkan på tillväxten hos *Chlorella*. Dock har Hauck et. al (1996) visat att tillväxten hos *C. vulgaris* efter 20 h i SO₂-halter kring 200 ppm avstannar. Detta beror på att SO_x (och även No_x) har en pH-sänkande verkan vilket mikroalgerna reagerar negativt på. Detta kan således vara ett problem att ta hänsyn till i de fall rökgaserna innehåller höga halter SO_x.

5.3.2 Biogasanläggningen

Algbiomassan leds in i röt-kammaren där mikroorganismer bryter ner substansen och bildar biogas. En del av biogasen förs till uppgraderingsanläggningen och en del går till kraftvärmeproduktion. Biprodukten blir en rötrest som kan spridas som biogödsel om den inte är förorenad. På så vis förs näringsämnen tillbaka till marken och kan på nytt tas upp av växter som blir livsmedel som blir avfall och så vidare. Detta steg är grundläggande för en kretsloppsanpassad biogasproduktion.

5.3.3 Uppgraderingsanläggningen

När biogasen producerats i biogasanläggningen förs den till uppgraderingsanläggningen, där metangasen renas från bland annat koldioxid. Denna process beskrivs inte närmare men det kan till exempel vara i form av en vattenskrubber (koldioxid tas upp i vatten och återgår sedan till gasform medan vattnet cirkulerar tillbaka i systemet). Den koldioxid som skilts ut transporteras tillbaka till algodlingen och metangasen som finns kvar säljs som drivmedel.

I alla processer där substrat, rötrest eller gas hanteras kan kol läcka ut i atmosfären, till exempel som metangas i uppgraderingsprocessen. Alla läckor bör hållas så små som möjligt för att miljövinsten av biogas ska vara maximal (Börjesson & Berglund, 2003). För att algbiogasprocessen ska bli så hållbar som möjligt är det således viktigt att minimera riskerna för läckage, särskilt av metan som är en mycket potent växthusgas (ibid.).

5.3.4 Samhället

Samhället utgör, förutom solen, den motor som driver det industriella ekosystemet. Här konsumeras produkter och energi, och avfall bildas i processen. I denna studie utgörs samhället bara av den konsumerande industrin, till skillnad från i verkligheten där producenter, konsumenter och destruerare tillsammans utgör samhället. Genom att det avfall som samhället ger upphov till kan återanvändas eller återvinnas skapas nya råvaror som i sin tur kan användas inom produktionen, och denna idé kan förverkligas genom industriell symbios. Avloppsvatten är ett exempel på avfall som återvinns i den mening att det renas från näring och andra ämnen och sedan åter blir del i vattnets naturliga kretslopp.

5.3.5 Reningsverket

Av det avfall som produceras av samhället kommer en del via vatten till ett reningsverk som här fungerar som destruent. Vattnet renas i ett antal olika steg beroende på vilken typ av anläggning det gäller och kan sedan återföras till naturen. På vissa reningsverk finns steg i reningsprocessen

som är biologiska, där mikroorganismer renar vattnet från framförallt kväve och fosfor. Detta skulle istället delvis kunna göras genom att leda vattnet genom en mikroalgodling, så att den energi som mikroalgen producerar genom upptaget av näringsämnen kan tas tillvara. Avfallet från reningsverket, alltså avloppsslammet, kan med fördel rötas ihop med algbiomassan förutsatt att det inte innehåller för höga halter av föroreningar då rötresten ska kunna återföras som gödselmedel.

5.3.6 Energiflöden

Även energianvändningen i alg-biogasprocessen kan effektiviseras. Industrierna skulle kunna drivas med elektricitet från biogasen och värmas med överskottsvärmen (De Schamphelaire & Verstraete, 2009) och den biogas som inte behövs för elproduktion kan uppgraderas till fordonsgas. När biogas används både för kraftvärmeproduktion och framställning av drivmedel tas energin tillvara på ett ekologiskt effektivt sätt genom att den kretsloppsanpassade alg-biogasprocessen förses med miljömässigt hållbar värme och elektricitet, och fordonsgasen ersätter fossila bränslen. Dessutom behöver biogasen inte nödvändigtvis uppgraderas när den används för kraftvärmeproduktion (Ek, 2007) vilket skulle innebära en energibesparing. Värmeväxlare fyller en viktig funktion för att energin i den kretsloppsanpassade alg-biogasprocessen ska kunna användas effektivt genom att utgående substrat från både algodlingen och biogasanläggningen leds förbi ingående, kallare substrat, och på så vis möjliggör en värmeöverföring.

I många industrier används vatten för att kyla olika processer där värme frigörs. Denna spillvärme är ofta en outnyttjad resurs (Wik, 2010) och möjligheten att återanvända restvärme från industrin är relativt outforskad (Chae et al., 2009). Det är dock intressant ur hållbarhetsperspektiv att skapa ett användningsområde för en annars bortslösad restprodukt, och en algodling har potential utgöra en lämplig mottagare för sådan spillvärme.

6. Sammanfattande reflektioner och slutsatser

6.1 Diskussion kring forskningsfrågorna

Det huvudsakliga syftet med studien har varit att utreda om det är möjligt att framställa ett miljömässigt hållbart biobränsle med hjälp av mikroalgen *C. vulgaris*. Genom att studera *C. vulgaris* egenskaper och applicera dem i alg-biogasprocessen, och sedan undersöka hur denna process kan kretsloppsanpassas genom industriell symbios, har frågan besvarats. De slutsatser som kan dras baserat på analysen av alg-biogasprocessen kommer här att diskuteras i förhållande till problemställningen och de forskningsfrågor som studien utgår ifrån.

6.1.1 Hur ser *C. vulgaris* upptag av näringsämnen ut?

C. vulgaris är en mikroalg med goda egenskaper för upptag av kol, kväve och fosfor. Effektiviteten i detta upptag beror på de omständigheter under vilka mikroalgen odlas, i vilka koncentrationer ämnena finns samt på vilket sätt mikroalgerna exponeras för dem. Ur ett näringsstrategiskt perspektiv är *C. vulgaris* möjlighet att växa mixotroft en viktig egenskap som gör att den har potential att bilda stora mängder biomassa genom fotosyntetisering och heterotrofi. Näringsstrategin tillåter ett högre upptag av fosfor än vid heterotrof tillväxt. Kväveupptaget har inte konstaterats vara högre eller lägre för mixotrofa mikroalger. Mixotrofer som *C. vulgaris* producerar främst biomassa med lägre lipidinnehåll per cell men med högre total lipidproduktion och större mängd biomassa, vilket är önskvärt vid biogasframställning. En ökad produktivitet medför större behov av näringsämnen varför det totala näringsupptaget blir större än vid fotoautotrof eller heterotrof tillväxt.

Mixotrofin hos *C. vulgaris* innebär både minskade problem med självsuggning, som annars kan vara en tillväxtbegränsande faktor, och att artificiella ljuskällor kan uteslutas delvis eller helt vilket är en investerings- och energibesparing. När tillgången på ljus är begränsad eller obefintlig skulle *C. vulgaris* kunna ta upp kol ur organiskt material i avloppsvattnet (under heterotrof tillväxt) som gör att den kan fortsätta sin tillväxt även i mörker, till skillnad från mikroalger som är enbart fotoautotrofa som då normalt respirerar (omvänd fotosyntes) och inte tillväxer. Det är dock troligt att ytterligare kolkällor måste tillföras för att tillväxten ska kunna fortgå effektivt. I enlighet med det kretsloppsperspektiv som eftersträvas skulle denna kolkälla eventuellt kunna utgöras av de fotosyntetiserande mikroalgerna i odlingen genom att rötade mikroalger i form av rötresten förs tillbaka till algodlingen. Under den heterotrofa tillväxten tar mikroalgerna inte upp koldioxid, vilket

gör tillförseln av koldioxid aktuell endast när mikroalgerna har tillgång till ljus och kan fotosyntetisera.

6.1.2 Är *C. vulgaris* lämplig som råvara för biogasproduktion?

I kapitel 4.3 lades grunden för slutsatser gällande *C. vulgaris* lämplighet som råvara för biogasproduktion. Här kommer frågan att diskuteras baserat på den informationen. Frågan ställs ur ett hållbarhetsperspektiv, vilket innebär att den utreds i förhållande till ekologisk effektivitet: om mikroalger kan odlas på ett sätt som innebär att ekologiska resurser och energi används effektivt kan de ha god potential att utgöra en bra råvara för en hållbar biogasframställning.

C. vulgaris har flera egenskaper som gör den lämplig för rötning till biogas. Metanutbytet är till exempel jämförbart med det för vall eller betblast, med skillnaden att mikroalger inte tar lika mycket yta i anspråk och har högre produktivitet. Detta gör att energiproduktionen per hektar kan öka flerfaldigt vid odling av mikroalger istället för traditionella energigrödor. De ytor som krävs för algodling behöver inte vara av någon särskild kvalitet och konkurrerar därför inte med livsmedelsproduktionen.

I den kretsloppsanpassade alg-biogasprocessen försörjer biogasen det industriella ekosystemet med elektricitet och värme, vilket innebär att energikällan är lokal och hållbar. Eftersom denna studie inte tar hänsyn till kvantiteter diskuteras exempelvis inte hur stor del av anläggningen som kan värmas med restvärme från elproduktion, utan det konstateras bara att så kan ske i viss utsträckning. Mikroalger kan minska problemen med övergödning både genom ett effektivt näringsupptag under tillväxten och genom att rötresten kan bli biogödsel som tas upp effektivare av grödor än handelsgödsel, vilket minskar näringsläckaget.

Hänsyn måste dock tas till den stora insats av energi och material som krävs vid framställningen av en fotobioreaktor vilket kan förändra miljövinsten beroende på beräknad livslängd och underhållsbehov. Förutsatt att det sker en teknikutveckling som tillåter odling till lägre kostnad, och således gör implementeringen av en alg-biogasprocess realistisk, har mikroalger som *C. vulgaris* förutsättningen att utgöra en råvara för en kretsloppsanpassad produktion av biogas. Det ökande intresset för biogas skulle kunna innebära att de råvaror som vanligen används för biogasproduktion i framtiden inte räcker till. Då kan mikroalger vara ytterligare ett sätt att skapa energi på hållbar väg och samtidigt ta tillvara outnyttjade resurser som avloppsvatten och rökgaser - detta gör mikroalgen unik som råvara för en ekologiskt effektiv och hållbar biogasproduktion.

6.1.3 Kan alg-biogasprocessen bli ekologiskt hållbar genom kretsloppsanpassning?

När resursflödena i alg-biogasprocessen identifierats kan industrierna i den

kretsloppsanpassade alg-biogasprocessen länkas samman genom industriell symbios. Processen utvidgas till att också omfatta ett reningsverk, ett kraftvärmeverk och ett samhälle för att flödena ska kunna kretsloppsanpassas med hjälp av den valda analysmodellen. Genom identifiering av producenter, konsumenter och destruerer har en enkel modell av processernas flöden skapats, som synliggjorts i Figur 8 och Figur 9. I en jämförelse av figurerna syns att vissa av flödena i den kretsloppsanpassade alg-biogasprocessen förekommer i det naturliga ekosystemet såväl som i det industriella, vilket normalt inte är fallet i industriella ekosystem. Detta beror på att flera av processerna i alg-biogasprocessen är biologiska. Genom uppdelningen i kategorierna producenter, konsumenter och destruerer kan det konstateras att det industriella ekosystemet imiterar det naturliga avseende flödenas kretslopp genom återanvändning och återvinning. Det finns också skillnader mellan figurerna, till exempel energikällorna, materialflödena och producenternas metabolism.

Det är dock inte bara själva processerna som avgör om ett system kan kretsloppsanpassas. I detta fallet är även *C. vulgaris* egenskaper viktiga då till exempel mixotrofi skapar förutsättningar för återanvändning av resurser. Avloppsvatten och rökgaser tillfredsställer stora delar av mikroalgernas behov istället för att industriellt producerade näringsämnen används. När det gäller återföring av rökgaser till en algodling kan det tyckas vara överflödigt eftersom det i slutändan inte spelar någon roll om koldioxiden tas upp av odlade mikroalger eller av andra växter någon annanstans. Det finns dock några skillnader: en är att mikroalger har ett effektivare upptag av koldioxid än landlevande växter, och om koldioxid kan tas upp av mikroalger kan alltså mer kol bindas som organiskt material och således minska mängden i atmosfären. En annan skillnad är att produktiviteten i fotobioreaktorn ökar om halten koldioxid som tillförs är något högre än den i vanlig luft. När biogasen sedan ersätter fossila bränslen återförs kolet till atmosfären, men det är då kol som ingår i det kortsiktiga kretsloppet och som inte ökar koldioxidhalten i atmosfären.

När symbiotiska relationer upprättas mellan industrierna i alg-biogasprocessen kan en miljömässigt hållbar energiproduktion skapas. Biogasframställningen är i sig redan ett miljömässigt bra energialternativ och genom användningen av *C. vulgaris* som råvara kan ytterligare symbiotiska relationer skapas för att öka hållbarheten i produktionen. Ekologisk effektivitet kan uppnås i och med att många resurser utnyttjas i sin helhet genom återanvändning och återvinning, med så lite avfall som möjligt, och detta verkar vara möjligt att uppnå i alg-biogasprocessen.

Återföring av rötresten som näring i jordbruket en mycket viktig del i en kretsloppsanpassad alg-biogasprocess. Om mikroalger tar upp tungmetaller som kadmium ur sin omgivning orsakar problem då rötresten ska återföras till jordbruket eller eventuellt algodlingen. Om halterna av föroreningar blir för höga i rötresten bör det undersökas hur föroreningarna i avloppsvattnet som

leds in i algodlingen kan minskas för att rötresten ska bli lämplig som gödselmedel. Därigenom omvandlas en restprodukt till en eftertraktad vara med ett marknadsmässigt värde som bidrar både till den ekonomiska och den ekologiska effektiviteten. Biogas baserad på mikroalger har potentialen att omsätta solenergi till användbar energi och utgör ett spännande exempel på hur industriell symbios kan skapa en ekologiskt hållbar energiproduktion där resursflödena sluts i kretslopp.

6.2 Vikten av strategisk lokalisering

Om flödena av kol och näring i alg-biogasprocessen ska kunna kretsloppsanpassas på ett så effektivt sätt som möjligt bör algodlingen anläggas i närheten av industrier vars produktion medför restprodukter som koldioxidrika rökgaser och till exempel ett reningsverk som bidrar med näringsrikt vatten. Alternativt skulle näringen kunna ledas till algodlingen i form av lakvatten från en deponi eller dagvatten från ett samhälle, och rökgaserna komma från andra industrier än den föreslagna. Det är också av vikt att biogas- och uppgraderingsanläggningarna ligger nära algodlingen för att logistikbehovet ska minimeras. Ett förslag på lämplig lokalisering kan vara ett större avloppsreningsverk, där det kan finnas redan befintliga system för exempelvis biogasframställning. Strategisk lokalisering med tanke på de flöden som alg-biogasprocessen är del av är en förutsättning för att energiproduktionen ska kunna kretsloppsanpassas genom upprättandet av symbiotiska relationer mellan industrier.

6.3 Slutsatser

Möjligheten att framställa ett miljömässigt hållbart biobränsle med hjälp av *C. vulgaris* som råvara i en kretsloppsanpassad biogasframställning har utretts. *C. vulgaris* påvisar, åtminstone på ett teoretiskt plan, goda förutsättningar för kretsloppsanpassad odling och produktion av biogas. Mikroalgen har också potential att möjliggöra unika relationer mellan olika industrier i strävan efter att skapa en kretsloppsanpassad och ekologiskt hållbar energiproduktion. Slutsatserna från studien kan sammanfattas som följer:

- Mikroalgen *C. vulgaris* kan lämpa sig för intensiv odling i slutna fotobioreaktorer som tillförs näring i form av avloppsvatten och rökgaser.
- Mixotrofi hos en mikroalg kan vara en avgörande egenskap för en ekologiskt effektiv alg-biogasprocess.
- *C. vulgaris* har goda förutsättningar att brytas ner anaerobt för produktion av biogas och har god metanpotential.

- En algodling har goda förutsättningar att länkas samman med andra industrier genom dess resursflöden.
- För en hållbar alg-biogasprocess ska en algodling lokaliseras strategiskt med tanke på flöden av näringsämnen och andra resurser.

6.4 Vidare forskning och utveckling

Hela alg-biogasprocessen utgörs av mer eller mindre nya forskningsområden. Behovet av ytterligare forskning är särskilt stort när det gäller odlingen av mikroalger, som måste utvecklas teknologiskt och därmed kostnadsmissigt för att mikroalgbaserad biogas ska kunna konkurrera med andra typer av energiproduktion. Det största hindret för energiproduktion av mikroalger idag verkar vara brist på kunskap och erfarenhet. Här följer exempel på områden som bör studeras närmare för att mikroalger ska kunna bli en attraktivare råvara för en hållbar energiproduktion.

- Information om olika mikroalger och deras egenskaper behöver sammanställas för att en alg med optimala egenskaper för odlingsförutsättningar och syfte ska kunna identifieras
- Framtagning av kostnads- och högeffektiva fotobioreaktorer som fungerar i praktiken
- Utredning av mikroalgens upptag av föroreningar från till exempel avloppsvatten
- Rötrestens lämplighet som biogödsel när mikroalger livnärt sig på avloppsvatten och rötats
- Omfattande analys av de flöden som existerar i alg-biogasprocessen, kanske genom en materialflödesanalys eller en LCA

I praktiken kvarstår en mängd frågor som måste besvaras innan det blir möjligt att skapa en ekologiskt och ekonomiskt effektiv energiproduktion baserad på mikroalger. Den kretsloppsanpassade alg-biogasprocessen utgör dock ett innovativt sätt att arbeta för minskade utsläpp av växthusgaser och mindre övergödning, och samtidigt öka produktionen av bioenergi utan att ta värdefull jordbruksmark i anspråk. Här finns potential att framställa energi och i processen bidra till att vi får en renare och mer välmående miljö att leva i.

Referenser

- Afi, L., Metzger, P., Largeau, C., Connan, J., Berkaloff, C. & Rousseau, B. (1996). Bacterial degradation of green microalgae: incubation of *Chlorella emersonii* and *Chlorella vulgaris* with *Pseudomonas oleovorans* and *Flavobacterium aquatile*. *Organic Geochemistry*, vol 25, 1-2:117-130.
- Agrawal, M. (2007). Growth, Survival and Reproduction in *Chlorella vulgaris* and *C. variegata* with Respect to Culture Age and under Different Chemical Factors. *Folia Microbiology*, 52, 4:399–406.
- Avfall Sverige. (2009a). *Mikrobiologisk handbok för biogasanläggningar*. Rapport U2009:03.
- Avfall Sverige. (2009b). *Rening av lakvatten, avloppsvatten och reduktion av koldioxid med hjälp av alger*. Rapport U2009:04.
- Baky, A., Nordberg, Å., Palm, O., Rodhe, L. & Salomon, E. (2006). *Rötrest från biogasanläggningar – användning i lantbruket*. (JTI Informerar, nr 115). Uppsala: Institutet för Jordbruks- och Miljöteknik.
- van Beilen, J. B. (2010). Why microalgal biofuels won't save the internal combustion machine. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 4, 1:41-52
- Berglund, M. & Börjesson, P. (2003). *Energianalys av biogassystem*. Rapport nr 44. Lund: Lunds Tekniska Högskola, Institutionen för teknik och samhälle.
- Berg-Nielsen, J. (2006). *Production of Micro algae based products*. Algetech Produkter AS. Hämtad den 6 maj 2010 från <http://www.nordicinnovation.net/>
- Bioenergiportalen. (2010a). Utgivare JTI – Institutet för jordbruks- och miljöteknik. Hämtad den 16 maj 2010 från <http://www.bioenergiportalen.se>
- Bioenergiportalen. (2010b). *Biogasutbyte*. Utgivare JTI – Institutet för jordbruks- och miljöteknik. Hämtad den 16 maj 2010 från <http://www.bioenergiportalen.se/?p=1579>
- Björndahl, G., Borg, J. & Thyberg, M. (2005). *Miljökunskap*. Stockholm: Liber.
- Brennan, L. & Owende, P. (2010). Biofuels from microalgae – A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 2:557–577.
- Brown, M. R., Jeffrey, S. W., Volkman, J. K. & Dunstan, G. A. (1997). Nutritional properties of microalgae for mariculture. *Aquaculture*, 151:315–31.
- Brune, D. E. (2009). *Algal Production and Harvest for Food, Feed and Biofuels*. Algae-to-Energy in the South. Morning Plenary Speech, August 26, 2009. Hämtad den 10 maj 2010 från <http://www.stlrcga.org/Documents/ce2/Brune%20Algae-to-Energy.pdf>

- Burrell, R. E., Inniss, W. E. & Mayfield, C. I. (1984a). Development of an optimal heterotrophic growth medium for *Chlorella vulgaris*. *Appl Microbiol Biotechnol*, **20**:281-283.
- Burrell, R. E., Mayfield, C. I. & Inniss, W. E. (1985). A carbon budget for heterotrophically grown *Ankistrodesmus braunii* and *Chlorella vulgaris*. *MIRCEN Journal*, **1**:247-256.
- Burrell, R. E., Mayfield, C. I. & Inniss, W. E. (1984b). Biomass Production from the Green Algae *Chlorella vulgaris* and *Ankistrodesmus braunii* Cultured Heterotrophically. *Biology Letters*, **6**, **8**:507-510.
- Börjesson, P. & Berglund, M. (2003). *Miljöanalys av biogassystem*. (Rapport nr 45). Lund: Lunds Tekniska Högskola, Institutionen för teknik och samhälle.
- Carlsson, M. & Uldal, M. (2009). *Substrathandbok för biogasproduktion*. Rapport SGC 200, Svenskt Gasteknisk Center AB.
- Carr, H. P., Cariño, F. A., Yang, M. S. & Wong, M. H. (1998). Characterization of the Cadmium-Binding Capacity of *Chlorella vulgaris*. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, **60**:433-440.
- Carvalho, W. (2007). *Alger som är både växter och djur*. I Pressmeddelande från Högskolan i Kalmar, 2007-06-11. Hämtat den 19 april 2010 från <http://www.forskning.se/>
- Chae, S. H., Kim, S. H., Yoon, S-G. & Park, S. (2009). Optimization of a waste heat utilization network in an eco-industrial park. *Applied Energy*, **87**, **6**:1978-1988.
- Chinnasamy, S., Ramakrishnan, B., Bhatnagar, A. & Das, K. (2009). Biomass Production Potential of a Wastewater Alga *Chlorella vulgaris* ARC 1 under Elevated Levels of CO₂ and Temperature. *International Journal of Molecular Sciences*, **10**:518-532.
- Clarens, A., Resurreccion, E. P., White, M. A. & Colosi, L. M. (2010). Environmental Life Cycle Comparison of Algae to Other Bioenergy Feedstocks. *Environmental Science Technology*, **44**, **5**:1813–1819.
- Converti, A., Casazza, A., Ortiz, E., Perego, P. & Del Borghi, M. (2009). Effect of temperature and nitrogen concentration on the growth and lipid content of *Nannochloropsis oculata* and *Chlorella vulgaris* for biodiesel production. *Chemical Eng. and Processing*, **48**:1146–1151.
- Côté, R., Tansey, J. & Dale, A. (2005). *Linking Industry and Ecology: A Question of Design*. Vancouver, BC, Canada: University of British Columbia Press.
- De Schamphelaire, L. & Verstraete, W. (2009). Revival of the Biological Sunlight-to-Biogas Energy Conversion System. *Biotechnology and Bioengineering*, **103**, **2**:296-304.
- Doucha, J., Straka, F. & Livansky, K. (2005). Utilization of flue gas for cultivation of microalgae (*Chlorella* sp.) in an outdoor open thin-layer photobioreactor. *Journal of Applied Phycology*, **17**: 403–412.
- Ehrenfeld, J. & Gertler, N. (1997). Industrial Ecology in Practice. The Evolution of Interdependence at Kalundborg. *Journal of Industrial Ecology*, **1**, **1**:67-79.

- Ek, F. (2007). *Produktion av biogas på gården*. ProAgria Svenska lantbrukssällskapens förbund, Helsingfors. Vasa: Fram Ab.
- Elser, J. J., Fagan, W. F., Denno, R. F., Dobberfuhl, D. R., Folarin, A., Huberty, A., et al. (2000). Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs. *Nature*, 408:578–80.
- Fagerberg, T. (2009). "Algen: Återkomsten" – biodiesel från alger? Marinebiology.se. Hämtad den 5 april 2010 från www.marinebiology.se/includes/pages/artiklar_080109_biodiesel_alger.php
- Feuk, M. (maj, 2007). Mikroalger bas för ny industri. *Ny Teknik*. Hämtad den 7 april 2010 från http://www.nyteknik.se/nyheter/energi_miljo/energi/article43982.ece
- Fredin, M. (2009). *Alger som energikälla – en svensk möjlighet?* (examensarbete i Kemiteknik, Högskolan i Jönköping).
- Frosch, R. A. & Gallopolous, N. E. (1989). Strategies for manufacturing. *Scientific American*, 261, 3:144–152.
- Garner, A. & Keoleian, G. A. (1995). *Industrial Ecology: An Introduction*. An Arbor, USA: University of Michigan, National Pollution Prevention Center for Higher Education.
- Golueke, C. G., Oswald W. J. & Gotaas H. B. (1957). Anaerobic digestion of algae. *Applied Microbiology*, 5:47–55.
- Golueke, C. G.; Oswald, W.J. (1959). Biological Conversion of light energy to the chemical energy of methane. *App. Microbiol.* 7:219-241.
- Golueke, C. G. & Oswald W. J.(1962). The Mass Culture of *Porphyridium cruentum*. *Appl Environ Microbiol.* 10, 2:102-107.
- González, L. E., Cañizares, R. O., Baena, S. (1997). Efficiency of ammonia and phosphorus removal from a Colombian agroindustrial wastewater by the microalgae *Chlorella vulgaris* and *Scenedesmus dimorphus*. *Bioresource Technology*, 60, 259-262.
- Gouveia, L. & Oliveira, A. C. (2009). Microalgae as a raw material for biofuels production. *Microbiol Biotechnol*, 36:269–274.
- Hauck, J. T., Olson, G.J., Scierka, S. J., Perry, M. B. & Ataii, M. M. (1996). Effects of simulated flue gas on growth of microalgae. I 212th ACS National Meeting, 41, 4:25–30, Aug., Orlando, FL, pp. 1391–1396.
- Harper, E. M. & Graedel, T. E. (2004). Industrial Ecology: A Teenager's Progress. *Technology in Society*. 26:433-445.
- Houghton, J. (2009). *Global Warming the Complete Briefing*. New York: Cambridge University Press.
- Huynh, E. (2005). *Kadmiumexponering och människans hälsa*. Lund: Lunds Universitet, Ekologiska institutionen.
-

- Jeanfils, J., Canisius, M-F. & Burlion, N. (1993). Effect of high nitrate concentrations on growth and nitrate uptake by free-living and immobilized *Chlorella vulgaris* cells. *Journal of Applied Phycology*, **5**:369-374.
- Jelinski, L. W., Graedel, T. E., Laudise, R. A., McCall, D. W. & Patel, C. K. N. (1992). Industrial ecology: Concepts and approaches. *Proc. National Academy of Sciences USA*, **89**, 793-797.
- Kapdan, I. K. & Aslan, S. (2008). Application of the Stover–Kincannon kinetic model to nitrogen removal by *Chlorella vulgaris* in a continuously operated immobilized photobioreactor system. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, **83**:998–1005.
- Kirchmann, H. (1988). Några principiella skillnader mellan aerob och anaerob nedbrytning av stallgödsel under lagring. (Växteko, nr 3). Uppsala: Sveriges Lantbruksuniversitet.
- Lantz, M. (2004). *Gårdsbaserad produktion av biogas för kraftvärme – ekonomi och teknik*. Examensarbete, Lunds Universitet, Institutionen för teknik och samhälle.
- Lantz, M., Ekman, A. & Börjesson, P. (2009). *Systemoptimerad produktion av fordonsgas. En miljö- och energisystemanalys av Söderåsens biogasanläggning*. (Rapport nr 69). Lund: Lunds Tekniska Högskola, Institutionen för teknik och samhälle.
- Lardon, L., Helias, A., Sialve, B., Steyer, J.-P. & Bernard, O. (2009). Life-Cycle Assessment of Biodiesel Production from Microalgae. *Env Science & Techn*, vol 43, **17**:6475-6481.
- Lee, J.-N., Lee, J.-S., Shin, C.-S., Park, S.-C. & Kim, S.-W. (2000). Methods to Enhance Tolerances of *Chlorella* KR-1 to Toxic Compounds in Flue Gas. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, **84–86**:329-342.
- Liang, Y., Sarkany, N. & Cui, Y. (2009). Biomass and lipid productivities of *Chlorella vulgaris* under autotrophic, heterotrophic and mixotrophic growth conditions. *Biotechnol Letters*, **31**:1043–1049.
- Liwarska-Bizukojc, E., Bizukojc, M., Marcinkowski, A. & Doniec, A. (2009). The conceptual model of an eco-industrial park based upon ecological relationships. *Journal of Cleaner Production*, **17**, **8**:732-741.
- Mata, T., Martins, A. & Caetano, N. (2010). Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**, **1**:217-232.
- Megharaj, M., Pearson, H. W. & Venkateswarlut, K. (1992). Removal of nitrogen and phosphorus by immobilized cells of *Chlorella vulgaris* and *Scenedesmus bijugatus* isolated from soil. *Enzyme Microb. Technol.*, **14**:656-658.
- de Morais, M. G. & Costa J. A. V. (2007). Carbon dioxide fixation by *Chlorella kessleri*, *C. vulgaris*, *Scenedesmus obliquus* and *Spirulina sp.* cultivated in flasks and vertical tubular photobioreactors. *Biotechnology Letters*, **29**:1349–1352.
- Moreno-Garrido, I. (2008). Microalgae immobilization: Current techniques and uses. *Bioresource*
-

Technology, 99, 10:3949-3964.

- Naturvårdsverket. (2009). Producentansvar. Hämtad den 26 maj 2010 från <http://www.swedishepa.se/sv/Produkter-och-avfall/Avfall/Producentansvar/>
- Negoro, M., Hamasaki, A., Ikuta, Y., Makita, T., Hirayama, K. & Suzuki, S. (1993). Carbon dioxide fixation by microalgae photosynthesis using actual flue gas discharged from a boiler. *Appl. Biochem. Biotechnol.*, **39–40**:643–653.
- de la Noue, J. & de Pauw, N. (1988). The potential of microalgal biotechnology: A review of production and uses of microalgae. *Biotechnology Advances*, 6, 4:725-770.
- Orus, M. I., Marco, E. & Martinez, F. (1991). Suitability of *Chlorella vulgaris* UAM 101 for heterotrophic biomass production. *Bioresource Technology*, 38, 2-3:179-184.
- Paulsson, J. (2009). *Hållbarhetskriterier*. Stockholm: Energimyndigheten.
- Prop. 2009/10:100*. 2010 års ekonomiska vårproposition. Stockholm: Finansdepartementet.
- Qu, C.-B., Wu, Z.-Y. & Shi, X.-M. (2006). Phosphate assimilation by *Chlorella* and adjustment of phosphate concentration in basal medium for its cultivation. *Biotechnol Lett*, **30**:1735–1740.
- Rachlin, J. & Grosso, A. (1991). The Effects of pH on the Growth of *Chlorella vulgaris* and Its Interactions with Cadmium Toxicity. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.*, 20, 505-508.
- Raven, P. H., Evert, R. F. & Eichhorn, S. E. (1999). *Biology of Plants* (6th ed.). New York: W. H. Freeman and Company/Worth Publishers.
- Samson, R. & LeDuy, A. (1983). Improved performance of anaerobic digestion of *Spirulina maxima* algal biomass by addition of carbon-rich wastes. *Biotechnology Letters*, 5, **10**:677-682.
- Satyanarayana, K. G., Mariano, A. B. & Vargas, J. V. C. (mars, 2010). A review on microalgae, a versatile source for sustainable energy and materials. *International Journal of Energy Research*. Early View, Internetpublicering i Wiley InterScience. (www.interscience.wiley.com).
- Scragg, A. H., Illman, A. M., Carden A. & Shales, S. W. (2002). Growth of microalgae with increased calorific values in a tubular bioreactor. *Biomass and Bioenergy*, 23, 1:67-73.
- Sheenan, J., Dunahay, T., Benemann, J. & Roessler, P. (1998). *A Look Back at the U.S. Department of Energy's Aquatic Species Program: Biodiesel from Algae, Closeout Report*. National Renewable Energy Laboratory, U.S. Department of Energy. Hämtad den 5 april 2010 från www.nrel.gov/docs/legosti/fy98/24190.pdf
- Sialve, B., Bernet, N. & Bernard, O. (2009). Anaerobic digestion of microalgae as a necessary step to make microalgal biodiesel sustainable. *Biotechnology Advances*, **27**:409–416.
- Smith, R. S. (1998). *Profit Centers in Industrial Ecology: The Business Executive's Approach to the*
-

Environment. Westport, CT, USA: Greenwood Publishing Group, Inc.

Smith, R. L. & Smith, T. M. (2003). *Elements of Ecology*. San Francisco, USA: Benjamin Cummings.

SOU 2007:36. Bioenergi från jordbruket – en växande resurs. Stockholm: Jordbruksdepartementet.

Starr, C. (2005). *Biology today and tomorrow*. Belmont, USA: Thomson Learning Inc.

Swedish Standards Institute. (2008). *Ekoeffektivitet*. ISO 14045. Stockholm.

Tam, N. F. Y. & Wong, Y. S. (1989). Wastewater nutrient removal by *Chlorella pyrenoidosa* and *Scenedesmus sp.* *Environmental Pollution*, 58, 1:19-34.

Travieso, L., Sánchez, E. P., Benitez, F., Conde, J. L. (1993). *Arthrospira sp.* intensive cultures for food and biogas purification. *Biotechnol. Lett.*, 15:1091–1094.

Vergara-Fernández, A., Vargas, G., Alarcon, N. & Velasco, A. (2008). Evaluation of marine algae as a source of biogas in a two-stage anaerobic reactor system. *Biomass and Bioenergy*, 32:338-344.

Världskommissionen för miljö och utveckling. (1987). *Our Common Future*. Oxford: Oxford University Press.

Wang, L., Li, Y., Chen, P., Min, M., Chen, Y., Zhu, J. & Ruan, R. R. (2010). Anaerobic digested dairy manure as a nutrient supplement for cultivation of oil-rich green microalgae *Chlorella sp.* *Bioresource Technology*, 101, 8:2623-2628.

Wik, C. (2010). Spillvärme skulle kunna värma 1,5 miljoner villor. *Miljö och Hälsa*, nr 1.

Yen, H. W. & Brune, D. E. (2007). Anaerobic co-digestion of algal sludge and waste paper to produce methane. *Bioresour Technol*, 98:130–134.

Yue, L. & Chen, W. (2005). Isolation and determination of cultural characteristics of a new highly CO₂ tolerant fresh water microalgae. *Energy Conversion and Management*, 46:1868–1876.

Yun, Y.-S. & Park, J. M. (1997). Development of gas recycling photobioreactor system for microalgal carbon dioxide fixation. *Korean Journal of Chem. Eng.*, 14, 4:297-300.

Yun, Y.-S., Park, J. M. & Yang, J.-W. (1996). Enhancement of CO₂ tolerance of *Chlorella vulgaris* by gradual increase of CO₂ concentration. *Biotechnology Techniques*, 10, 9:713-716.

Bilaga 1.

Näringsämnenas kretslopp i ekosystemen

Sammanfattade ur Starr (2005) och Smith & Smith (2003)

Kolets kretslopp

Stora kolreservoarer utgörs av havet, biota (levande flora och fauna) och av atmosfären. I luften är ca 380 ppm koldioxid (innan industrialiseringen var mängden ca 300 ppm) (Houghton, 2008). Kol existerar i både organisk och oorganisk form, till exempel som kolhydrat respektive koldioxid. Genom fotosyntes fixerar växter koldioxid från atmosfären och hydrosfären, och på så vis förs kolet in i de levande komponenterna av ekosystemet. När växterna sedan dör återförs kol till atmosfären genom bakteriell nedbrytning, alternativt när organiskt material förbränns (vid exv. skogsbränder). Kolet blir då åter tillgängligt i form av koldioxid (vid aerob nedbrytning) eller metan (vid anaerob nedbrytning).

Kvävets kretslopp

I levande organismer utgör kväve en essentiell del i bland annat protein som är en viktig byggsten i all levande vävnad. Kväve kan tas upp av växter i form av ammonium (NH_4^+) och nitrat (NO_3^-) och alltså inte i den form det befinner sig i atmosfären (N_2) (vilket dock är möjligt för cyanobakterier). Kvävet blir tillgängligt genom olika förändringsprocesser, till exempel när bakterier bryter ner organiskt material och bildar NH_3 som snabbt ombildas till NH_4^+ och kan tas upp av växterna. Ammoniumkväve, vilket är den mest lättillgängliga formen för växter, kan också bildas genom nitrifikation då kvävet i två steg omvandlas från NH_4^+ till NO_3^- . Genom anaerob denitrifikation kan kvävet återföras till atmosfären.

Kväve, oftast i form av nitrat, kan lämna landekosystemen när det läcker ut via grundvatten och åar och vidare ut i havet, ofta på grund av att åkrar gödslas på ett för grödorna ineffektivt sätt, eller när det följer med regnvatten. Havsvattnet kan bli eutrofierat – övergött – vid för stor kvävetillförsel, vilket har en negativ inverkan på de organismer som lever där. Kvävet kan sedan stanna i havet i intern cirkulation eller frigöras till atmosfären i form av kväve eller dikväveoxid. Det har då gått från atmosfär till biosfär till geosfär till hydrosfär och sedan tillbaka till atmosfären – cykeln har slutits. Detta kretslopp utgör en komplex process, och det finns ytterligare sätt på vilka kväve kan ta sig runt i kretsloppet som inte redovisas här.

Fosfors kretslopp

Fosfor har en mängd funktioner i organismer och är bland annat nödvändigt för cellers energiomsättning och för bildandet av kolhydrater, och ingår som byggsten i arvs massa och enzymer. Fosforförrådet finns bundet i marken och frigörs för upptag i växter vid vittring av mineral eller vid brytning i gruvor för konstgödseltillverkning, och existerar i oorganisk form som fosfat eller bundet i organiskt material. Fosfors kretslopp skiljer sig från resterande bland annat genom att det aldrig återfinns i gasformiga föreningar, och alltså inte finns i atmosfären. När organismer bryts ner återförs fosfor till marken och lakas ut till sjöar och hav. Där sedimenteras den och bildar nya bergarter i en mycket långsam process.

Bilaga 2

Uträkning av biogasutbyte i kapitel 4.3.1

Uträkningen baseras på ett utbyte på $0,5 \text{ m}^3$ biogas kg^{-1} VS algbiomassa och en metanhalt på 65 % (enligt De Schamphelaire & Verstraete, 2009). Produktiviteten har baserats på autotrof tillväxt och har tagits fram genom att beräkna belyst yta i fotobioreaktorn och överföra denna som årlig produktion per hektar. Odling som tillförts koldioxid och har en tillväxt på $6,7 \text{ g VS m}^{-2} \text{ dygn}^{-1}$ ger $24 \text{ ton VS ha}^{-1} \text{ år}^{-1}$ (kvantiteter på upp till $65 \text{ ton VS ha}^{-1} \text{ år}^{-1}$ har uppnåtts), och 1 m^3 biogas med 97 % metanhalt ger ca 10 kWh. Algodlingen i exemplet skulle alltså ge upphov till en energiproduktion på 78 MWh per hektar och år ($24 \text{ ton VS ha}^{-1} \text{ år}^{-1} * 500 \text{ m}^3 \text{ ton}^{-1} \text{ VS} * 0,65 \text{ CH}_4$).