



**Självständigt arbete (examensarbete), 15 hp, för  
Kandidatexamen i miljöteknik med inriktning mot integrerad  
resursanvändning  
VT 2018**

**Potential för användning av  
restströmmar på ett mustereri**  
Energibalans och klimatpåverkan vid  
produktion av etanol respektive biodiesel

**Malin Mattsson**

Fakulteten för naturvetenskap

**Högskolan Kristianstad | [www.hkr.se](http://www.hkr.se)**



**Författare**

Malin Mattsson

**Svensk titel**

Potential för användning av restströmmar på ett musteri. Energibalans och klimatpåverkan vid produktion av etanol respektive biodiesel.

**Engelsk titel**

Potential for use of residues on an apple-juice factory. Energy balance and climate effect by ethanol or biodiesel production.

**Handledare**

Stina Andrén, Kvalitets- och miljöchef, Kiviks Musteri AB

Lena B.-M. Vought, Biträdande professor i akvatisk ekoteknik, Högskolan Kristianstad

**Examinator**

Lennart Mårtensson, Professor i miljöteknik, Högskolan Kristianstad

**Sammanfattning**

Ett svenskt musteri eftersträvar att öka potentialen för användning av företagets renings slam. Musteriets övriga restströmmar är äppelrester och koncentrat. Syftet med studien är att undersöka energibalans och klimatnytta vid etanol- respektive biodieselproduktion av musteriets restströmmar. Även utbytet av biobränsle samt behov av tillsatser analyseras. Biodiesel produceras i studien av lipider från oljebildande jästsvampar. Studien baseras på litteratur samt personliga informanter. Resultatet visar att 87,5 kubikmeter motsvarande 1 859 gigajoule etanol alternativt 7,4 kubikmeter motsvarande 243 gigajoule biodiesel kan produceras. Nettoenergibalansen med biogasproduktion av restprodukter inräknad blir 1 454 gigajoule vid etanolproduktion och 734 gigajoule vid biodieselproduktion. Biogasproduktion av restprodukter ger störst bidrag till nettoenergiutbytet vid biodieselproduktion. Per år minskar klimatutsläppen med 103 ton koldioxidekvivalenter i systemet med etanolproduktion och med 23 ton koldioxidekvivalenter i systemet med biodieselproduktion med avdrag för ersatt fossilt bränsle. Vid fermenteringen behöver 8,6 ton ammoniumkväve och 16,8 ton svavel tillsättas. Vid odling av oljebildande jästsvamp behöver 1,2 ton ammoniumkväve, 11,7 ton fosfor och 0,1 ton magnesium tillsättas. pH-värdet behöver sänkas till 5,5 respektive 5,7 vid etanol- respektive biodieselproduktion. Etanolproduktion bedöms vara lämpligast på musteriet. Både etanol- och biodieselproduktion är generellt effektivare på Företaget både klimat- och energimässigt än vid biobränsleproduktion av odlade råvaror. Biobränsleproduktionen på Företaget skulle kunna effektiviseras genom inblandning av andra lokala aktörers restprodukter. Experimentella studier samt forskning kring kostnader, behov av arbetsinsatser och komplexitet är betydelsefullt i vidare analys av restströmmarnas potential. Det skulle även vara värdefullt med en utredning om möjligheten att återcirkulera koldioxid som utsöndras av jästsvamparna till algodling i vattenreningen.

**Ämnesord**

Musteri, energibalans, klimatpåverkan, fermentering, oljebildande jästsvamp, biodiesel, etanol.

Både etanol- och biodieselproduktion på Företaget är generellt effektivare både klimat- och energimässigt än i system med odlade råvaror, enligt jämförda studier.



## **Förord**

Ett stort tack till miljö- och kvalitetschef Stina Andrén samt före detta teknisk chef Hans Hesselroth för möjligheten att göra examensarbetet kopplat till det undersökta musteriets! Stina har även hjälpt till med granskning av examensarbetet. Jag vill dessutom ge ett stort tack till drifttekniker Alex Wallgren för information samt provtagning, vilket gjorde det möjligt att genomföra examensarbetet!

Ett stort tack till Madeleine Brask på Miljöbron! Miljöbron förmedlade examensarbetet och Madeleine har fungerat som ett stöd under hela processen.

Tack till alla andra informanter för er värdefulla information!

Tack även till de lärare på Högskolan Kristianstad som hjälpt mig med examensarbetet! Stefan Trobro bidrog med idéer inför examensarbetet och Lennart Mårtensson hjälpte till att forma inriktningen. Tack till Lena Vought som varit med handledare för examensarbetet!

*Malin Mattsson*

*Kristianstad, den 2 december 2018*



# Innehåll

Inledning.....	1
Syfte .....	2
Avgränsningar .....	2
Teori .....	2
Metod.....	7
Sekretess .....	7
Litteratur .....	7
Personlig kommunikation .....	7
Mätning av sockerhalt .....	7
Val av produktionsmetoder .....	7
Energibalansberäkning och klimatpåverkan .....	8
System med etanolproduktion .....	8
System med biodieselproduktion .....	9
Resultat.....	10
Analys av restflöden på Företaget .....	10
Potential för etanolproduktion .....	12
Energibalans - system med etanolproduktion .....	13
Klimatpåverkan - system med etanolproduktion .....	17
Potential för biodieselproduktion .....	19
Energibalans - system med biodieselproduktion .....	21
Klimatpåverkan - system med etanolproduktion .....	24
Jämförelse mellan etanol- och biodieselproduktion .....	25
Diskussion .....	27
Utvärdering av resultat .....	27
Felkällor .....	28
Jämförelse med andra produktionsmetoder .....	29
Alternativa metoder för omhändertagande av reningsslammet .....	31
Framtidspotential för biobränslen .....	32
Förslag på vidare forskning .....	33
Slutsatser .....	34
Referenser.....	35
Bilagor	





## Inledning

Musteriet, fortsättningsvis kallat Företaget, producerar förädlade frukt- och bärprodukter, exempelvis juice, must, cider och vin. I processerna uppstår olika restprodukter, bland annat renings slam, äppelrester och ett relativt sockerrikt koncentrat.<sup>1,2</sup>

Tidigare har biogasanläggningen Kristianstad Biogas AB i Karpalund tagit hand om renings slammet för rötning till biogas. Då biogasanläggningen införde en avgift för substrat med TS-halt under fem procent upphörde detta användningsområde.<sup>3,4</sup> TS-halten för renings slammet på Företaget ligger på runt en procent (Kiviks Musteri 2018). När biogasarötning av renings slammet upphörde började slammet istället användas som gödning av andra lokala aktörer. Denna användning innebär emellertid höga lagringskostnader samt transporter.<sup>5</sup> Därför finns behov av en lämpligare lösning för renings slammet.

Äppelresterna består av rester som uppstår vid pressning och ges idag bort för användning som djurfoder.<sup>6</sup> Koncentratet innehåller rester från processerna på Företaget och hämtas i nuläget av Kristianstad Biogas AB för användning som utspädning i rötprocessen.<sup>7,8</sup> Genom att sammanföra renings slammet med äppelresterna och koncentratet uppstår en möjlighet att använda avfallsströmmarna för tillverkning av etanol eller biodiesel.

Olika arter av jästsvampar kan fermentera sockerrika substrat till etanol (Hanscho et al. 2012). Under senare tid har oljebildande jästsvamp för produktion av biodiesel uppmärksammas som ett alternativ till biodiesel producerad av oljegrödor eller mikroalger. Fördelen med oljebildande jästsvamp är att den varken behöver solljus eller någon odlingsjord som skulle kunna användas till odling av livsmedel (Sitepu et al. 2014). Restströmmarna på Företaget innehåller socker samt näringsämnen som fermenterande och oljebildande jästsvampar behöver för sin tillväxt (Hanscho et al. 2012; Koutinas et al. 2014).

Användning av biodiesel som fordonsbränsle ökar snabbt och låg år 2017 på 14,5 TWh, medan användningen av etanol endast låg på 1,2 TWh (Energimyndigheten 2018). HVO (vätebehandlad vegetabilisk olja) ökar mest i användning, vilket delvis kan bero på att etanol är dyrare än HVO per kWh (Miljöfordon.se 2018a). Prisskillnaden har troligen sin grund i att etanol vanligen tillverkas av odlade grödor (Capareda 2014). HVO tillverkas huvudsakligen av slakteriavfall, rester från fiskindustrin, begagnad frityrolja samt tallolja (Energifabriken u.å.).

Regeringen har satt upp som klimatmål att Sverige inte ska ha några nettoutsläpp av växthusgaser till atmosfären senast år 2045 och därefter ha minusutsläpp (Regeringskansliet 2017). Under senare tid har det varit mycket fokus på elbilar, men det kan krävas många typer av fossilmått drivmedel för att uppnå regeringens klimatmål. Därför är det av betydelse att utreda potentialen för produktion av etanol och biodiesel från restströmmarna på Företaget.

---

<sup>1</sup> Stina Andrén kvalitets- och miljöchef Kiviks Musteri, personlig kommunikation den 12 mars 2018.

<sup>2</sup> Alex Wallgren drifttekniker Kiviks Musteri, personlig kommunikation den 26 mars 2018.

<sup>3</sup> Bengt Stuhre ansvarig råvaror/biogödsel Kristianstad Biogas AB, personlig kommunikation den 23 mars 2018.

<sup>4</sup> Stina Andrén kvalitets- och miljöchef Kiviks Musteri, personlig kommunikation den 12 mars 2018.

<sup>5</sup> Stina Andrén kvalitets- och miljöchef Kiviks Musteri, personlig kommunikation den 12 mars 2018.

<sup>6</sup> Stina Andrén kvalitets- och miljöchef Kiviks Musteri, personlig kommunikation den 12 mars 2018.

<sup>7</sup> Alex Wallgren drifttekniker Kiviks Musteri, personlig kommunikation den 26 mars 2018.

<sup>8</sup> Bengt Stuhre ansvarig råvaror/biogödsel Kristianstad Biogas AB, personlig kommunikation den 23 mars 2018.

## **Syfte**

Syftet med studien är att undersöka energibalans och klimatnytta vid etanol- respektive biodieselproduktion av Företagets restströmmar. Även utbytet av biobränsle samt behov av tillsatser analyseras.

Studien är betydelsefull för att undersöka om det är motiverat att använda Företagets restströmmar till etanol- eller biodieselproduktion samt för att avgöra vilket av de två biobränslena som är lämpligast att producera.

## **Avgränsningar**

Energianvändning samt klimatpåverkan inkluderar produktionen av etanol/biodiesel på Företaget. Klimatpåverkan från energianvändning i samtliga steg på Företaget inkluderas i studien.

Energianvändning med tillhörande klimatpåverkan för produktion av kemikalier som skulle behöva användas vid extraktion och transesterifiering ingår i studien.

Transport av restprodukter till Kristianstad Biogas AB ingår vid energibalansräkning samt beräkning av klimatpåverkan.

Mängden näringsämnen inkluderas i studien, men energianvändning och klimatpåverkan vid produktion av näringsämnena inkluderas inte. Produktion av kemikalier för pH-justering samt enzymer för hydrolys ingår inte heller vid beräkning av energibalans och klimatutsläpp.

Byggnation av anläggningar samt transport och distribution av etanol/biodiesel inkluderas inte i studien.

## **Teori**

### **Etanolproduktion**

#### *Fermentering och metabolism*

Etanol ( $C_2H_5OH$ ) kan tillverkas genom att speciella jästsvampar eller enzymer omvandlar socker, stärkelse eller cellulosa till etanol. Den vanligaste omvandlingsmetoden är fermentering med hjälp av jästsvampen *Saccharomyces cerevisiae*. Denna jästart har blivit genetiskt modifierad för att producera en hög andel etanol och för att kunna leva i en hög koncentration av socker (Capareda 2014). Vid traditionell etanoltillverkning är sockerhalten i substratet vanligen kring 15-16 procent och ger ett utbyte på 7-8 procent etanol (Patil et al. 1998). Vissa familjer inom släktet *S. cerevisiae* kan emellertid utnyttja glukos i så låga koncentrationer som 10 gram per liter (Hanscho et al. 2012). Även jästsvampen *Fusarium Oxysporum* har i tidigare studier använts vid fermentering i substrat med låga koncentrationer av socker (20-40 gram per liter substrat) (Panagiotou et al. 2005; Ruiz et al. 2007).

Jästsvampar behöver även aminosyror och näringsämnen, varav kväve är viktigast (Hanscho et al. 2012). *S. cerevisiae* har högst tillväxt med ammonium, asparagin eller glutamin som kvävekälla (Bell & Henschke 2005).

Fermentering med *S. cerevisiae* tar 2-5 dygn och sker vanligen vid pH 4-5 (Capareda 2014). Etanolfermentering sker med fördel i en temperatur på 25-35 °C (Bajpai & Margaritis 1987).

Den enklaste formen av fermentering äger rum i en satsreaktor, där substratet och jästen tillsätts en gång och sedan sker reaktionerna tills processerna har avstannat. Satsreaktorer är emellertid arbetskrävande och ineffektiva vid storskalig produktion. Bioreaktorer som kallas CSTR (continuous stirred tank reactors) används vanligen vid fermentering i större

skala. I dessa reaktorer sker ett konstant inflöde av substrat respektive utflöde av produkten. För att koncentrationen ska hållas konstant krävs omrörning, vilket i dessa reaktorer brukar ske genom att luftbubblor tillförs substratet (Najafpour 2007, University of Michigan u.å.).

Reducerande sockerarter, vilka inkluderar alla monosackarider (till exempel glukos och fruktos) samt vissa polysackarider, kan reduceras direkt till etanol. Icke reducerande sockerarter, exempelvis sukros, bryts först ned av enzymet *invertas* i jästen för att sedan omvandlas till etanol och koldioxid. Polysackarider såsom cellulosa kan genomgå hydrolys med enzymer. Genom hydrolys omvandlas polysackariderna till reducerande sockerarter som lättare tas upp av jästsvamparna (Annamalai et al. 2017; Ouchida et al. 2017; Parmar & Rupasinghe 2013). Det bildas även små mängder organiska syror och cellmassa i omvandlingsprocessen (Ouchida et al. 2017). Omvandlingen av socker till etanol sker enligt formel 1 (Capareda 2014):



Efter fermenteringen kan jästen återanvändas helt eller delvis. Vid återcirkulering av jästkulturen finns emellertid risk för kontaminering med mikroorganismer som producerar andra fermenteringsprodukter än etanol (Wilkie et al. 2000).

### *Destillation*

För att producera ren etanol krävs både destillation och avvattning av substratet. Anledningen till att destillation inte räcker för att avvattna etanolen är att etanol binder till vatten genom att bilda en så kallad azeotrop, vars bindningar inte upplöses vid destillation. Efter kokning är vattenkoncentrationen cirka 4,37 viktprocent (Capareda 2014).

Vid destillationen försvinner koldioxiden samt lösta gaser och andra orenheter. Destillationsrestvattnet som blir kvar efter att etanolen har avlägsnats kallas för vinass (Ouchida et al. 2017). Vinass har en TS-halt på 11-12 viktprocent (Khatiwada & Silveira 2009).

Nuförtiden används oftast flera destillationskolonner. Vid låga etanolkoncentrationer i det inkommande substratet krävs speciellt energieffektiva metoder. En metod som är användbar vid låga etanolkoncentrationer är en teknik (thermally integrated stripper/rectifier system) där substratet rinner ner i en bana i flera steg samtidigt som varm ånga stiger uppåt och får kontakt med den nerrinnande vätskan. I denna metod finns en separat kolonn där den färdiga produkten tas ut (Madson & Lococo 2000; Vane 2008).

En destillationsmetod där ingen ytterligare avvattning behöver ske är vakuumdestillation. Vid vakuumdestillation används tryck under 11,7 kPa, vilket gör att etanol-vattenazeotrophen inte bildas. Det reducerade trycket gör att kokpunkten sänks, så att en lägre temperatur krävs (Capareda 2014).

### *Avvattning*

Genom olika typer av avvattningsmetoder kan en etanolkoncentration på 99,5-100 volymprocent uppnås (Capareda 2014; Ouchida et al. 2017).

Tertiär azeotropdestillation är den traditionella metoden för avvattning av etanol. I denna metod används ett ämne, exempelvis bensen eller pentan, för att separera etanolen från vattnet. Dessa ämnen bildar en azeotrop med både etanolen och vattnet och kan sedan destilleras bort tillsammans med vattnet. Det tillsatta ämnet behöver återanvändas för att denna avvattningsmetod ska bli ekonomiskt lönsam (Capareda 2014).

Under senare tid har det blivit vanligare att använda storleksselektiva molekylsilars som avvattningsmetod. Silarna är gjorda av kristallint metalliskt aluminiumsilikat som bildar ett nätverk av porer med en storlek på 3 Å. Då vattenmolekyler är mindre än 3 Å adsorberas de av silen. Etanolmolekylerna är större än 3 Å och kan därför inte adsorberas utan separeras från vattnet. Silen kan återanvändas efter torkning (Capareda 2014).

#### *Användning av restprodukten vinass*

Av vinass (destillationsvattnet) tillverkas ofta drank som är ett proteinrikt djurfoder. Produktionen av drank innebär emellertid en energikrävande avvattningsprocess av vinassen (Bernesson et al. 2006).

Vinass kan även användas som gödselmedel (Lundin 2007).

Ytterligare ett användningsområde för vinass är som substrat vid biogasrötning (Khatiwada & Silveira 2009; Wilkie et al. 2000).

### **Biodiesel av oljebildande jästsvamp**

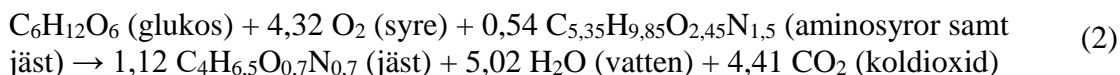
#### *Oljebildande jästsvampar*

Mikroorganismer som kan ackumulera mer än 20 procent fettsyror, även kallade lipider, i sin biomassa (torrvikt) kallas oljebildande. Det finns oljebildade mikrosvampar, bakterier och mikroalger. Endast cirka fem procent av alla jästsvampar kan ackumulera mer än 25 procent lipider i sin cellmassa, men vissa arter kan binda upp till 80 procent lipider. De mikrobiella lipiderna innehåller en stor andel fleromättade fettsyror, vilka har stor potential som råvara för produktion av fordonsbränsle (Ageitos et al. 2011; Subramaniam et al. 2010).

#### *Metabolism och odling*

De oljebildande jästsvamparna behöver för sin metabolism en sockerkälla, exempelvis glukos, samt syre, näringsämnen och aminosyror (Gill et al. 1977; Koutinas et al. 2014). Omvandlingen av glukos till triglycerider sker i två steg enligt formel 2 och 3 (Koutinas et al. 2014).

Tillväxt:



Cellackumulation:



Odling av oljebildande jästsvamp sker vanligen vid en temperatur på 26-32 °C och vid ett pH på 4-6,5 (Ageitos et al. 2011).

#### *Skörd av jästceller*

Jästcellerna skördas generellt genom centrifugering (Capareda 2014; Tredici et al. 2015).

#### *Förbehandling och extraktion*

Ultraljud kan användas som första steg vid extraktion för att avlägsna lipider som är bundna i cellväggen (Capareda 2014). Vid förbehandling med ultraljud skapar ljudvågorna alternerande högtryck och lågtryck i substratet. Under lågtrycket bildas vakuumbubblor som under högtryck kollapsar och skapar lokala jetströmmar med hög hastighet. Kraften i strömmarna tar sönder cellstrukturen så att extraktion lättare kan ske (Hielscher 2018).

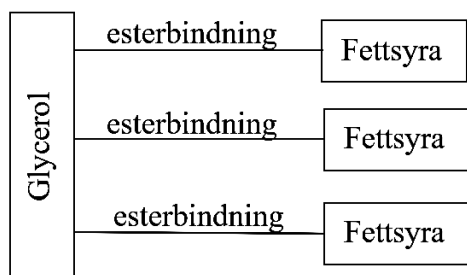
Extraktion kan göras med antingen våt centrifugerad biomassa eller med torkad biomassa (Yuan et al. 2015). Att torka biomassa helt är emellertid mycket energikrävande (Salam et al. 2016).

För att extrahera lipider används ofta en metod skapad 1959 av E. G. Bligh och W. J. Dyer. I denna metod används en kloroform- och metanolblandning. Jästcellerna löses sedan upp i exempelvis hexan (Karatay & Dönmez 2010). Kloroform är emellertid medtaget i EU:s begränsningsdatabas till följd av att ämnet är hälsofarligt och skadligt för ozonskiktet (Prevent u.å.). Enbart hexan eller metanol kan även användas för extraktionen, som då blir något mindre effektiv (Zhang et al. 2014). Vid extraktion behövs ytterligare centrifugering och den kemikalie som används vid extraktionen behöver ångas bort (Zhang et al. 2014).

Ett sätt att omvandla den våta biomassan direkt till råolja, utan extraktion, är hydrotermisk förvätskning. Denna omvandlingsprocess sker i varmt, trycksatt vatten. Restprodukter vid hydrotermisk uppvärmning är kol samt ett surt (pH 3,7-4,1) och näringsrikt restvatten (Jena et al. 2015).

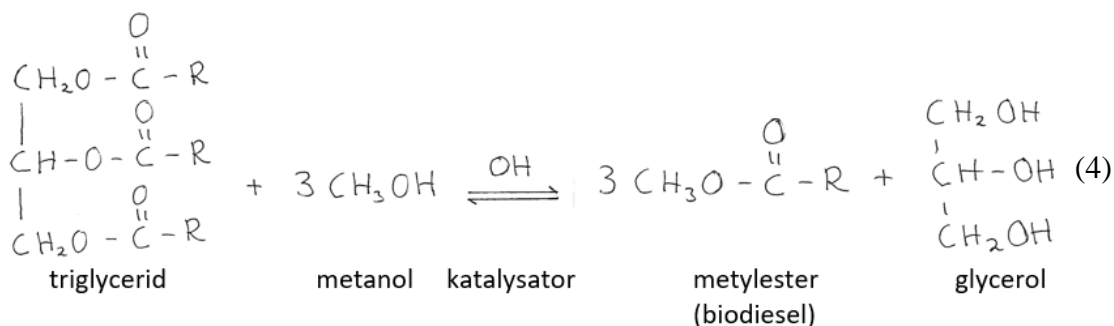
### Transesterifiering till biodiesel

Alla lipider går det inte att tillverka biodiesel av. Exempel på icke transesterifierbara lipider är karotenoider, steroler och retinoider (Zhang et al. 2014). Lipiderna som går att transesterifiera till biodiesel kallas triacylglyceroler eller triglycerider (Angerbauer et al. 2007). Triglycerider består av en glycerolmolekyl med esterbindningar till tre fettsyror enligt figur 1 (Capareda 2014).

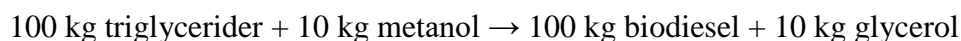


**Figur 1.** Kemisk uppbyggnad av triglycerid (Capareda 2014).

Under transesterifieringen omvandlas en triglyceridmolekyl till tre molekyler metylester, det vill säga biodiesel. Omvandlingen sker med hjälp av metanol och en katalysator som antingen kan vara en syra eller bas. Det är vanligast att använda natriumhydroxid som katalysator (Capareda 2014). Den kemiska formeln för transesterifiering visas i formel 4 (Bioenergiportalen 2009).



Massbalansen vid transesterifiering är följande (Capareda 2014):



Biodiesel består vanligen av alkylfettsyror med längden C<sub>14</sub>-C<sub>22</sub>. Dessa alkylfettsyror är estrar av främst metanol och etanol (Demirbas 2010).

### *Användning av restprodukter*

Ren glycerol kan exempelvis användas som emulgerings-, stabiliserings- eller förtjockningsmedel (Livsmedelverket u.å.). Den glycerol som uppstår som biprodukt vid biodieselproduktion består emellertid vanligen endast av 56-60 procent ren glycerol. I övrigt består den av bland annat tvål, metylester, metanol, kalium, natrium och tungmetaller. Reningsprocessen för industriell användning är därför omfattande och andra användningsområden för glycerolen kan vara mer lämpliga (Robra et al. 2010; Viana et al. 2012).

Den glycerol som uppstår som biprodukt vid biodieselproduktion kan återcirkuleras in i processen som växtmedium för oljebildande jästsvampar (Tchakouteu, et al. 2015; Saenge et al. 2011).

Ett annat användningsområde för glycerolen är biogasrötning (Viana et al. 2012). Även restbiomassa från extraktion kan rötas till biogas (Boer et al. 2012; Yuan, et al. 2015).

## **Metod**

### **Sekretess**

Det musteri som studien utgår ifrån benämns "Företaget" i den löpande texten. Företaget önskade denna sekretessmetod för att minska sökbarheten, men godkände att företagsnamnet skrivs ut i referenser samt att informanter från Företaget namnges.

### **Litteratur**

Tidigare studier användes för att undersöka odlingsförutsättningarna vid fermentering samt för oljebildande jästsvampar. Även bedömning av energianvändning i de olika stegen samt klimatpåverkan baserades på tidigare forskning.

Tidigare studier presenterade i vetenskapliga artiklar användas huvudsakligen. Som komplement till de vetenskapliga artiklarna användas en bok av Capareda (2014) samt information, om exempelvis tekniska lösningar, på Internet.

### **Personlig kommunikation**

Personlig kommunikation användes som informationskälla vad det gäller processerna på Företaget. Miljö- och kvalitetschef Stina Andrén, teknisk chef Hans Hesselroth samt drifttekniker Alex Wallgren var informanter på Företaget. Alex Wallgren tog dessutom Brix-prover (anger sockerkoncentration) på reningsslam och koncentrat.

Personliga informanter användes även för att få information om biogasrötning på Kristianstad Biogas AB, transporter av biogassubstrat samt uppgradering till fordonsgas. Delvis användes information som författaren använt i samband med ett tidigare projektarbete på Högskolan Kristianstad.

### **Mätning av sockerhalt**

Sockerkoncentrationen i reningsslam och koncentrat bestämdes, som nämnts, med hjälp av Brix-mätningar. °Brix anger innehållet av löslig torrs substans, vilken främst utgörs av socker (Rumpunen 2015). I en ren vattenlösning avspeglar Brix-värdet viktprocenten socker exakt (Toledo 2014). Brix-mätning görs med hjälp av en refraktometer som analyserar vätskans brytningsindex (Rumpunen 2015).

Det fanns endast möjlighet att göra en Brix-mätning vardera på reningsslammet och koncentratet.

### **Val av produktionsmetoder**

Jästarter som gav högst utbyte under odlingsförutsättningarna i restströmmarna på Företaget valdes ut för vidare jämförelse mellan etanol- och biodieselsystemen. För att maximera odlingsförutsättningarna antogs att äppelresterna skulle genomgå hydrolys med enzymer.

De metoder som bedömdes ge minst miljöpåverkan valdes ut. Miljöpåverkan innebär i denna studie energianvändning, klimatpåverkan samt eventuella andra skadliga miljöeffekter.

För att undvika tunga processer på Företaget valdes hydrotermisk förvätskning bort som metod för lipidutvinning av de oljebildande jästsvamparna. Restprodukterna kol och surt vatten är inte heller önskvärda då dessa skulle innebära försäljning och omhändertagande som företaget inte är intresserat av.<sup>9</sup>

Restvatten förutsattes användas till bevattning av äppelodlingar.

---

<sup>9</sup> Stina Andrén kvalitets- och miljöchef Kiviks Musteri, mejlkontakt den 13 april 2018.

## **Energibalansberäkning och klimatpåverkan**

Energianvändning inkluderade processerna vid etanol- respektive biodieselproduktion på Företaget samt produktion av tillsatta ämnen vid extraktion och transesterifiering. Transporter av exempelvis kemikalier och näringsämnen till processerna ingick inte, då det hade blivit alltför komplicerat. I energianvändningen inkluderades emellertid även transport av restprodukter till Kristianstad Biogas AB, rötning och uppgradering till biogas. Energianvändning och klimatutsläpp vid produktion av tillsatta näringsämnen ingick inte i studien, då det var svårt att få fram uppgifter om energianvändning och klimatutsläpp för alla typer av näringsämnen som krävdes.

I balansräkning av nettoenergi per år inkluderades energivärdet för etanol respektive biodiesel samt för biogas av restprodukter. Energianvändning beräknades även per megajoule etanol/biodiesel med respektive utan produktion av biogas inkluderad. Energivärde för FAME (fettsyrametylestrar), det vill säga biodiesel som framställs genom transesterifiering (Neste 2018), användes i systemet med biodiesel.

Elektricitet antogs användas som energikälla förutom vid transporter av substrat till biogasanläggningen, vilka sker med HVO-bilar.<sup>10</sup> Elanvändning förutsattes ske genom användning av Nordisk elmix, vilket är den genomsnittliga svenska elanvändningen från olika typer av energislag (Energi- och klimatrådgivningen 2017). Antagande om växthusgasutsläpp för denna elmix byggde på ett medelvärde mellan uppgifter från Energi- och klimatrådgivningen (2018) samt Öresundskraft (2018).

Beräkning av klimatpåverkan baserades på produktionen av koldioxid vid fermentering alternativt odling av de oljebildande jästsvamparna samt utsläpp av koldioxidekvivalenter vid energianvändning. Koldioxidekvivalenter är en omräkning av gasers växthusgaspotential i jämförelse med växthusgaspotentialen hos koldioxid. Växthusgaspotentialen för metan är exempelvis 25 gram koldioxidekvivalenter per gram (Lantz et al. 2009). Klimatpåverkan beräknades per år samt per megajoule producerad etanol respektive biodiesel både med och utan avdrag för biogasproduktion av restprodukter. Nettoklimatpåverkan innebär i studien att det har gjorts avdrag för att etanol respektive biodiesel samt biogas ersätter fossila bränslen.

Då det var möjligt valdes biogasrötning för energiproduktion av restprodukter. Anledningen var att det sedan tidigare finns ett samarbete med Kristianstad Biogas AB, vilka är villiga att gratis hämta upp rötningsbara restprodukter med en TS-halt över fem procent.<sup>11</sup> Vad det gällde glycerol från biodieseltillverkningen utreddes alternativet att återcirkulera glycerolen i substratet för att öka tillväxten hos jästsvamparna.

Vid biogastillverkning produceras biogödsel som en biprodukt (Svenskt Gastekniskt Center 2011). I denna studie har emellertid ingen avräkning för ersättning av mineralgödsel gjorts eftersom det ansågs vara för komplicerat att avgöra hur mycket rötning av just de aktuella biprodukterna skulle bidra till produktionen och näringsvärdet i biogödseln.

## **System med etanolproduktion**

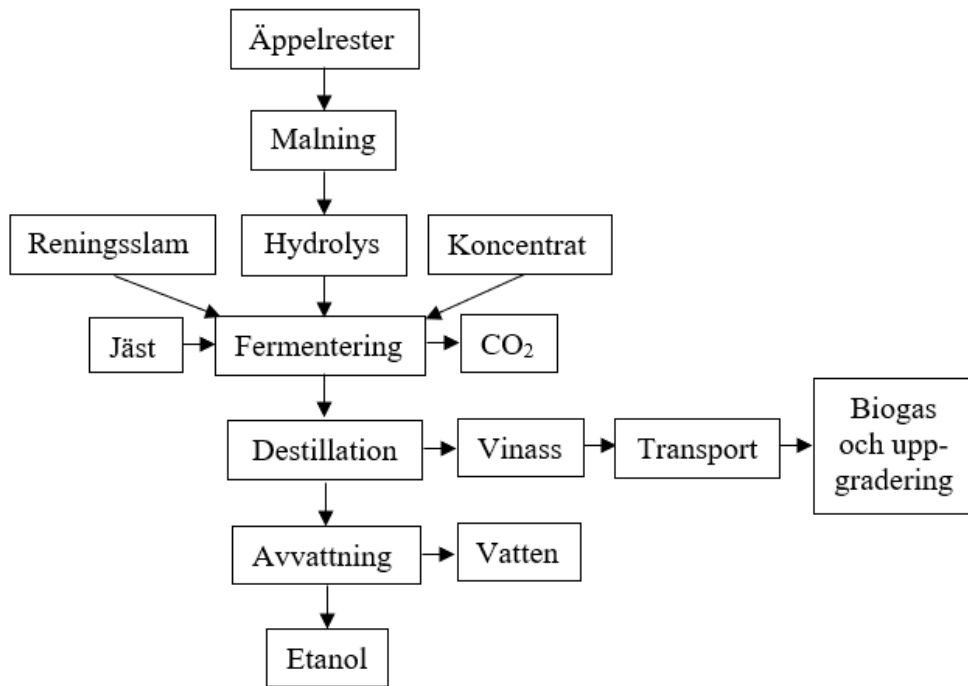
Systemet för produktion av etanol av restströmmarna på Företaget presenteras i figur 2.

---

<sup>10</sup> Tore Sigurdsson affärsområdeschef C4 Energi Biogas, mejlkontakt den 24 april 2017.

<sup>11</sup> Bengt Stuhre ansvarig råvaror/biogödsel Kristianstad Biogas AB, personlig kommunikation den 23 mars 2018.

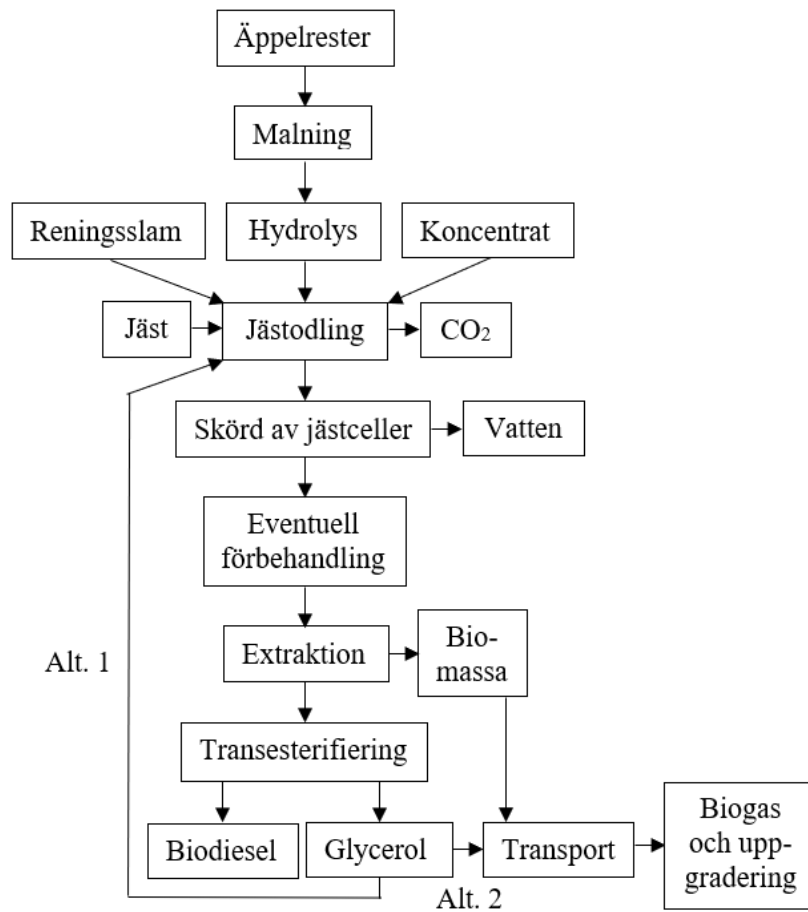




**Figur 2.** Flödesschema över system med etanolproduktion.

### **System med biodieselproduktion**

Systemet för produktion av biodiesel av restströmmar på Företaget presenteras i figur 3.



**Figur 3.** Flödesschema över system med biodieselproduktion.

## Resultat

### ***Analys av restflöden på Företaget***

#### **Analys av äppelrester**

Äppelresterna är huvudsakligen pressrester. År 2017 uppstod 459 ton äppelrester på Företaget.<sup>12</sup> Denna vikt antogs vara representativ för den genomsnittliga årliga uppkomsten av äppelrester på Företaget. I fortsatt analys förutsätts att äppelresterna helt består av pressrester.

Pressrester från äpplen består till 95 procent av skal och fruktkött, till 2-4 procent av kärnor och till 1 procent av stjälkar (Perussello et al. 2017). Enligt en studie av Evcan och Tari (2015) har pressrester av äpplen en halt av reducerande socker på 6,25 viktprocent (våtvikt).

I en analys av Parmar och Rupasinghe (2013) undersöks hur mycket hydrolysis kan öka halten av reducerande sockerarter i pressrester av äpplen. De analyserade pressresterna har en TS-halt på 21 viktprocent och består till 10 viktprocent av risskal som använts i malningsprocessen. 18,2 gram av 100 gram (torrvikt) pressrester består av reducerande sockerarter (fruktos och glukos). Andelen polysackarider (torrvikt) är 22,2 viktprocent cellulosa, 9,9 viktprocent pektin och 5,5 viktprocent hemicellulosa. I en hydrolysis med enzymerna pektinas, cellulas och  $\beta$ -glucosidase omvandlas polysackariderna så att andelen reducerande sockerarter i de våta pressresterna blir 10,2 viktprocent (11,3 viktprocent utan risskal). Koncentrationerna av enzymerna är i studien 43, 183 respektive 40,5 EU (enzymenheter) per gram torrvikt. Hydrolysen äger rum i en omrörning av 150 rpm vid pH 4,0 (justerat med 0,05 N citratbuffertlösning) och 40 °C i 24 timmar.

Enligt en studie av Nieto et al. (2012) är pH-värdet 3,3 och TS-halten 148,1 gram per kilo restprodukter av äpplen. Halterna av kväve, fosfor och svavel är 1,2 procent, 0,2 procent respektive 1 procent (torrvikt). Ammoniumkvävehalten för pressrester vid äppeljuiceproduktion är, enligt Pirmohammadi et al. (2006), 100 gram per kilo kväve. Magnesium finns i en halt av 0,02-0,36 procent i pressrester från äpplen (torrvikt) (Perussello et al. 2017). Ett medelvärde på 0,19 viktprocent (torrvikt) magnesium antogs i denna studie.

I tabell 1 redovisas andelen näringsämnen i äppelresterna på Företaget baserat på ovan presenterade studier (se bilaga 1).

**Tabell 1.** Andel näringsämnen i pressrester av äpplen (våtvikt) (se bilaga 1)

<b>N-NH<sub>3</sub></b> <b>(g/ton)</b>	<b>P</b> <b>(g/ton)</b>	<b>S</b> <b>(g/ton)</b>	<b>Mg</b> <b>(g/ton)</b>
178	296	1 481	281

#### **Analys av koncentrat**

Det koncentrat som uppstår på Företaget är en restprodukt från processerna vid produktionen av exempelvis juice, must, cider och vin.<sup>13</sup> År 2017 var mängden koncentrat som uppstod på Företaget 2 127 kubikmeter (Kiviks Musteri 2018). Denna volym antogs representativ som ett årligt medelvärde.

<sup>12</sup> Stina Andrén kvalitets- och miljöchef Kiviks Musteri, mejlkontakt den 22 maj 2018.

<sup>13</sup> Alex Wallgren drifttekniker Kiviks Musteri, personlig kommunikation den 26 mars 2018.

Sockerhalten i koncentratet var vid en Brix-mätning 4,20 °Brix.<sup>14</sup> Detta värde motsvarar 42,0 gram socker per liter vid en antagen densitet på 1 kilo per liter koncentrat. Denna sockerkoncentration antogs vara representativ för koncentratet.

Eftersom koncentratet är en avspeglning av processerna på mustriet gjordes en uppskattning av halterna näringsämnen utifrån analysen av äppelresterna. Uppskattningen baserades på en jämförelse mellan sockerhalten för äppelresterna före hydrolys och sockerhalten för koncentratet. Andelen socker i de två olika restströmmarna antogs återspegla andelen näringsämnen. Andelen näringsämnen i koncentratet, enligt detta antagande, presenteras i tabell 2 (se bilaga 1).

**Tabell 2.** Uppskattning av näringshalter i koncentratet (våtvikt) (se bilaga 1)

<b>N-NH<sub>3</sub></b> <b>(g/ton)</b>	<b>P</b> <b>(g/ton)</b>	<b>S</b> <b>(g/ton)</b>	<b>Mg</b> <b>(g/ton)</b>
119	198	992	188

Koncentratet varierar mycket i innehåll beroende på processerna. Under vissa perioder innehåller det stora mängder egenproducerat vin som kasserats.<sup>15</sup> pH-värdet för koncentratet varierar därför mellan 3 och 7.<sup>16</sup>

### **Analys av reningsslam**

Reningsslammet på Företaget består av överflödesvatten och restprodukter från produktionen samt diskvatten.<sup>17</sup> Volymen reningsslam uppgick år 2017 till 16 900 kubikmeter (Kiviks Musteri 2018). Denna volym antogs vara representativ som ett årligt medelvärde.

Vid Brix-mätningen hade slammet 0,21 °Brix.<sup>18</sup> Reningsslammet innehåller således 2,1 gram socker per liter vid en antagen densitet på 1 kilo per liter reningsslam. Denna sockerkoncentration antogs vara representativ för reningsslammet.

I tabell 3 redovisas provresultat av pH, ammoniumkväve, fosfor och magnesium vid de, i början av studien, två senaste mätningarna av slammet samt medelvärden (Kiviks Musteri 2017).

**Tabell 3.** pH, TS-halt, ammoniumkväve, fosfor och magnesium vid två provtagningar av slammet samt medelvärden (Kiviks Musteri 2017)

	<b>pH</b>	<b>TS-halt</b> <b>(%)</b>	<b>N-NH<sub>3</sub></b> <b>(g/kg TS)</b>	<b>P</b> <b>(g/kg TS)</b>	<b>Mg</b> <b>(g/kg TS)</b>
Prov 171101	6,5	1,1	17	16	2,3
Prov 170411	6,7	0,83	4,8	12	1,7
Medelvärde	6,6	0,97	10,9	14	2,0

Provtagning av svavel har inte förekommit. Koncentration av svavel beräknades därför utifrån en jämförelse av sockerhalt med äppelrester på samma sätt som näringsämnena i koncentratet uppskattades. Medelkoncentrationen av näringsämnen i det våta slammet, med en uppskattning av svavelhalt, redovisas i tabell 4 (se bilaga 1).

<sup>14</sup> Alex Wallgren drifttekniker Kiviks Musteri, kommunikation via sms den 13 april 2018.

<sup>15</sup> Alex Wallgren drifttekniker Kiviks Musteri, personlig kommunikation den 26 mars 2018.

<sup>16</sup> Alex Wallgren drifttekniker Kiviks Musteri, kommunikation via sms den 2 maj 2018.

<sup>17</sup> Stina Andrén kvalitets- och miljöchef Kiviks Musteri, personlig kommunikation den 12 mars 2018.

<sup>18</sup> Alex Wallgren drifttekniker Kiviks Musteri, kommunikation via sms den 24 april 2018.

**Tabell 4.** Koncentration av näringsämnen i renings slammet (våtvikt) (se bilaga 1)

N-NH <sub>3</sub> (g/ton)	P (g/ton)	S <sup>1</sup> (g/ton)	Mg (g/ton)
1,1	1,4	49,8	0,2

<sup>1</sup>Uppskattat värde (se bilaga 1).

### **Sockerkhalt, pH och näringsämnen i restströmmarna**

Baserat ovan presenterade värden är medelsockerhalten i samtliga restströmmar är 9,1 gram per liter och pH-värdet varierar mellan 6,1 och 6,6 (se bilaga 1).

Medelvärdena av näringsämnen i restströmmarna på Företaget redovisas i tabell 5 (se bilaga 1). Medelvärdena förutsätter att andelen av de olika restströmmarna (slam, äppelrester och koncentrat) är konstant.

**Tabell 5.** Medelvärden av näringsämnen i samtliga restströmmar (se bilaga 1)

N-NH <sub>3</sub> (mg/l)	P (mg/l)	S (mg/l)	Mg (mg/l)
18,2	29,0	186	27,3

## **Potential för etanolproduktion**

### **Val av jästsvamp för fermentering**

#### *Fermentering med S. cerevisiae*

Det finns få studier av fermentering vid låga sockerkoncentrationer. I en studie av Hanscho et al. (2012) utförs emellertid fermentering med olika familjer i BY-släktet av *S. cerevisiae* i ett substrat med 20 gram glukos per liter. Substratet innehåller även 10<sup>5</sup> jästceller per milliliter, 1,7 gram YNB (jäst-kväve-bas) per liter, 5 gram (NH<sub>4</sub>)SO<sub>4</sub> per liter samt en sammansättning av upp till 22 aminosyror i fem olika koncentrationer. pH-värdet justeras med MES (4-morfolinetansulfonsyra) till pH 5,7. Fermenteringen sker under förhållanden som simulerar en satsreaktor vid 30 °C med en omblandning på 180 rpm. Med en aminosyrasammansättning som redovisas i bilaga 2 (se tabell 23) har familjen BY4741 en tillväxt på 0,10 gram per gram glukos. BY4741 bildar i studien 18,1 millimol etanol per timme samtidigt med ett upptag av 12 millimol glukos per timme under den exponentiella tillväxtfasen (20 timmar). Det innebär att 0,39 g etanol produceras per gram glukos (se bilaga 2). Endast cirka 12 gram glukos per liter konsumeras, vilket innebär att BY4741 klarar att tillväxa i mycket låga sockerkoncentrationer. Ett experiment med jästfamiljen BY4742 visade att denna jästfamilj hade lika stor tillväxt i 10 gram glukos per liter som i 20 gram glukos per liter.

I YNB, som används i studien av Hanscho et al. (2012), ingår flera näringsämnen som innehåller en liten andel kväve, exempelvis biotin (C<sub>10</sub>H<sub>16</sub>N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>S) och p-aminobensoesyra (H<sub>2</sub>NC<sub>6</sub>H<sub>4</sub>CO<sub>2</sub>H). Dessa näringsämnen återfinns i mycket svag koncentration i YNB, mellan 2 mikrogram och 400 mikrogram per liter (Open Wet Ware 2006). På grund av den låga koncentrationen av ämnena i kombination med den låga andelen av kväve i ämnena bedöms kvävehalten i YNB vara försumbar. YNB innehåller 1 gram kaliumsulfat (KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>) samt 0,5 gram magnesiumsulfat (MgSO<sub>4</sub>) per liter. Den sammanlagda koncentrationen av ammoniumkväve, fosfor, magnesium och svavel i näringsblandningen som användes av Hanscho et al. (2012) redovisas i tabell 6 (se bilaga 2).

**Tabell 6.** Koncentration av näringsämnen i studie av Hanscho et al. (2012), se bilaga 2

	<b>N-NH<sub>3</sub></b> <b>(mg)</b>	<b>P</b> <b>(mg)</b>	<b>S</b> <b>(mg)</b>	<b>Mg</b> <b>(mg)</b>
Per liter substrat	615	3,9	1 405	0,2
Per gram konsumerad glukos	51,3	0,3	117	0,01

Fosfor och magnesium finns i tillräcklig mängd i slammet. Ammoniumkväve och svavel behöver emellertid tillsättas enligt tabell 7 (se bilaga 2).

**Tabell 7.** Behov av tillsatta näringsämnen på Företaget i, se bilaga 2

	<b>N-NH<sub>3</sub></b>	<b>S</b>
Milligram per liter	449	879
Ton per år	8,6	16,8

I etanolproduktion, enligt metoden av Hanscho et al. (2012), skulle pH-värdet i substratet på Företaget behöva justeras nedåt från 6,1-6,6 till 5,7 med MES.

I bilaga 2 redovisas innehåll av aminosyror i äpplen (se tabell 24). Kommunalt reningsslam består av cirka 61 viktprocent (torrvikt) protein (aminosyror) (Chen et al. 2006). Ett antagande om att Företagets reningsslam har samma halt av aminosyror som kommunalt reningsslam samt att histidin utgör 3 viktprocent av alla aminosyror i Företagets reningsslam gjordes. Det antogs även att andelen aminosyror i koncentratet avspeglar sockerhalten i jämförelse med sockerhalten i äpplen. Utifrån dessa antaganden är det 2 gram histidin per liter i restströmmarna på Företaget. Då det endast behövs 35 milligram histidin per liter enligt studien av Hanscho et al. (2012) antogs att det finns tillräckligt med aminosyror i restströmmarna på Företaget.

#### **Alternativ och val av jästsvamp**

En studie av Ruiz et al. (2007) var den enda alternativa studie som hittades med fermentering i ett substrat där sockerhalten är jämförbar med sockerhalten i restströmmarna på Företaget. I denna studie används jästsvampen *Fusarium oxysporum* för fermentering i en glukoskoncentration av 25 gram per liter substrat. Utbytet av etanol är 0,38 gram per gram glukos.

Fermentering med *S. cerevisiae* BY4741 valdes för vidare analys eftersom utbytet är något högre och fermenteringen i studien av Hanscho et al. (2012) sker i en sockerhalt som ligger närmre sockerhalten i restströmmarna på Företaget jämfört med studien Ruiz et al. (2007). *S. cerevisiae* BY4741 antogs således kunna tillväxa i 9,1 gram socker per liter.

#### **Utbyte av etanol**

En etanolproduktion på 0,39 gram etanol per gram glukos skulle innebära en produktion av 69,2 ton etanol per år vid Företaget. Etanol har en densitet på 790 kilo per kubikmeter (SPBI 2010). Volymen etanol skulle således bli 87,5 kubikmeter per år (se bilaga 2).

### **Energibalans – system med etanolproduktion**

#### **Energivärde producerad etanol**

Etanol har ett energivärde på 5 900 kilowattimme eller 21 240 megajoule per kubikmeter (SPBI 2010). Det innebär att det per år kan produceras etanol med ett energivärde på 1 859 gigajoule av *S. cerevisiae* BY4741 på Företaget (se bilaga 3).

## Energianvändning etanolproduktion

### Malning av äppelskrutt och pressrester

I studien av Parmar och Rupasinghe (2013) mals pressrester av äpplen till en puré före fermentering. I en studie av De Marco et al. (2015) uppskattades energiåtgången för att mala 27,2 kilo äpplen till 0,108 megajoule elektricitet. För att mala ett ton äpplen krävs, baserat på denna uppskattning, en elanvändning på 3,97 megajoule. Samma energianvändning antogs krävas för malning av pressresterna på Företaget. Det innebär att det skulle krävas 1,8 gigajoule för att mala den årliga mängden äppelrester på Företaget (se bilaga 3).

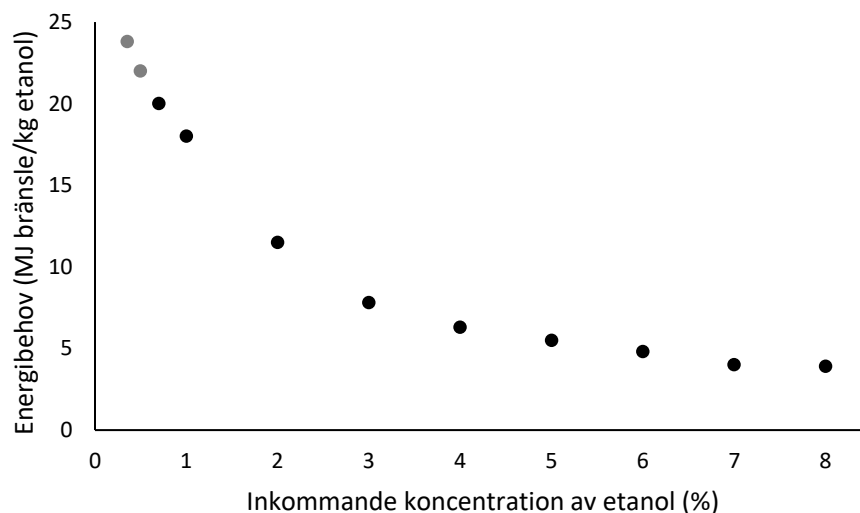
### Fermentering och hydrolys

Energianvändningen för CSTR i större skala brukar, enligt Najafpour (2007), ligga på mellan 0,5 och 5 kilowatt per kubikmeter (Najafpour 2007). Ett medelvärde på 2,75 kilowattimmar per kubikmeter (9,9 megajoule per kubikmeter) antogs vara rimligt vid fermenteringen på Företaget. Ett antagande om att substratets densitet är ett kilo per liter innebär att energianvändningen på Företaget skulle bli 193 gigajoule per år (se bilaga 3).

Omrörning och uppvärmning vid hydrolys antogs kräva högre energianvändning än fermenteringen eftersom temperaturen skulle vara 10 °C högre (enligt studien av Parmar och Rupasinghe 2013) samt att pressresterna har en högre TS-halt. 5 kilowattimmar per kubikmeter (18 megajoule per kubikmeter) antogs användas vid hydrolys av äppelresterna på Företaget. Det innebär en energianvändning på 8,3 gigajoule per år (se bilaga 3).

### Destillation

Energibehovet för destillation är beroende av den inkommande etanolkoncentrationen. Linjegrafen i figur 4 visar energibehovet i form av fossilt bränsle vid användning av metoden *thermally integrated stripper/rectifier system* med ånguppvärmd nedåtrinnande etanol, vilken beskrivs i inledningen (Vane 2008). Tabell 8 baseras på linjegrafen. De två värdena med lägst koncentration av inkommande etanol är uppskattade genom en förlängning av linjen i grafen (grå punkter).



**Figur 4.** Svarta punkter i grafen representerar energibehov (fossilt bränsle) för destillation av inkommande substrat med olika koncentrationer av etanol i substratet i en studie av Vane (2008). De grå punkterna representerar uppskattningar.

**Tabell 8.** Energibehov (fossilt bränsle) för destillation vid olika koncentrationer av etanol i substratet (Vane 2008). Kursiva siffror är uppskattade utifrån grafen i figur 5

<b>Etanolkoncentration (vikt%)</b>	<b>Energibehov destillation (MJ bränsle/kg etanol)</b>
0,355	23,8
0,5	22,0
0,7	20,0
1	18,0
2	11,5
3	7,8
4	6,3
5	5,5
6	4,8
7	4,0
8	3,9

På Företaget är den teoretiska koncentrationen av etanol 0,355 viktprocent (se bilaga 3). Energibehovet beräknat på användning av fossila bränsle är, enligt Vane (2008), tre gånger så stort som energianvändning från elektricitet. Detta innebär att energianvändningen för elektricitet vid destillation på musteriets skulle bli 7,9 megajoule per kilo etanol. Energikonsumtionen per år på Företaget skulle, enligt uppskattningen, bli 548 gigajoule (se bilaga 3).

Energianvändningen för vakuumdestillation, en metod då ytterligare avvattning inte behövs, är 10,3 MJ per liter substrat (Capareda 2014). Det antogs emellertid att energianvändningen även för denna metod är beroende av den ingående koncentrationen av etanol. Då information om energianvändning vid olika etanolkoncentrationer inte hittades för denna teknik valdes inte metoden för vidare analys. Istället valdes metoden där destillation sker genom ånguppvärmd nedåtrinnande etanol med separat kolonn för uttag av etanol (thermally integrated stripper/rectifier system).

#### **Avvattning**

Energikonsumtion för avvattning genom tertiär azeotrop destillation med återanvändning av tillsatt kemikalie är 9,4 megajoule per liter inkommande substrat, medan avvattning med storleksselektiva molekylsilar endast kräver 0,12-0,16 megajoule per liter substrat (Capareda 2014). Avvattning med storleksselektiva molekylsilar valdes därför som avvattningsmetod. Medelvärdet 0,14 megajoule per liter skulle på Företaget ge en energianvändning för avvattning på 12,7 gigajoule per år (se bilaga 3).

#### **Transport till Biogas Kristianstad AB**

En sammanställande studie av Wilkie et al. (2000) visade att det bildas 12-20 liter vinass per liter producerad etanol vid destillation. Ett medelvärde på 16 liter vinass per liter etanol antogs för Företaget. Detta innebär en produktion av 1 401 kubikmeter vinass per år. Ett antagande om en densitet på ett ton per kubikmeter innebär att 1 401 ton vinass behöver hämtas upp på Företaget årligen.

Lastbilarna som hämtar upp substrat till Kristianstad Biogas AB tar ungefär 32 ton last per upphämtning och drar 5 liter HVO per mil.<sup>19</sup> Energivärdet för HVO som bränsle är

<sup>19</sup> Tore Sigurdsson affärsområdeschef C4 Energi Biogas, mejlkontakt den 24 april 2017.

9 440 kilowattimme per kubikmeter (Miljöfordon.se 2018b). Biogas Kristianstad AB ligger i Karpalund utanför Kristianstad. Sträckan mellan Kivik och Karpalund är 5,1 mil (se.avstånd.org u.å.).

Det går åt 2 244 liter HVO per år för transportererna fram och tillbaka vid upphämtning av vinass. Energianvändning för upphämtning av vinass då HVO-lastbilar kör fram och tillbaka från Karpalund skulle bli 76,3 gigajoule (se bilaga 3).

### **Vinassens biogaspotential**

I studien av Wilkie et al. (2000) redovisas ett spann på mellan 0,45 och 1,33 kg COD per producerad liter etanol i olika sorters melass samt majs. Spannet av COD-innehåll i vinass i olika studier är således stort och det är svårt att uppskatta hur stor andel COD vinassen på Företaget skulle innehålla. För att inte riskera att överskatta biogaspotentialen i vinassen från Företaget användes det lägsta uppmätta värdet, det vill säga 0,45 gram COD per liter.

Genom användning av vinass till biogasproduktion kan, enligt Khatiwada och Silveira (2009), 0,53 kubikmeter (Nm<sup>3</sup>) biogas (68 % metan) produceras per kilo COD. Energivärdet för en kubikmeter (Nm<sup>3</sup>) biogas är, enligt författarna, 23,65 megajoule. Av vinassen på Företaget skulle biogas med ett energivärde på 494 gigajoule per år kunna produceras (se bilaga 3).

### **Energianvändning vid biogasrötning och uppgradering till fordonsgas**

Kristianstad Biogas AB använder ungefär 3 gigawattimmar elektricitet per år och har en produktion på cirka 57,7 gigawattimmar biogas.<sup>20</sup> Det innebär att det går åt ungefär 0,052 gigawattimmar elektricitet per producerad gigawattimme biogas eller 0,052 megajoule per megajoule producerad biogas. Rötning av den biogas som antas kunna produceras av vinassen på Företaget innebär således en energianvändning på 25,7 gigajoule per år (se bilaga 3).

För att kunna använda biogas som fordonsgas behöver biogasen uppgraderas genom att orenheter och gaser filtreras bort till ett metaninnehåll på cirka 97 procent (Ecotraffic 2015; RVF Utveckling 2004). Det går åt cirka 0,28 kilowattimme elektricitet för att uppgradera en kubikmeter (Nm<sup>3</sup>) biogas till fordonsgas.<sup>21</sup> Uppgradering av den gas som kan produceras av vinassen på Företaget skulle kräva 21,0 gigajoule elektricitet per år (se bilaga 3).

### **Metanemissioner vid biogasrötning och uppgradering till fordonsbränsle**

Metanutsläpp vid biogasanläggningen har ett energivärde på ungefär 1,5 procent av den producerade biogasen.<sup>22</sup> Den vinass som skulle kunna rötas i ett system med etanolproduktion vid Företaget skulle ge upphov till emissioner av metan med ett energivärde på 7,4 gigajoule per år (se bilaga 3).

Utsläpp av metan och små mängder av andra restgaser vid uppgradering till fordonsgas utgör cirka 1 procent av biogasens energivärde.<sup>23</sup> I systemet med etanolproduktion antogs att det bara är metan som skulle släppas ut vid uppgraderingen till fordonsgas. Energivärdet för metanemissionerna skulle då bli 4,9 gigajoule per år (se bilaga 3).

---

<sup>20</sup> Bengt Stuhre ansvarig råvaror/biogödsel Kristianstad Biogas AB, mejlkontakt den 20 mars 2017.

<sup>21</sup> Fredrik Nilsson chef affärsområde biogas Malmberg Water AB, mejlkontakt den 30 mars 2017.

<sup>22</sup> Bengt Stuhre ansvarig råvaror/biogödsel Kristianstad Biogas AB, mejlkontakt den 20 mars 2017.

<sup>23</sup> Fredrik Nilsson chef affärsområde biogas Malmberg Water AB, mejlkontakt den 30 mars 2017.



## Total energibalans

I tabell 9 presenteras en sammanställning av energiproduktion och energianvändning samt nettoenergiebalansen i systemet med etanoltillverkning vid Företaget.

**Tabell 9.** Energiebalans för system med etanoltillverkning

Steg i process	Energiebalans (GJ/år)
Energievärde etanol	1 859
Malning av äppelrester	-1,8
Hydrolys	-8,3
Fermentering	-193
Destillation	-548
Avvattning	-12,7
Transport av vinass	-76,3
Energievärde biogas	494
Biogasproduktion vinass	-25,7
Uppgradering till fordonsgas	-21,0
Utsläpp av metan vid biogasrötning	-7,4
Utsläpp av metan vid uppgradering	-4,9
Nettoenergiebalans	1 454

Energiebalansen blir i systemet 0,4 megajoule per megajoule producerad etanol då biogasproduktionen av vinass inte räknas in. Då biogasproduktionen av vinass räknas in blir energiebalansen 0,2 megajoule per megajoule producerad etanol.

## **Klimatpåverkan – system med etanolproduktion**

### **Fermentering**

Utifrån formeln för bildandet av etanol av socker bildas 955,3 gram koldioxid per kilo etanol vid fermentering. Per år skulle en etanoltillverkning på Företaget ge upphov till 66,1 ton koldioxid (se bilaga 4).

### **Elanvändning**

Nordisk elmix ger, enligt Energi- och klimatrådgivningen (2018), upphov till cirka 60 gram koldioxidekvivalenter per kilowattimme. Öresundskraft, som är en stor säljare av el i Skåne, sålde emellertid år 2017 el som i genomsnitt gav upphov till 141 gram koldioxidekvivalenter per kilowattimme (Öresundskraft 2018). I denna studie användes ett medelvärde mellan dessa båda uppskattningar, det vill säga 100,5 gram koldioxidekvivalenter per kilowattimme eller 27,9 gram koldioxidekvivalenter per megajoule. Klimatutsläpp från användning av elektricitet i systemet med etanolproduktion blir 22,6 ton koldioxidekvivalenter per år (se bilaga 4).

### **Klimatutsläpp som förhindras vid etanolanvändning**

Energievärden för bensin och diesel redovisas i tabell 10.

**Tabell 10.** Energievärde för bensin och diesel

	Energievärde (kWh/m <sup>3</sup> ) <sup>1</sup>	Energievärde (MJ/m <sup>3</sup> ) <sup>2</sup>
Bensin	9 100	32 760
Diesel (mk1)	9 800	35 280

<sup>1</sup> SPBI (2010).

<sup>2</sup> Omräkning till megajoule per kubikmeter för att underlätta användning av energievärdet i den aktuella studien.

Ett medelvärde på 34 020 megajoule per kubikmeter antogs för fossila bränslen. Bensin ger upphov till 2 941 kilo koldioxidekvivalenter per kubikmeter och diesel ger upphov till 2 817 kilo koldioxidekvivalenter per kubikmeter i well-to-wheel-analyser (Miljöfordon.se 2018b). Ett medelvärde på 2 879 kilo koldioxidekvivalenter per kubikmeter antogs. Den etanol som skulle kunna produceras på Företaget leder utifrån dessa förutsättningar till att klimatutsläpp på 157 ton koldioxidekvivalenter per år undviks genom att ersätta cirka 54,7 kubikmeter fossila bränslen (se bilaga 4).

### **Transport av restprodukter**

Enligt well-to-wheel-analys ger HVO upphov till utsläpp på cirka 472 kilo koldioxidekvivalenter per kubikmeter (Miljöfordon.se 2018b). För de 2 244 liter HVO som skulle användas vid upphämtning av vinass till Kristianstad Biogas AB (sträcka fram och tillbaka) blir klimatutsläppet således cirka 1,1 ton koldioxidekvivalenter per år (se bilaga 4).

### **Klimatutsläpp vid rötning och uppgradering av biogas**

Energivärdet för metan är 13,9 kilowattimme per kilo och vikten koldioxidekvivalenter är 25 kilo per kilo metan (Gröna bilister 2012; Lantz et al. 2009).

Metanutsläpp vid biogasrötning av vinassen skulle ge upphov till metanutsläpp på 3,7 ton koldioxidekvivalenter per år (se bilaga 4).

Uppgradering av biogasen som kan produceras av vinassen skulle ge emissioner på 2,4 ton koldioxidekvivalenter per år (se bilaga 4).

### **Klimatutsläpp som förhindras vid biogasanvändning**

Biogas av vinass som bildas vid etanolproduktion på Företaget skulle ge minskade klimatutsläpp på 41,8 ton koldioxid per år genom att ersätta cirka 14,5 kubikmeter fossila bränslen (se bilaga 4).

### **Sammanfattning av klimatpåverkan**

En sammanställande redovisning av klimatpåverkan i systemet med etanolproduktion på Företaget redovisas i tabell 11.

**Tabell 11.** Klimatpåverkan i system med etanoltillverkning

<b>Steg i system</b>	<b>Klimatpåverkan (ton CO<sub>2</sub>-ekv./år)</b>
Omvandling vid fermentering	66,1
Elanvändning	22,6
Etanol ersätter fossila bränslen	-157
Transport av vinass	1,1
Metanutsläpp vid biogasrötning	3,7
Metanutsläpp vid uppgradering	2,4
Biogas ersätter fossila bränslen	-41,8
Nettoklimatpåverkan	-103

Per producerad megajoule etanol skulle utsläppen av koldioxidekvivalenter bli 29,0 gram utan avdrag för att etanol ersätter fossila bränslen, men med biogasproduktion av restprodukter inräknad.

Per producerad megajoule etanol skulle utsläppen av koldioxidekvivalenter bli 61,8 gram utan avdrag för att etanol ersätter fossila bränslen och utan att biogasproduktion av restprodukter räknas in.

## Potential för biodieselproduktion

### Biodieselproduktion av substratet

#### Odling av *Candida 107*

Liksom vad det gäller etanolproduktion finns få studier avseende odling av oljebildande jästsvamp vid låga sockerkoncentrationer. I en studie av Gill et al. (1977) undersöks emellertid lipidutbytet av jästsvampen *Candida 107* i substrat med en glukoskoncentration på 12 gram per liter.

*C. 107* ger vid en koncentration på 30 gram glukos per liter ett utbyte på 28,6 procent lipider (torr cellvikt) i en två stegs satsreaktor (Hall & Ratledge 1977). Jästsvampen är således per definition en oljebildande jästsvamp.

Substratet med 12 gram glukos per liter består, i studien av Gill et al. (1977), även av 1,5 gram jästextrakt, 3 gram ammoniumklorid ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ), 7,0 gram kaliumfosfat ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ), 2 gram natriumfosfat ( $\text{NaHPO}_4$ ), 1,5 gram magnesiumsulfat ( $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ), 0,2 gram kalciumklorid ( $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ), 0,1 gram järnklorid ( $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ), 0,001 gram zinksulfat ( $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) och 0,001 gram biotin. pH-värdet justeras till 5,5 med saltsyra (HCl) och odlingen sker i 30 °C med omrörning i 1000 rpm med lika volym luft som volym medium (Gill et al. 1977). Den sammanlagda koncentrationen av ammoniumkväve, fosfor, svavel och magnesium per liter substrat samt per gram konsumerad glukos i studien av Gill et al. (1977) redovisas i tabell 12 (se bilaga 5).

**Tabell 12.** Koncentration av näringsämnen i studien av Gill et al. (1977) (se bilaga 5)

	N-NH <sub>3</sub> (mg)	P (mg)	S (mg)	Mg (mg)
Per liter	524	2120	14	110
Per gram konsumerad glukos	17,4	70,7	0,005	3,7

Restströmmarna på Företaget har lägre halter av ammoniumkväve, fosfor och magnesium än vad som används i substratet i studien av Gill et al. (1977). För att komma upp i samma koncentrationer krävs ett tillskott enligt tabell 13 (se bilaga 5). Det antogs att det finns tillräckligt med resterande av näringsämnena i restströmmarna på Företaget.

**Tabell 13.** Behov av tillsatta näringsämnen på Företaget (se bilaga 5)

	N-NH <sub>3</sub>	P	Mg
Milligram per liter	323	614	6,4
Ton per år	1,2	11,7	0,1

Enligt metoden av Gill et al. (1977) skulle pH-värdet i substratet på Företaget behöva justeras nedåt från 6,1-6,6 till 5,5 med saltsyra.

I studien av Gill et al. (1977) är lipidutbytet mellan 9,4 och 11,3 viktprocent (torrvikt) av biomassan med ett medelvärde på 10,25 viktprocent. Torr vikten biomassa ligger på mellan 5,5 och 7,0 gram per liter med ett medelvärde på 6,1 gram per liter (Gill et al. 1977). Restströmmarna på Företaget skulle, baserat på studien av Gill et al. (1977), ge en biomassa på 4,6 gram per liter och ett utbyte av biodiesel på 9,4 ton lipider (se bilaga 5).

#### Alternativ och val av oljebildande jästsvamp

Karatay och Dönmez (2010) undersöker i en studie lipidutbytet (torr cellvikt) av jästsvamparna *Candida lipolytica*, *Candida tropicalis* och *Rhodotorula mucilaginosa*. De använder bland annat ett substrat med sex viktprocent melass och 1 gram ammoniumsulfat ( $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ) per liter i pH-värde 5. Resultatet redovisas i tabell 14.

Författarna undersöker i studien även lipidutbyte vid olika pH-värden och finner att bäst utbyte sker vid pH 5.

**Tabell 14.** Ungefärligt lipidutbyte vid olika melasskoncentrationer i substrat med jästsvamparna *C. lipolytica*, *C. tropicalis* och *R. mucilaginosa* vid pH 5 och 1 gram ((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) per liter (Karatay & Dönmez 2010)

Melasshalt	6 %	8 %	10 %
<i>C. lipolytica</i> (lipid%)	16,3	59.9	32.1
<i>C. tropicalis</i> (lipid%)	24,2	46.8	26.6
<i>R. mucilaginosa</i> (lipid%)	38,5	69.5	49.3

Melass har en koncentration av sukros på cirka 33 viktprocent, 5 viktprocent glukos och 7 viktprocent fruktos (Chotineeranat et al. 2010). Sammantaget är det således en sockerhalt på 45 viktprocent i melass. Det innebär att substratet med 6 viktprocent melass har en sockerhalt på 2,7 viktprocent.

Det är svårt att förutsäga lipidutbytet på Företaget med de oljebildande jästsvampar som används i studien av Karatay och Dönmez (2010), där sockerhalten är relativt mycket högre än restströmmarna på Företaget även i substratet med den lägsta halten av melass. Utbytet av lipider är dessutom lägst vid den lägsta melasshalten för samtliga av de oljebildande jästsvamparna i studien av Karatay och Dönmez (2010). Sockerhalten i studien av Gill et al. (1977) ligger närmare sockerhalten på Företaget. Baserat på dessa faktorer valdes studien av Gill et al. (1977) som underlag för att beräkna utbytet av lipider av restströmmarna på Företaget.

### **Biodieselproduktion av återcirkulerad glycerol**

Santamauro et al. (2014) odlar i en studie jästsvampen *Metschnikowia pilcherrima* i substrat med 1 viktprocent glycerol. Jästsvampen har en cellvikt på cirka 3,7 gram per liter substrat och en lipidhalt på 20 viktprocent efter 15 dagar i 20 °C. Vid 25 °C minskar biomassan med 20 viktprocent och lipidhalten till cirka 16 procent av biomassan.

Eftersom högre temperaturer, enligt studien av Santamauro et al. (2014), har en negativ effekt på tillväxten och lipidhalten samt att utbytet vid odling vid 30 °C (som *C. 107* bör odlas i) är ovisst så bedömdes det inte vara värdefullt att återcirkulera glycerolen för samodling av *Metschnikowia pilcherrima* och *C. 107*. Istället utreddes biogaspotentialen för den glycerol som skulle bildas vid biogastillverkningen på Företaget.

### **Val av extraktionsmetod**

Torkning av biomassa är, som tidigare nämnts, mycket energikrävande (Salam et al. 2016). För att minimera energianvändningen på Företaget analyserades extraktionsmetoder för endast centrifugerad (inte torkad) biomassa.

Zhang et al. (2014) jämför olika studier vad det gäller lipidutbyte vid skilda extraktionsmetoder för centrifugerad biomassa av den oljebildande jästsvampen *Trichosporon oleaginosus* (ATCC20509). När en blandning av kloroform och metanol används ligger utbytet på mellan 89,6 och 99,71 procent av de lipider som jästsvampen bildar. I en egen studie av Zhang et al. (2014) ger extraktion med endast 0,3 milliliter metanol per gram lipider tillsammans med ultraljud 70,8 procents lipidutbyte. Extraktion med 50 milliliter hexan per gram lipider tillsammans med ultraljud ger, enligt författarnas egen studie, ett utbyte på 32,3-40,2 procent.

Även om en blandning av metanol och kloroform ger högst utbyte valdes inte detta alternativ för Företaget beroende på de negativa effekter som kloroform har på miljö och hälsa (Prevent u.å.).

Energianvändning för produktion av hexan är 60.9 megajoule per kilo och för produktion av metanol är energianvändningen 7.4 megajoule per kilo (Karlsson et al. 2016).

Då både erforderad volym och energianvändning för produktion är större för hexan än för metanol samtidigt som utbytet är lägre vid hexanextraktion så valdes extraktion med metanol (tillsammans med ultraljud) som extraktionsmetod i denna studie.

Extraktion med metanol och ultraljud ger, baserat på studien av Zhang et al. (2014), ett årligt utbyte av lipider på 6,6 ton på Företaget (se bilaga 5).

### **Utbyte av biodiesel**

I studien av Gill et al. (1977) är andelen transesterifierbara fettsyror, enligt kriterier av Vicente et al. (2009), 98,7 viktprocent av lipiderna efter 15 dagar i en odling som kontinuerligt hålls i sockerkoncentrationen 12 gram per liter. Denna siffra antogs vara representativ för odling av *C. 107* på Företaget, vilket innebär att 6,5 ton biodiesel skulle kunna produceras (se bilaga 5).

Densiteten hos FAME är 884 kilo per kubikmeter (SPBI 2010). De 6,5 ton biodiesel som skulle kunna produceras på Företaget motsvarar således 7,4 kubikmeter (se bilaga 5).

## ***Energibalans – system med biodieselproduktion***

### **Energivärde producerad biodiesel**

Energivärdet för FAME är 9150 kilowattimmar eller 32 900 megajoule per kubikmeter (SPBI 2010). Energivärdet i den producerade biodieseln på Företaget skulle således bli 243 gigajoule (se bilaga 6).

### **Energianvändning biodieselproduktion**

#### ***Malning samt hydrolys av äppelrester***

Energianvändning för malning av äppelrester skulle vid biodieselproduktion, liksom i systemet med etanolproduktion, bli 1,8 gigajoule per år.

Även energianvändning för hydrolys skulle bli lika stor vid biodieselproduktion som vid etanolproduktion på Företaget, det vill säga 8,3 gigajoule per år.

#### ***Odling***

Vid odling av oljebildande jästsvampar förutsätts användning av CSTR, precis som vid fermentering till etanol. Omrörningshastigheten är emellertid betydligt högre vid odling av *C. 107* (1 000 rpm jämfört med 180 rpm) enligt studien av Gill et al. (1977).

Jästtillväxten är som högst när omrörning sker i intensiteter mellan 0,03 och 0,25 watt per kilo eller 0,03-0,25 kilowatt per kubikmeter vid en antagen densitet på ett kilo per liter (Nienow et al. 2010). Energianvändningen för omrörning är således en relativt liten del av den totala energianvändningen, som brukar ligga mellan 0,5 och 5 kilowatt per kubikmeter vid fermentering (Najafpour 2007).

Ett påslag på 0,20 kilowatt per timme eller 0,72 megajoule per kubikmeter antogs för omrörning på 1 000 rpm i odlingen av *C. 107* på Företaget. Det innebär en energianvändning på 10,6 megajoule per kubikmeter, vilket leder till en energianvändning på 207 gigajoule per år (se bilaga 6).

#### ***Centrifugering***

Enligt Tredici et al. (2015) är energianvändningen 1,2 kilowattimmar per kubikmeter för centrifugering av ett substrat med en cellkoncentration av mikroalger på 1,9 gram (torrvikt) per liter. 4,6 gram (torrvikt) biomassa per liter i restströmmarna på Företaget innebär att det behövs 2,42 gånger mindre energianvändning per gram torr cellbiomassa

för substratet på Företaget till följd av den högre cellkoncentrationen. Det skulle således krävas 1,8 megajoule per kubikmeter och totalt 35,1 gigajoule per år (se bilaga 6).

#### *Extraktion med förbehandling*

Vid förbehandling genom ultraljud av mikroalger i ett flöde på 0,3-1,5 kubikmeter per timme krävs 16 kilowatt (Heilscher 2018). Detta innebär i medeltal en energianvändning på 64 megajoule per kubikmeter (se bilaga 6). 4,6 gram (torrvikt) biomassa per liter innebär att det i restströmmarna på Företaget skulle bli en total cellbiomassa på 89,6 ton (torrvikt). Efter centrifugering av mikroalger ligger TS-halten vanligen på 15-20 procent (Fasaei et al. 2018). Denna TS-halt antogs bli resultatet även efter centrifugering av jästsvampceller. Ett medelvärde på 17,5 procent TS-halt användes för vidare analys. Biomassan antogs ha en densitet på ett kilo per liter. Utifrån dessa förutsättningar skulle energianvändning för ultraljud ligga på 32,8 gigajoule per år vid biodieselproduktion på Företaget (se bilaga 6).

I den egna studien av Zhang et al. (2014) används, som tidigare nämnts, 0,3 milliliter metanol per gram lipider. På Företaget skulle 2,8 kubikmeter metanol behövas för extraktion av de 9,4 ton lipider som kan utvinnas per år. Densiteten för metanol är 793 kilo per kubikmeter (Statoil 2002). Energinvändning för metanol är, som nämnts, 7,4 megajoule per kilo (Karlsson et al. 2016). Det innebär att energianvändningen för produktion av metanol för extraktion på Företaget blir 16,4 gigajoule per år (se bilaga 6).

Enligt Yuan et al. (2015) är elanvändningen för extraktion med hexan 0,2 megajoule per kilo biomassa (torrvikt) av oljebildande mikroalger. Samma elanvändning antogs krävas vid extraktion av lipider hos *C. 107* med metanol. Energinvändningen skulle därmed bli 17,9 gigajoule per år på Företaget (se bilaga 6).

#### *Transesterifiering*

Batan et al. (2010) genomförde en livscykelanalys av biodieselproduktion med mikroalger som råvara. Alla lipider antogs i studien vara triglycerider, det vill säga möjliga att genomgå transesterifiering. Energinvändningen för transesterifieringen var 2,10 megajoule per kilo biodiesel för uppvärmning med naturgas samt 0,03 kilowattimmar (0,10 megajoule) elektricitet per kilo biodiesel. Denna metod för transesterifiering antogs även kunna användas på Företaget dock med elektricitet som energikälla istället för naturgas. Den totala energianvändningen för transesterifiering blir, baserat på dessa antaganden, 5,2 gigajoule per år på Företaget (se bilaga 6).

Behovet av metanol vid transesterifieringen är en tiondel av biodieselproduktionen vid ett antagande om att alla lipider omvandlas till biodiesel (Capareda 2014). Detta innebär att 654 kilo metanol per år krävs för transesterifieringen på Företaget. Energinvändning för den metanol som behövs för transesterifieringen på Företaget är 4,8 gigajoule per år (se bilaga 6).

I studien av Batan et al. (2010) användes 0,005 gram natriumhydroxid som katalysator per kilo biodiesel. Baserat på studien av Batan et al. (2010) behövs 3,27 gram natriumhydroxid vid transesterifiering per år på Företaget. Energinvändning för produktion av natriumhydroxid är 42,8 megajoule per kilo (Karlsson et al. 2016). Ett antagande om användning av natriumhydroxid som katalysator skulle innebära att energianvändningen för produktion av katalysator blir 0,1 megajoule per år. Denna energianvändning bedömdes vara försumbar.

#### **Transport till Biogas Kristianstad AB**

Energinvändning för transport av restbiomassa och glycerol mellan Företaget och Biogas Kristianstad AB (fram och tillbaka) skulle bli 8,7 gigajoule per år (se bilaga 6).

### **Biogasproduktion av restbiomassa**

Biogasproduktion av restbiomassa (VS-halt cirka 8,7 gram per liter och TS-halt cirka 12,7 gram per liter) av jästsvampen *Rhodosporiodum toruloides* NCYC 921 efter lipidextraktion ger ett metanutbyte på cirka 334 milliliter per gram flyktiga fasta ämnen (VS) (Marques et al. 2018). Restbiomassan efter lipidextraktion av *C. 107* antogs ha samma VS-halt och metanutbyte som restbiomassan efter lipidextraktion av *R. toruloides* NCYC 921 i studien av Marques et al. (2018).

Energivärdet för metan är 9,97 kilowattimme per kubikmeter (Nm<sup>3</sup>) (Avfall Sverige 2015).

Den totala energiproduktionen genom rötning av restbiomassan vid biodieselproduktion på Företaget skulle, utifrån dessa förutsättningar, bli 933 gigajoule per år (se bilaga 6).

### **Biogasproduktion av glycerol**

Som tidigare nämnts uppgår glycerolproduktionen vid transesterifiering till en tiondel av vikten producerad biodiesel (Capareda 2014). Det innebär att det skulle bildas 654 kilo glycerol per år på Företaget.

I en studie av Robra et al. (2010) ligger biogasproduktionen av kogödsel tillsammans med glycerol från biodieseltillverkning på 825,3 milliliter per gram VS vid 5 procents inblandning av glycerol och på 825,7 milligram per gram VS vid 10 procents inblandning av glycerol. Utan glycerol är biogasutbytet endast 268,6 milligram per gram VS. Glycerolen ger således ett tillskott på i medeltal 556,9 milligram per gram VS. Metanvärdet i biogasen blir i studien, 9,5 respektive 14,3 procent högre när glycerol blandas in i substratet. Glycerol som bildats vid biodieselproduktion har ett VS-innehåll på cirka 924 gram per kilo (Rodríguez-Abalde et al. 2017).

Då koncentrationen av glycerol i substratet på Kristianstad Biogas AB skulle vara mycket liten så räknades ökningen av metanhalten i biogasen inte in i analysen. Baserat på dessa förutsättningar skulle energivärdet för biogasen från rötning av glycerol i systemet med biodieselproduktion på Företaget bli 8,0 gigajoule per år (se bilaga 6).

### **Energianvändning vid biogasrötning och uppgradering till fordonsgas**

Energianvändning vid biogasrötning av restbiomassa och glycerol skulle i systemet med biodieseltillverkning uppgå till 48,9 gigajoule per år (se bilaga 6).

Energianvändning vid uppgradering av den producerade biogasen till fordonsgas skulle bli 40,1 gigajoule per år (se bilaga 6).

### **Metanemissioner vid biogasrötning och uppgradering till fordonbränsle**

Rötning av biomassa och glycerol i systemet med biodieselproduktion skulle ge upphov till emissioner av metan med ett energivärde på 14,1 gigajoule per år (se bilaga 6).

Ett antagande om att det endast är metan som släpps ut vid uppgradering av biogas till fordonbränsle skulle innebära emissioner med ett energivärde på 9,3 gigajoule per år (se bilaga 6).

### **Total energibalans**

I tabell 15 presenteras en sammanställning av energiproduktion och energianvändning samt nettoenergibalansen i systemet med biodieseltillverkning vid Företaget.

**Tabell 15.** Energibalans för system med biodieseltillverkning

<b>Steg i process</b>	<b>Energibalans (GJ/år)</b>
Biodieselproduktion	243
Malning av äppelrester	-1,8
Hydrolys	-8,3
Odling av <i>C. 107</i>	-207
Centrifugering	-35,1
Produktion av metanol till extraktion	-16,4
Extraktionsprocess	-17,9
Ultraljud	-32,8
Transesterifiering (elanvändning)	-5,2
Produktion av metanol till transesterifiering	-4,8
Transport restprodukter	-8,7
Biogasproduktion biomassa	933
Biogasproduktion glycerol	8,0
Biogasrötning	-48,9
Uppgradering till fordonsgas	-40,1
Utsläpp av metan vid biogasrötning	-14,1
Utsläpp av metan vid uppgradering	-9,3
Nettoenergibalans	734

Energibalansen blir i systemet 1,3 megajoule per megajoule producerad biodiesel då biogasproduktion av restprodukter inte räknas in. Energibalansen blir – 2,0 gigajoule per megajoule producerad biodiesel när biogasproduktion av restprodukter räknas in.

### ***Klimatpåverkan – system med biodieselproduktion***

#### **Klimatutsläpp vid odling av jästsvamp**

Utifrån formlerna för produktion av triglycerider av oljebildande jästsvamp (Chatzifragkou et al. 2014) ger ett kilo triglycerider upphov till emissioner på 5,8 kilo koldioxid. Vid omvandling av socker till lipider av *C. 107* på Företaget skulle det således bildas 53,7 ton koldioxid per år (se bilaga 7).

#### **Klimatutsläpp vid elanvändning**

Elanvändningen i systemet med produktion av biodiesel skulle ge upphov till klimatutsläpp på 11,7 ton koldioxidekvivalenter per år (se bilaga 7).

#### **Klimatutsläpp som förhindras genom användning av biodiesel**

Den biodiesel som skulle kunna produceras på Företaget skulle ersätta cirka 7,1 kubikmeter fossila bränslen per år och skulle därmed minska klimatutsläpp med 20,6 ton koldioxidekvivalenter per år (se bilaga 7).

#### **Klimatutsläpp vid transport av restprodukter**

Vid transport av restprodukter till Kristianstad Biogas AB (fram och tillbaka) skulle det uppstå klimatutsläpp på 0,1 ton koldioxidekvivalenter per år (se bilaga 7).

#### **Klimatutsläpp vid rötning och uppgradering av biogas**

Vid biogasrötning av restprodukterna skulle det ske metanutsläpp motsvarande 7,1 ton koldioxidekvivalenter per år.

Vid uppgradering skulle metanutsläppen bli 4,6 ton koldioxidekvivalenter per år (se bilaga 7).



## Klimatutsläpp som förhindras genom användning av biogas

Den biogas som skulle kunna produceras av restprodukter från biogasproduktion på Företaget skulle kunna ersätta cirka 27,7 kubikmeter fossila bränslen per år och på sätt minska klimatutsläpp med 79,6 ton koldioxidekvivalenter per år (se bilaga 7).

## Sammanfattning av klimatpåverkan

En sammanställande redovisning av klimatpåverkan i systemet med biodieselproduktion redovisas i tabell 16.

**Tabell 16.** Klimatpåverkan i system med biodieseltillverkning

Steg i system	Klimatpåverkan (ton CO <sub>2</sub> -ekv./år)
Omvandling av jästsvamp	53,7
Elanvändning	11,7
Biodiesel ersätter fossila bränslen	-20,6
Transport av restprodukter	0,1
Metanutsläpp vid biogasrötning	7,1
Metanutsläpp vid uppgradering	4,6
Biogas ersätter fossila bränslen	-79,6
Nettoklimatpåverkan	-23,0

Per producerad megajoule biodiesel skulle utsläppen av koldioxidekvivalenter minska med 9,9 gram utan avdrag för att biodiesel ersätter fossila bränslen, men med biogasproduktion av restprodukter inräknad.

Per producerad megajoule biodiesel skulle utsläppen av koldioxidekvivalenter bli 269 gram utan avdrag för att biodiesel ersätter fossila bränslen utan biogasproduktion av restprodukter inräknad.

## Jämförelse mellan etanol- och biodieselproduktion

### Producerad mängd etanol och biodiesel

Baserat på antagna förutsättningar kan det produceras 87,5 kubikmeter eller 69,2 ton etanol alternativt 7,4 kubikmeter eller 6,5 ton biodiesel per år på Företaget.

### Energibalanser

I tabell 17 presenteras energivärden och energibalanser för systemen med etanol- respektive biodieselproduktion.

**Tabell 17.** Energibalanser vid etanol- respektive biodieselproduktion

	System med etanolproduktion	System med biodieselproduktion
Producerad etanol/biodiesel (GJ/år)	1 859	243
Nettoenergibalans (GJ/år)	1 454	734
Energianvändning (MJ/MJ <sub>biobränsle</sub> ) utan biogasproduktion	0,4	1,3
Energianvändning (MJ/MJ <sub>biobränsle</sub> ) inklusive biogasproduktion	0,2	-2,0

### Klimatpåverkan

I tabell 18 redovisas skillnaderna avseende klimatpåverkan för systemen med etanol- respektive biodieselproduktion.

**Tabell 18.** Klimatpåverkan vid etanol- respektive biodieselproduktion

	System med etanolproduktion	System med biodieselproduktion
Nettoklimatpåverkan per år (ton CO <sub>2</sub> -ekv.)	-103	-23,0
Klimatpåverkan per MJ <sub>biobränsle</sub> (g CO <sub>2</sub> -ekv.) <sup>1</sup>	29,0	-9,9
Klimatpåverkan per MJ <sub>biobränsle</sub> (g CO <sub>2</sub> -ekv.) <sup>2</sup>	61,8	269

<sup>1</sup>Utan avdrag för att etanol/biodiesel ersätter fossila bränslen.

<sup>2</sup>Utan avdrag för att etanol/biodiesel ersätter fossila bränslen samt utan biogasproduktion av restprodukter inräknad.

### Behov av tillsatser

I tabell 19 redovisas behov av tillsatta näringsämnen vid etanol- respektive biodieselproduktion av restströmmarna på Företaget.

**Tabell 19.** Behov av tillsatta näringsämnen vid etanol- respektive biodieselproduktion

	System med etanolproduktion (ton/år)	System med biodieselproduktion (ton/år)
Ammoniumkväve	8,6	1,2
Fosfor	0	11,7
Svavel	16,8	0
Magnesium	0	0,1

En sänkning av pH-värdet behövs i båda systemen enligt de rådande förutsättningarna. I systemet med etanolproduktion behöver pH-värdet sänkas från 6,1-6,6 till 5,7 med MES. I systemet med biodieselproduktion behöver pH-värdet sänkas till 5,5 med saltsyra.

## Diskussion

### **Utvärdering av resultat**

#### **Sammanfattande bedömning av resultat**

Både systemet med etanolproduktion och systemet med biodieselproduktion ger ett positivt nettoenergiutbyte och innebär en minskad nettoklimatpåverkan. Teoretiskt sett är det således motiverat med både etanol- och biodieselproduktion av restströmmarna på Företaget ur energi- och klimatperspektiv.

Enligt resultaten sker ett betydligt större utbyte av etanol (1 859 gigajoule per år) än av biodiesel (243 gigajoule per år) av restströmmarna. Även sett till nettoenergibalans ger etanolproduktion ett avsevärt högre energiutbyte (1 454 gigajoule per år) jämfört med biodieselproduktion (734 gigajoule per år). Räknat per megajoule producerad etanol/biodiesel är emellertid systemet med biodieselproduktion mer effektivt när produktion av biogas av restprodukter räknas in. Nettoenergibalansen bedöms emellertid vara av större vikt i denna studie än energibalans per producerad megajoule biobränsle. Anledningen är att nettoenergibalansen visar på effektiviteten utifrån det substrat som finns på Företaget. Energibalans per producerad megajoule biobränsle används emellertid ofta i andra studier och är därmed användbart i jämförelse med resultat från tidigare studier.

I systemet med biodieselproduktion visar resultatet att det produceras biogas med betydligt högre energivärde än den biodiesel som produceras. Eftersom restprodukten ger ett så mycket större utbyte kan det ifrågasättas om det är rimligt att ha en biodieselproduktion på Företaget. Någon typ av avvattningsmetod och endast biogaströtning skulle troligen vara mer effektivt.

Minskningen av klimatutsläpp är betydligt större för systemet med etanolproduktion jämfört med systemet med biodieselproduktion sett till årsproduktionen (-103 ton CO<sub>2</sub>-ekv./år respektive -23 ton CO<sub>2</sub>-ekv./år).

Det krävs sammantaget mer tillsatser av näringsämnen i systemet med etanolproduktion än i systemet med biodieselproduktion. pH-värdet behöver sänkas (med saltsyra) till en något lägre nivå i systemet med biodieseltillverkning.

Den sammantagna bedömningen är att etanolproduktion är lämpligare än biodieselproduktion av restströmmarna på Företaget.

Utifrån resultatet från denna studie skulle trenden med ökande användning av biodiesel och sparsam användning av etanol (Energimyndigheten 2018) kunna vara negativ både ur effektivitetssynpunkt och för klimatet om restprodukter med låg sockerhalt används.

#### **Faktorer kan påverka resultatet**

Bra Miljövalsel, det vill säga el som kommer från förnyelsebara källor, ger upphov till mindre klimatutsläpp än den el som förutsattes användas i denna studie. Exempelvis ger elproduktion från vattenkraft upphov till emissioner på endast cirka 10-13 gram koldioxidekvivalenter per kilowattimme och vindkraftsel 9-11 gram koldioxidekvivalenter per kilowattimme i ett livscykelperspektiv (Pehnt 2006). Om Miljömärkt el istället hade använts så hade klimatutsläppen således blivit betydligt mindre. I praktiken får kunder som har valt Bra Miljövalsel emellertid samma elmix som andra kunder (Farm 2011).

Ifall produktion av de näringsämnen som behöver tillsättas för att kultivera jästsvamparna hade räknats in hade energianvändningen och klimatutsläppen blivit större. Resultatet för systemet med etanolproduktion skulle troligen påverkas mest om produktionen av

näringsämnen hade tagits med. Produktion av fosfor och kväve kräver relativt stor energianvändning, 8,5 kilowattimmar per kilo fosfor respektive 12,7 kilowattimmar per kilo kväve (Davis & Haglund 1999, se Fogelberg et al. 2007, s. 9). Även växthusgasutsläppen är relativt stora vid produktionen av dessa näringsämnen. Vid produktion av fosfor är växthusgasutsläppen ungefär 3,1 kilo koldioxidekvivalenter per kilo. Vid produktion av ammoniumnitrat uppstår utsläpp på cirka 6,9 kilo koldioxidekvivalenter per kilo kväve (Andersson et al. 2011). Om avdrag gjorts för att producerad biogödsel kan ersätta mineralgödsel skulle emellertid energianvändning och klimatutsläpp bli något mindre. Det skulle bli mest märkbart för systemet med biodieselproduktion, då mest biogas kan produceras i det systemet.

Omvandlingsprocesserna vid fermenteringen respektive odlingen av oljebildande svampar är de största källorna till klimatutsläpp. I systemet med produktion av biodiesel är dessa utsläpp mycket stora i förhållande till den biodiesel som produceras. För att minska växthusgasutsläppen skulle den producerade koldioxiden i omvandlingsprocesserna kunna återanvändas (se Alternativa metoder för omhändertagande av reningsslammet).

### **Felkällor**

Det finns begränsat med studier vad det gäller både odling av oljebilande jästsvamp och fermentering vid så låga sockerhalter som i restströmmarna på Företaget. Med större underlag hade utbytet av biobränsle kunna beräknas med större säkerhet. Både vad det gäller etanol- och biodieselproduktion har tidigare studier använts där sockerhalten är högre än sockerhalten i restströmmarna på Företaget. Utbytet av biobränsle kan således vara överskattat. Studien av (Hanscho et al. (2012) visar emellertid att det är samma etanolutbyte av *S. cerevisiae* BY4742 i substrat med 10 gram glukos per liter som i substrat med 20 gram glukos per liter. Vad det gäller biodiesel finns det oljebildande jästsvampar som är mycket effektiva i sin oljebildning. Om man finner att någon jäststart som har effektivare oljebildning kan användas, så skulle mer biodiesel kunna produceras.

Uppskattningen av halterna av näringsämnen och socker i restströmmarna är osäker. Detta gäller i synnerhet koncentratet, vars innehåll varierar beroende vilka processer som pågår och vars näringsinnehåll är en uppskattning baserat på sockerhalten i jämförelse med pressrester. Då endast en mätning av sockerhalten i koncentratet respektive reningsslammet var möjliga att genomföra är det osäkert hur pass representativa dessa värden är som medeltal över året. Brix-värdet ger endast en exakt viktprocent socker i en ren vattenlösning (Toledo 2014). Då restströmmarna på Företaget inte är rena vattenlösningar är Brix-värdet därför inget exakt värde. Etanolinnehåll påverkar dessutom Brix-värdet (Rumpunen 2015). Eftersom det förekommer vin i koncentratet kan därför sockerhalten ha överskattats. Även rester av must i koncentratet kan ge en överskattning av Brix-värdet eftersom organiska syror kan höja Brix-värdet (Rumpunen 2015). Stora variationer av koncentratets sammansättning skulle även kunna påverka metabolismen för jästsvamparna negativt. Dessa förändringar bör emellertid till stor del utjämnas då en jämn utblandning med reningsslam och pressrester skulle ske.

Uppgifter om energianvändning för de olika momenten saknades för destillation vid så låg etanolkoncentration som det inkommande substratet skulle ha på Företaget. Den uppskattade energianvändningen för destillation är därför en möjlig felkälla. Det saknades likaså uppgifter om energianvändning för hydrolys, vilket innebar att en uppskattning fick göras utifrån energianvändning för CSTR. Denna potentiella felkälla blir emellertid densamma för de båda systemen. Även vad det gäller övriga moment finns en risk att uppskattad energianvändning inte är helt korrekt. I vissa fall har exempelvis

information om system med mikroalger använts när information för användning av jästsvampar inte återfanns. Olikheter i celluppbyggnaden hos mikroalger respektive jästsvampar kan påverka energianvändningen.

### **Jämförelse med andra produktionsmetoder**

Få analyser av energianvändning och klimatutsläpp har hittats för liknande råvaror som analyseras i denna studie. För att undersöka energi- och klimatmässig effektivitet i systemen med produktion av biobränsle på Företaget är det emellertid betydelsefullt att jämföra system med etanol- eller biodieselproduktion av andra råvaror.

I en studie av Bernesson et al. (2006) görs en livscykelanalys av etanolproduktion av vete i Sverige. Avdrag görs för användning av restprodukten drank som djurfoder. I en annan studie av Bernesson et al. (2003) utförs en livscykelanalys för produktion av biodiesel av raps (RME) i Sverige. Avdrag för användning av restprodukterna glycerol och mjöl görs i analysen. Resultaten i studierna redovisas i tabell 20.

**Tabell 20.** Energibalanser och klimatpåverkan vid etanol- respektive biodieselproduktion i studier av Bernesson et al. (2003; 2006)

	<b>Energianvändning</b> (MJ/MJ <sub>biobränsle</sub> )	<b>Klimatpåverkan</b> (g CO <sub>2</sub> -ekv./MJ <sub>biobränsle</sub> )
Etanolproduktion <sup>1</sup>	0,4	31,5
RME-produktion <sup>2</sup>	0,3	40,3

<sup>1</sup> Bernesson et al. (2006).

<sup>2</sup> Bernesson et al. (2003).

Energianvändningen är högre per megajoule biobränsle i studierna av Bernesson et al. (2003; 2006), i synnerhet vid produktion av biodiesel (RME), jämfört den aktuella studien när biogasproduktion av restprodukter räknas in. En anledning är troligen att biobränslena är producerade av odlade grödor i studierna av Bernesson et al. (2003; 2006). I studierna av Bernesson et al. (2003; 2006) är klimatutsläppen betydligt högre per megajoule för biodieselproduktion än vid biodieselproduktion i den aktuella studien när biogasproduktion av restprodukter räknas in. Skillnaden skulle kunna bero på att biogasproduktion ger en större minskning av klimatutsläpp än vad tillverkning av mjöl och ren glycerol gör.

Hitchcock och Lane (2008) har i en rapport sammanställt livscykelanalyser avseende klimatpåverkan i olika system med produktion av biobränslen för användning i England. En sammanställning redovisas i tabell 21.

**Tabell 21.** Klimatpåverkan vid etanol- respektive biodieselproduktion i studie av Hitchcock och Lane (2008)

	<b>Klimatpåverkan</b> (g CO <sub>2</sub> -ekv./ MJ <sub>biobränsle</sub> )
Etanolproduktion av vete från England	60,6
Etanolproduktion av sockerbetor från England	50,4
Etanolproduktion av sockerrör från Brasilien	24,8
Biodieselproduktion av raps från England	55,1
Biodieselproduktion av palmolja från Malaysia	46,0
Biodieselproduktion av matlagningsolja från England	12,9

Till skillnad mot studien av Bernesson et al. (2003; 2006) är således klimatutsläppen i medeltal något lägre för biodieselproduktion än för etanolproduktion i studien av Hitchcock och Lane (2008). Minst utsläpp ger matlagningsolja från England, troligen för

att det är en redan utvunnen, energirik produkt samt att den är från England. Utan avräkning för restprodukter är klimatutsläppen betydligt lägre i systemen med biodieselproduktion jämfört klimatutsläppen i systemet med biodieselproduktion i den aktuella studien. Eventuellt har koldioxidutsläpp vid odling av jästsvampar betydelse för denna skillnad.

I en studie av Muñoz et al. (2013) presenteras resultat som visar att etanolproduktion av majs, sockerrör eller sockerbetor (inklusive odling) ger upphov till 0,7 till 1,5 kilo koldioxidekvivalenter per kilo etanol. Etanol har ett energivärde på 21 240 megajoule per kubikmeter och en densitet på 790 kilo per kubikmeter (SPBI 2010). Det innebär att energivärdet per kilo etanol är 26,9 megajoule och att produktionen ger upphov till 26,0 till 55,8 gram koldioxidekvivalenter per megajoule etanol. Klimatutsläppen för etanolproduktion av odlade grödor i studien av Muñoz et al. (2013) är således i medeltal något större per producerad megajoule än i systemet med etanolproduktion av restströmmarna på Företaget. Detta är väntat då användning av odlade grödor sannolikt innebär högre energianvändning, vilket leder till större klimatutsläpp, än användning av restprodukter.

I en studie av Yuan et al. (2015) analyserades klimatutsläpp i ett system med biodieselproduktion av mikroalger. Avdrag gjordes för biogasrötning samt förbränning av restprodukter. Klimatutsläppen var 71 gram koldioxidekvivalenter och energianvändningen var 1,02 megajoule per megajoule biodiesel. I denna studie beräknades således klimatutsläppen vara betydligt större än i systemet med biodieselproduktion i den aktuella studien (med avdrag för biogasproduktion av restprodukter) trots att jästsvampar avger koldioxid medan alger tar upp koldioxid i sin metabolism (Abdel-Raouf et al. 2012). Algernas upptag av koldioxid är emellertid inte inräknad vid beräkningarna av klimatutsläpp i studien av Yuan et al. (2015). En anledning till att klimatutsläppen är större i studien av Yuan et al. (2015) kan vara att en del av biomassan (torr extraherad biomassa) går till förbränning istället för biogasrötning. Även energianvändningen är betydligt lägre i den aktuella studien. Detta trots att densiteten av algceller är 50 gram per liter vid skörden i studien av Yuan et al. (2015) samt att lipidhalten är 25 viktprocent i algcellerna. De högre koncentrationerna av celler samt lipider borde innebära att det krävs lägre energianvändning per megajoule utvunnen biodiesel. En förklaring till den högre energianvändningen i studien av Yuan et al. (2015) kan vara att biomassan torkas före extraktion. Som nämnts tidigare är torkning av biomassa mycket energikrävande (Salam et al. 2016).

I en studie av Arvidsson et al. (2011) jämfördes klimatutsläpp vid produktion av HVO av raps, palmolja (två resultat) respektive jatropha. Resultatet utan avdrag för restprodukter redovisas i tabell 22.

**Tabell 22.** Klimatpåverkan vid HVO-produktion av raps, palmolja respektive jatropha i studie av Arvidsson et al. (2011) inklusive omräkning till klimatpåverkan per megajoule

	<b>Klimatpåverkan (g CO<sub>2</sub>-ekv./ kWh<sub>biobränsle</sub>)<sup>1</sup></b>	<b>Klimatpåverkan (g CO<sub>2</sub>-ekv./ MJ<sub>biobränsle</sub>)<sup>2</sup></b>
HVO-produktion av raps	700	194
HVO-produktion av palmolja	390 eller 540	180 eller 150
HVO-produktion av jatropha	600	167

<sup>1</sup> Resultat i studie av Arvidsson et al. (2011).

<sup>2</sup> Omräkning till klimatpåverkan per megajoule för att underlätta jämförelse med den aktuella studien.

I studien av Arvidsson et al. (2011) är klimatutsläppen således betydligt större än i studier som det ovan jämförts med. Till skillnad mot de andra studierna ingick utsläpp från jorden vid odling i studien av Arvidsson et al. (2011) och det var från jorden som den största delen av klimatutsläppen kom. Även transporter till och från uppgraderingen till HVO ingick även, vilket ger ett något missvisande resultat. Klimatutsläppen är ändå större i den aktuella studien med biodieselproduktion då produktion av biogas inte räknas in. Koldioxidutsläpp vid odling av jästsvampar kan ha betydelse för denna skillnad.

Sammanfattningsvis är systemet med etanolproduktion på Företaget i medeltal effektivare klimatmässigt än system med odlade råvaror. Även systemet med biodieselproduktion är klimatmässigt effektivare än i studier med andra råvaror när biogasproduktion av restprodukter räknas in.

Det hittades relativt få studier att jämföra med vad det gäller energieffektivitet. De som hittades visar på i medeltal högre energianvändning per megajoule biobränsle än systemen med både etanol- och biodieselproduktion i den aktuella studien.

### **Alternativa metoder för omhändertagande av reningslammet Förbättring av systemen med etanol- eller biodieseltillverkning**

Mikro- eller makroalger kan användas för vattenrening och dessa behöver koldioxid för sin metabolism (Abdel-Raouf et al. 2012). Koldioxid som bildas vid fermentering eller odling av oljebildande jästsvampar skulle kunna återcirkuleras om alger introduceras i vattenreningen. Mikroalger tillverkar, som tidigare nämnts, lipider som kan omvandlas till biodiesel (Batan et al. 2010). Mikroalger kan även fermenteras till etanol (Hui et al. 2013). Makroalger kan rötas till biogas (Baltrenas & Misevicius 2015). Användning av alger i reningsprocessen kan således sluta kretsloppet och minska klimatutsläppen samtidigt som de kan användas som råvara i produktion av biodrivmedel. Alger behöver emellertid ljus, värme, ett system för skörd av algerna samt eventuellt ett pumpsystem (Abdel-Raouf et al. 2012). Detta innebär att odling av alger kräver energitillförsel samt gör systemet mer komplicerat.

För att öka utbytet av etanol- eller biodiesel skulle substratet kunna blandas med sockerrika restprodukter från något lokalt företag.

HVO produceras vanligen bland annat av fiskrester (Energifabriken u.å.). Då det finns ett par fiskeriföretag i närheten av Företaget skulle samtransport eventuellt kunna ske till ett företag som tillverkar HVO.

### **Högre TS-halt**

En alternativ lösning för omhändertagande av reningslammet på Företaget vore att öka biogaspotentialen så att slammet, som tidigare, skulle kunna skickas till Kristianstad Biogas AB. Ett vanligt sätt att förbättra biogaspotentialen för reningslam är avvattning. Avvattning kan exempelvis ske genom gravimetrisk slamförtjockning (sedimentering), centrifugering, pressar eller filter (Baresel et al. 2014). Att centrifuger konsumerar mycket energi har varit ett hinder för användning av denna metod.<sup>24</sup> En annan avvattningsmetod är torkbädd, vilket har testats på Företaget i form av en vassbädd. Anledningen till att mustriet slutade att använda denna teknik var att omhändertagandet av det avvattnade slammet var problematiskt.<sup>25</sup> Det finns eventuella planer på att installera en enklare form av sil för att skilja slammet från medföljande vatten.<sup>26</sup>

---

<sup>24</sup> Hans Hesselroth teknisk chef Kiviks Musteri, personlig kommunikation den 12 mars 2018.

<sup>25</sup> Alex Wallgren drifttekniker Kiviks Musteri, personlig kommunikation den 26 mars 2018.

<sup>26</sup> Alex Wallgren drifttekniker Kiviks Musteri, personlig kommunikation den 26 mars 2018.

En utredning om möjligheter för att minska vattenanvändningen i produktionen på Företaget skulle potentiellt kunna leda till en minskning av vattenmängden i reningsslammet.

Ett annat sätt att öka TS-halten vore att blanda samman reningsslammet med gödsel och livsmedelsavfall från lokala lantbruk och andra livsmedelsproducenter. Blandningen skulle kunna transporteras till Kristianstad Biogas AB eller rötas i en gemensam lokal biogasanläggning. Enligt Bengt Stuhre på Kristianstad Biogas AB är det emellertid svårt att få lönsamhet i mindre biogasanläggningar.<sup>27</sup>

### **Kompostering med biokol**

En kretsloppsanpassad lösning som diskuterades inför den aktuella studien var att kompostera slammet tillsammans med biokol av äppelträdgrenar från Företagets egna äppelträd. Biokol tillverkas genom förbränning av biologiskt material under syrefattiga förhållanden och kan användas som jordförbättringsmedel (Lilin et al. 2015). Eftersom biokol har en mycket stor yta i förhållande till sin volym kan den hålla kvar vatten samt näringsämnen och därmed höja kvaliteten på kompostjord. Biokol fungerar dessutom som en kolsänka då kolen stannar i jorden istället för att återcirkulera till atmosfären (Ekebafe et al. 2015). Gödsel och annat biologiskt avfall från verksamheter i närområdet skulle med fördel kunna ingå i komposten för att öka näringsinnehållet och göra materialet torrare. Anledningen till att detta förslag inte utreddes närmare var att miljö- och kvalitetschefen på Företaget ansåg att det skulle krävas för mycket tid och resurser, vilket skulle ta fokus från livsmedelsproduktionen. Intresse för förslaget finns emellertid om en utomstående aktör kan genomföra arbetet på ett sätt som ger en vinst för båda parterna samt miljön.<sup>28</sup>

### **Framtidspotential för biobränslen**

I dagsläget ses ofta elektricitet som det huvudsakliga alternativet till fossila drivmedel. Biobränslen producerade av biomassa kommer dock troligen vara kvar som alternativ åtminstone ett tag framöver eftersom många ännu inte tillgång till laddningsplatser. Dessutom är det en fördel för miljön om restprodukter kan användas till biobränsle då produktion av både el och bilbatterier har effekter på miljön (Energi- och klimatrådgivningen 2018; Hawkins et al. 2013).

HVO, som är ett biobränsle producerat av biomassa, ökar emellertid i användning och är det mest använda biodrivmedlet (Energimyndigheten 2018). Per Östborn, drivmedelsexpert på Gröna Bilister, menar att det är viktigt att etanol produceras eftersom det råder brist på hållbara råvaror till HVO-produktion. För att tillgodose efterfrågan behöver det därför, enligt Östborn, importeras palmolja och PFAD (Palm Fatty Acid Destillate), med skogsskövling som följd. Östborn menar att en kombination av flera biobränslen och elbilar är nödvändigt för att nå klimatmålet för 2030 (Novator.se 2017).

Även användbarhet är en viktig faktor vid analys av framtidspotentialen hos olika biodrivmedel. Ett problem med biodiesel som inte uppgraderats till HVO är att det krävs speciella motorer för att kunna köra på ren FAME (SPBI 2011). FAME får blandas i vanlig diesel endast i en koncentration av upp till 7 procent (Neste 2018). Om FAME uppgraderas till HVO så kan drivmedlet emellertid användas i vanliga dieselmotorer (SPBI 2014). Ökad kommersialisering av motorer som kan köra på ren FAME skulle vara

---

<sup>27</sup> Bengt Stuhre ansvarig råvaror/biogödsel Kristianstad Biogas AB, personlig kommunikation den 23 mars 2018.

<sup>28</sup> Stina Andréns kvalitets- och miljöchef Kiviks Musteri, mejlkontakt den 13 april 2018.



av värde för större användbarhet och att förkorta processen från råvara till körbar biodiesel.

Demirbas (2010) hävdar att biodiesel är ett framtidsbränsle bland annat på grund av sin smörjförmåga och höga flampunkt som gör att biodieseln lätt kan lagras och transporteras. Flampunkten, det vill säga temperaturen då ånga som kan antändas eller explodera avges, är för biodiesel 423 K eller 150 °C (Demirbas 2010). För 99,9-procentig etanol är flampunkten högst 23 °C och etanol är klassad som mycket brandfarlig (Fred Holmberg & Co AB 2014).

Etanolbilar kör på drivmedlet E85, vilket har en inblandning av 15 procent bensin. Inblandningen av bensin behövs för att förbättra motorns start- och smörjegenskaper, då etanol smörjer motorn sämre än bensin. Vintertid höjer bensinbolagen bensininblandningen till 25 procent för att underlätta kallstarter i minusgrader (Miljöfordon.se 2017). En anledning till att etanolanvändning har minskat är att bilägare har fått motorproblem då etanolen varit nedsmutsad med hög inblandning av sulfid (Vi Bilägare 2013).

Politik och ekonomiska styrmedel är även viktiga aspekter för att öka användningen av biobränslen. Att ekonomiskt stödja flera olika typer av alternativ till fossila bränslen kan leda till större total användning av alternativa bränslen och till att klimatmålen lättare nås. Även stöd till forskning om metoder som kan öka produktionen av biobränslen och förbättra användbarheten skulle vara av stort värde.

### ***Förslag på vidare forskning***

Forskning om effektivisering av processerna för att minska elanvändning hade varit betydelsefull ur både energi- och klimatsynpunkt. Användningen av elektricitet skulle bli relativt stor eftersom substraten på Företaget är så pass fattiga på socker, vilket gör att jästcellerna blir få i förhållande till den totala volymen. Processer som odling, centrifugering och destillation blir därmed mer energikrävande än de hade varit i ett mer koncentrerat substrat.

I den aktuella studien har inte kostnader eller systemens komplexitet och behov av arbetsinsatser analyserats. Detta är naturligtvis aspekter som bör beaktas innan något av systemen tas i bruk. Enligt EU-kommissionens Joint Research Center (2014) är kostnaden i medeltal något högre för produktion av etanol jämfört med biodiesel per ton ersatta koldioxidekvivalenter i well-to-wheel-analyser.

Det bör göras experimentella studier för att undersöka hur systemen skulle fungera i verkligheten. Det vore även värdefullt att testa algodling som reningsmetod med återcirkulering av koldioxid från fermentering/odling av oljebildande jästsvamp.

Sivakumar et al. (2010) menar att det finns stor potential för forskning om genmanipulation av organismer så att de skulle kunna producera större volymer biobränslen. Forskning om genmanipulation av mikroorganismer för att öka etanolproduktion eller oljebildning i sockerfattiga substrat skulle kunna vara av värde för Företaget.

Ett annat betydelsefullt forskningsområde vad det gäller biobränslen är användbarheten. Exempelvis skulle forskning om rening av etanol kunna minska problem med motorer. Forskning avseende förvaring av etanol för att uppnå hög brandsäkerhet är även viktig.

## Slutsatser

Enligt resultaten skulle det kunna produceras betydligt högre energivärde av etanol än av biodiesel av restströmmarna. Även nettoenergiproduktionen per år skulle bli avsevärt större i ett system med etanolproduktion. I systemet med biodieselproduktion är det biogas av restprodukter som ger det största energiutbytet. Systemet med etanolproduktion ger dessutom en mycket större minskning av klimatutsläpp än systemet med biodieselproduktion både per år. Det behöver sammantaget tillsättas större mängder näringsämnen vid fermentering till etanol jämfört med odling av oljebildande jästsvamp på Företaget. Det finns emellertid ett något större behov av tillsatser av kemikalier för att sänka pH-värdet vid odlingen av oljebildande jästsvamp i restströmmarna. Etanolproduktion bedöms sammantaget vara lämpligare än biodieselproduktion av restströmmarna på Företaget.

Både etanol- och biodieselproduktion på Företaget är generellt effektivare både klimat- och energimässigt än i system med odlade råvaror, enligt jämförda studier.

Att blanda in andra företags sockerrika avfall i substratet skulle öka potentialen och ge mer biobränsle. Koldioxidutsläppen skulle kunna tas upp av mikroalger ifall dessa skulle börja användas i vattenreningen.

Kostnader, komplexitet och behov av arbetsinsatser har inte tagits med i analysen. Detta bör göras för att undersöka potentialen vidare. Det behöver även göras experimentella studier för att undersöka systemens potential i verkligheten. Energieffektivisering av processerna skulle kunna minska energianvändningen. Forskning om genmanipulation av mikroorganismer för att öka dess biobränsleproduktion skulle även vara värdefull. Forskning för att öka användbarheten kan göra biobränslen mer konkurrenskraftiga.

## Referenser

Abdel-Raouf, N., Al-Homaidan, A. A. & Ibraheem, I. B. M. (2012). Microalgae and wastewater treatment. *Saudi Journal of Biological Science*, 19(3), ss. 257-275. DOI: 10.1016/j.sjbs.2012.04.005

Ageitos, J. M., Vallejo, J. A., Veiga-Crespo, P. & Villa, T. G. (2011). Oily yeasts as oleaginous cell factories. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 90(4), ss. 1219-1227. DOI 10.1007/s00253-011-3200-z

Andersson, K., Berglund, M., Albertsson, B. & Baumgardt, M. (2011). *Kunskapsunderlag om klimat – en hjälp till kvävediskussionen i Greppa Näringen*. Alnarp: Greppa Näringen.  
<http://www.greppa.nu/download/18.5881b3b01336df878e780001510/1370096853908/Underlag+f%C3%B6r+klimatdiskussion+kv%C3%A4vestrategi++2011.pdf>

Angerbauer, C., Siebenhofer, M., Mittelbach, M. och Guebitz, G.M. (2007). Conversion of sewage sludge into lipids by *Lipomyces starkeyi* for biodiesel production. *Bioresource Technology*, 99(2008), ss. 3051–3056. DOI: 10.1016/j.biortech.2007.06.045

Annamalai, N., Sivakumar, N. & Oleskowicz-Popiel, P. (2017). Enhanced production of microbial lipids from waste office paper by the oleaginous yeast *Cryptococcus curvatus*. *Fuel*, 217(04/2018), ss. 420-426. DOI: 10.1016/j.fuel.2017.12.108

Arvidsson, R., Persson, S., Fröling, M. & Svanström, M. (2011). Life cycle assessment of hydrotreated vegetable oil from rape, oil palm and Jatropha. *Journal of Cleaner Production*, 19(2-3), ss. 129-137. DOI: 10.1016/j.jclepro.2010.02.008

Avfall Sverige (2015). *Fakta om biogas*.  
<https://www.avfallsverige.se/avfallshantering/avfallsbehandling/biologisk-atervinning/biogas/> [2018-05-27]

Bajpai, P. & Margaritis, A. (1987). The effect of temperature and pH on ethanol production by free and immobilized cells of *Kluyveromyces marxianus* grown on Jerusalem artichoke extract. *Biotechnology and Bioengineering*, 30(2), ss. 306-313. DOI: <https://doi.org/10.1002/bit.260300222>

Baltrenas, P. & Misevicius, A. (2015). Biogas production experimental research using algae. *Journal of Environmental Health Science & Engineering*, 13(1):18. DOI: 10.1186/s40201-015-0169-z

Baresel, C., Lüdtke, M., Levlin, E., Fortkamp, U. & Ekengren, Ö. (2014). *Slamavvattning i kommunala reningsverk. Nuläget, begränsningar och perspektiv*. (IVL Rapport B2188). Stockholm: IVL Svenska Miljöinstitutet AB.  
<http://www.ivl.se/download/18.343dc99d14e8bb0f58b76af/1454339651446/B2188.pdf>

Batan, L., Quinn, J., Willson, B. & Bradley, T. (2010). Net energy and emission evaluation of gas emission evaluation of biodiesel derived from microalgae. *Environmental Science & Technology*, 44(20), ss. 7075-7980. DOI: 10.1021/es10205

Bell, S.-J., & Henschke, P. A. (2005). Implications of nitrogen nutrition for grapes, fermentation and wine. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 11(3), ss. 242-295. DOI: 10.1111/j.1755-0238.2005.tb00028.x

Berlowska, J., Pielech-Przbylska, K., Balzerek, M., Cieciora, W., Borowski, S. & Kregiel, D. (2017). Integrated bioethanol fermentation/anaerobic

digestion for valorization of sugar beet pulp. *Energies*, 10(9), s. 1255. DOI: 10.3390/en10091255

Bernesson, S., Nilsson, D. & Hansson, P.-A. (2003). A limited LCA comparing large- and small-scale production of rape methyl ester under Swedish conditions. *Biomass and Bioenergy*, 26(2004), ss. 545-559. DOI: 10.1016/j.biombioe.2003.10.003

Bernesson, S., Nilsson, D. & Hansson, P.-A. (2006). A limited LCA comparing large- and small-scale production of ethanol for heavy engines under Swedish conditions. *Biomass and Bioenergy*, 30(1), ss. 46-57. DOI: 10.1016/j.biombioe.2005.10.002

Bioenergiportalen (2009). *Så framställs RME*.  
<http://www.bioenergiportalen.se/?p=1451&m=1628> [2018-05-08]

Boer, K. de, Moheimani, N. R., Borowitzka, M. A. & Bahri, P. A. (2012). Extraction and conversion pathways for microalgae to biodiesel: a review focused on energy consumption. *Journal of Applied Phycology*, 24(6), ss. 1681-1698. DOI: 10.1007/s12355-010-0024-610.1007/s10811-012-9835-z

Capareda, S. C. (2014). *Introduction to biomass energy conversions*. Boca Raton: CRC Press.

Chen, Y., Jiang, S., Yuan, H. Zhou, Q. & Gu, G. (2006). Hydrolysis and acidification of waste activated sludge at different pHs. *Water Research*, 41(3), ss. 683-689. DOI: 10.1016/j.watres.2006.07.030

Chotineeranat, S., Wansuksri, R., Piyachomkwan, K., Chatakanonda, P., Weerathaworn, P. & Srirot, K. Effect of calcium ions on ethanol production from molasses by *Saccharomyces cerevisiae*. *Sugar Tech*, 12(2), ss. 120-124. DOI: 10.1007/s12355-010-0024-6

De Marco, I., Miranda, S., Riemma, S. och Iannone, R. (2015). Environmental assessment of drying methods for the production of apple powders. *International Journal Life Cycle Assessment*, 20(12), ss. 1659-1672. DOI: 10.1007/s11367-015-0971-y

Demirbas, A. (2010). Biodiesel for future transportation energy needs. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effect*, 32(16), ss. 1490-1508. DOI: 10.1080/15567030903078335

Toledo, M. (2014). Brix – Sugar Determination. *Density and Refractometry*, May 2013. [https://beta-static.fishersci.com/content/dam/fishersci/en\\_US/documents/programs/scientific/technical-documents/technical-bulletins/mettler-toledo-brix-sugar-determination-technical-bulletin.pdf](https://beta-static.fishersci.com/content/dam/fishersci/en_US/documents/programs/scientific/technical-documents/technical-bulletins/mettler-toledo-brix-sugar-determination-technical-bulletin.pdf)

Ecotraffic (2015). *Kunskapssammanställning – EURO VI stadsbussar*. (Rapport 15707). Stockholm: Ecotraffic. [http://www.ecotraffic.se/media/10543/rapport\\_7078\\_-\\_kunskapspm-euro\\_vi-stadsbussar\\_\\_final\\_.pdf](http://www.ecotraffic.se/media/10543/rapport_7078_-_kunskapspm-euro_vi-stadsbussar__final_.pdf) [2018-06-06]

Ekebafé, M. O., Ekebafé, L. O. & Ugbesia, S. O. (2015). Biochar compost and composites. *Science Progress*, 98(2), ss. 169-176. DOI: 0.3184/003685015X14301544319061

Energifabriken (u.å.). *Råvaror för HVO*. <https://www.energifabriken.se/hvo/ravaror---biodiesel/?p1=branslen&p2=ravaror---biodiesel&p3=> [2018-04-25]

Energimyndigheten (2018). *Energiläget i siffror 2018*. <http://www.energimyndigheten.se/statistik/energilaget/?currentTab=1#mainheading> [2018-05-08]

Energi- och klimatrådgivningen (2018). *Miljöpåverkan från el*. <https://energiradgivningen.se/klimat/miljopaverkan-fran-el> [2018-05-09]

Evcán, E. & Tari, C. (2015). Production of bioethanol from apple pomace by using cocultures: Conversion of agro-industrial waste to value added product. *Energy*, 88(2015), ss. 775-782. DOI: 10.1016/j.energy.2015.05.090

Farm, C. (2011). Grön el – en bluff? *Råd & Rön*, 26 september. <http://www.radron.se/artiklar/Ar-gron-el-bara-en-bluff/>

Fasaei, F., Bitter, J. H., Slegers, P. M. & Boxtel, A. J. B. van (2018). Techno-economic evaluation of microalgae harvesting and dewatering systems. *Algal Research*, 31(2018), ss. 347-362. DOI: 10.1016/j.algal.2017.11.038

Fogelberg, F., Baky, A., Salomon, E. & Westlin, H. (2007). *Energibesparing i lantbruket år 2020. Ett projekt utfört på uppdrag av Statens naturvårdsverk*. Uppsala: JTI – Institutet för jordbruks- och miljöteknik.

Fred Holmberg & Co AB (2014). *Säkerhetsdatablad Etanol 99,9%*. <http://www.holmberg.se/upload/product/files/sdb-etanol-999-swe-2014-02-26---16.pdf> [2018-08-08]

Gill, C. O., Hall, M. J. & Ratledge, C. (1977). Lipid accumulation in an oleaginous yeast (*Candida 107*) growing on glucose in single-stage continuous culture. *Applied and Environmental Microbiology*, 33(2), ss. 231-239. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC170670/?page=1>

Gröna bilister (2012). *Drivmedelsfakta 2012*. Stockholm: Gröna bilister. [http://www.gronabilister.se/drivmedelsfakta-2012.pdf?cms\\_fileid=6dd7a9f4249bec399e474b4266b9fbdd](http://www.gronabilister.se/drivmedelsfakta-2012.pdf?cms_fileid=6dd7a9f4249bec399e474b4266b9fbdd)

Hall, M. J. & Ratledge, C. (1977). Lipid accumulation in an oleaginous yeast (*Candida* 107) growing on glucose under various conditions in a one- and two-stage continuous culture. *Applied and Environmental Microbiology*, 33(3), ss. 577-584. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16345210>

Hanscho, M., Ruckerbauer, D. E., Chauchan, N., Hofbauer, H. F., Krahulec, S., Nidetzky, B., Kohlmeier, S. D., Zanghellini & Natter, K. (2012). Nutritional requirements of the BY series of *Saccharomyces cerevisiae* strains for growth. *FEMS Yeast Research*, 12(2012), ss. 796-808. DOI: 10.1111/j.1567-1364.2012.00830.x

Hawkins, T. R., Singh, B. & Majeau-Bettez, G. (2013). Comparative environmental life cycle assessment of conventional and electric vehicles. *Journal of Industrial Ecology*, 17(1), ss. 53-64. DOI: 10.1111/j.1530-9290.2012.00532.x

Heilscher (2018). *Biodiesel from Algae using Ultrasonication*. [https://www.hielscher.com/algae\\_extraction\\_01.htm#ultrasonic\\_articles](https://www.hielscher.com/algae_extraction_01.htm#ultrasonic_articles) [2018-04-30]

Hitchcock, G. & Lane, B. (2008). *Life Cycle Analysis of Road Transport Biofuels*. (Final Report). Bridgwater: Sustainable Transport Solutions Ltd.

Hui, G., Maurycy, D., Lei, L., Guoyu, Q., Shu, G. & Guangyi, W. (2013). Biochemical features and bioethanol production of microalgae from coastal waters of Pearl River Delta. *Bioresource Technology*, 127(2013), ss. 422-428. DOI: 10.1016/j.biortech.2012.10.006

Jena, U., McCurdy, A. T., Warren, A., Summers, H., Ledbetter, R. N., Hoekman, S. K., Seefeldt, L. C. & Quinn, J. C. (2015). Oleaginous yeast platform for producing biofuels via co-solvent hydrothermal liquefaction. *Biotechnol Biofuels*, 8(167), ss. 1-19. DOI 10.1186/s13068-015-0345-5

Joint Research Center (2014). *JEC Well-to-wheel analyses (WTW)*. <https://iet.jrc.ec.europa.eu/about-jec/jec-well-wheels-analyses-wtw> [2018-08-19]

Karatay, S. E. & Dönmez, G. (2010). Improving the lipid accumulation properties of the yeast cells for biodiesel production using molasses. *Bioresource Technology*, 101(20), ss. 7988-7990. DOI: 10.1016/j.biortech.2010.05.054

Karlsson, H., Ahlgren, S., Sandgren, M., Passoth, V., Wallberg, O. & Hansson, P. A. (2016). A systems analysis of biodiesel production from wheat straw using oleaginous yeast: process design, mass and energy balances. *Biotechnology for Biofuels*, 9(1), ss. 1-13. DOI: 10.1186/s13068-016-0640-9

Khatriwada, D. & Silveira, S. (2009). Net energy balance of molasses based ethanol: The case of Nepal. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), ss. 2515-2524. DOI: 10.1016/j.rser.2009.06.028

Kiviks Musteri (2017). *Slam 2015-2017*.

- Koutinas, A. A. Chatzifragkou, A. Kopsahelis, N. Papanikolaou, S. & Kookos, I. K. (2014). Design and techno-economic evaluation of microbial oil production as a renewable resource for biodiesel and oleochemical production. *Fuel*, 116(4014), ss. 566-577. DOI: 10.1016/j.fuel.2013.08.045
- Lantz, M., Ekman, A. & Björnsson, L (2009). *Systemoptimerad produktion av fordonsgas. En miljö- och energisystemanalys av Söderåsens biogasanläggning*. (Rapport 69). Lund: LTH, Lunds universitet.  
<https://lup.lub.lu.se/search/ws/files/3059208/4463235.pdf>
- Lilin, W., Zhanghong, W., Haiyan, G., Fei, S., Gang, Y., Yanzong, Z., Yongmei, Z., Hong, X. & Shihuai, D. (2015). Biochar produced from oak sawdust by Lanthanum (La)-involved pyrolysis for adsorption of ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), nitrate (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), and phosphate (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>). *Chemosphere*, 119(2015), ss. 646-653. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2014.07.084
- Livsmedelverket (u.å.). *E 422 – Glycerol*. <https://www.livsmedelsverket.se/livsmedel-och-innehall/tillsatser-e-nummer/sok-e-nummer/e-422---glycerol> [2018-04-26]
- Lundin, G. (2007). *Radmyllning och kombisådd av flytande gödselmedel i ekologisk spannmålsodling*. Uppsala: JTI – Institutet för jordbruks- och miljöteknik.  
<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:959944/FULLTEXT01.pdf> [2018-09-16]
- Madson, P. W. & Lococo, D. B. (2000). Recovery of volatile products from dilute high-fouling process streams. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 84(1), ss. 1049-1061. DOI: 10.1385/ABAB:84-86:1-9:1049
- Marques, I. P., Batista, A. P., Coelho, A. & Silva, T. L. da (2018). Co-digestion of *Rhodospiridium toruloides* biorefinery wastes for biogas production. *Process Biochemistry*, 64(1), ss. 221-227. DOI: 10.1016/j.procbio.2017.09.023
- Matkalkyl.se (u.å.). *Färgad tabell över aminosyraprofiler*.  
<http://matkalkyl.se/aminoprofiler1.php> [2018-05-24]
- Miljöfordon.se (2017). *Etanolbil*. <https://www.miljofordon.se/bilar/etanolbil/> [2018-08-26]
- Miljöfordon.se (2018a). *Drivmedelskalkyl*.  
<https://www.miljofordon.se/ekonomi/drivmedelskalkyl/?petrol=&diesel=&e85=1&gas=&electric=&hvo=1> [2018-04-24]
- Miljöfordon.se (2018b). *Miljöpåverkan*.  
<http://www.miljofordon.se/fordon/miljopaverkan/sa-raknar-vi-miljopaverkan> [2018-05-13]
- Muños, I., Flury, K., Jungbluth, N., Rigarlsfors, G., Canals, L. M. i & King, H. (2013). Life cycle assessment of bio-based ethanol produced from different agricultural feedstocks. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 19(1), ss. 109-119. DOI: 10.1007/s11367-013-0613-1

- Najafpour, G. D. (2007). CHAPTER 3 – Gas and Liquid System (Aeration and Agitation). *Biochemical Engineering and Biotechnology*, ss. 22-68. DOI: 10.1016/B978-044452845-2/50003-3
- Neste (2018). *Vad är skillnaden mellan Neste MY Renewable Diesel™ (HVO) och biodiesel FAME?* <https://www.neste.com/se/sv/vad-%C3%A4r-skillnaden-mellan-neste-my-renewable-diesel%E2%84%A2-hvo-och-biodiesel-fame> [2018-05-08]
- Nguyen, T. L. T. och Gheewala, S. H. (2007). Life cycle assessment of fuel ethanol from cane molasses in Thailand. *International Journal Life Cycle Assessment*, 13(4), ss. 301-311. DOI: 10.1007/s11367-008-0011-2
- Nienow, A. W., McLeod, G. & Hewitt, C. J. (2010). Studies supporting the use of mechanical mixing in large scale beer fermentations. *Biotechnology Letter*, 32(5), ss. 623-633. DOI 10.1007/s10529-010-0213-0
- Nieto, P. P., Hidalgo, D., Irusta, R. & Kraut, D. (2012). Biochemical methane potential (BMP) of agro-food wastes from the Cider Region (Spain). *Water Science and Technology*, 66(9), ss. 1842-1848. DOI: 10.2166/wst.2012.372
- Novator.se (2017). *Drivmedlens klimatpåverkan – Gröna Bilister manar till handling.* <http://www.novator.se/transporter/bilardrivmedel/drivmedlens-klimatpaverkan-grona-bilister-manar-till-handling/> [2018-08-08]
- Open Wet Ware (2006). *Composition of Yeast Nitrogen Base.* [https://openwetware.org/wiki/Composition\\_of\\_Yeast\\_Nitrogen\\_Base\\_\(YNB\)](https://openwetware.org/wiki/Composition_of_Yeast_Nitrogen_Base_(YNB)) [2018-05-24]
- Ouchida, K., Fukushima, Y., Ohara, S., Sugimoto, A., Hirao, M. & Kikuchi, Y. (2017). Integrated design of agricultural and industrial processes: A case study of combined sugar and ethanol production. *American Institute of Chemical Engineers AIChE J*, 63(2), ss. 560-581. DOI 10.1002/aic.15374s
- Panagiotou, G., Villas-Bôas, S. G., Christakopoulos, P., Nielsen, J. och Olsson, L. (2005). Intracellular metabolite profiling of *Fusarium oxysporum* converting glucose to ethanol. *Journal of Biotechnology*, 115(4), ss. 425-434. DOI: 10.1016/j.jbiotec.2004.09.011
- Parmar, I. & Rupasinghe, H. P. V. (2013). Bio-conversion of apple pomace into ethanol and acetic acid: Enzymatic hydrolysis and fermentation. *Biosource Technology*, 130(2), ss. 613-620. DOI: 10.1016/j.biortech.2012.12.084
- Patil, B.G., Gokhale, D.V., Bastawde, K.B. Puntambekar, U.S. & Patil, S.G. (1998). The use of tamarind waste to improve ethanol production from cane molasses. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnolo*, 21(6), s. 307-310. DOI: <http://www.stockton-press.co.uk/jim>
- Pehnt, M. (2006). Dynamic life cycle assessment (LCA) of renewable energy technologies. *Renewable Energy*, 31(1), ss. 55-71. DOI: 10.1016/j.renene.2005.03.002



Perussello, C. A., Zhang, Z., Marzocchella, A. & Tiwari, B. K. (2017). Valorization of apple pomace by extraction of valuable compounds. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 16(5), ss. 776-796. DOI: 10.1111/1541-4337.12290

Pirmohammadi, R., Rouzbehan, Y., Rezayazdi, K. & Zahedifar, M. (2006). Chemical composition, digestibility and in situ degradability of dried and ensiled apple pomace and maize silage. *Small Ruminant Research*, 66(1-3), ss. 150-155. DOI: 10.1016/j.smallrumres.2005.07.054

Prevent (u.å.). *Formyltriklorid*. <https://www.prevent.se/kemiskaamnen/amnen/492> [2018-05-10]

Regeringskansliet (2017). *Det klimatpolitiska ramverket*. <http://www.regeringen.se/artiklar/2017/06/det-klimatpolitiska-ramverket/> [2018-04-24]

Robra, S., Cruz, R. S. da, Oliveira, A. M. de, Neto, J. A. A. & Santos, J. V. (2010). Generation of biogas using crude glycerin from biodiesel production as a supplement to cattle slurry. *Biomass and Bioenergy*, 34(9), ss. 1330-1335. DOI: 10.1016/j.biombioe.2010.04.021

Rodríguez-Abalde, Á., Flotats, X. & Fernández, B. (2017). Optimization of the anaerobic co-digestion of pasteurized slaughterhouse waste, pig slurry and glycerine. *Waste management*, 61(03/2017), ss. 521-528. DOI: 10.1016/j.wasman.2016.12.022

Ruiz, E., Romero, I., Moya, M., Sánchez, S., Bravo, V. & Castro, E. (2007). Sugar fermentation by *Fusarium oxysporum* to produce ethanol. *World Journal Biotechnology*, 23(2), ss. 259-267. DOI: 10.1007/s11274-006-9222-5

Rumpunen, K. (2015). *Om enkla analyser för kvalitetssäkring av äppelråvara och äpplemust*. Kristianstad: Centrum för innovativa drycker.

RVF Utveckling (2004). *System för kvalitetssäkring av uppgraderad biogas*. (Rapport 2004:4). Malmö: RVF Utveckling Service AB. <https://www.yumpu.com/sv/document/view/24107442/system-far-kvalitetssakring-av-uppgraderad-biogas-avfall-sverige> [2018-06-06]

Saenge, C., Cheirslip, B., Suksaroge, T. T. & Bourtoom, T. (2011). Potential use of oleaginous red yeast *Rhodotorula glutinis* for the bioconversion of crude glycerol from biodiesel plant to lipids and carotenoids. *Process Biochemistry*, 46(1), ss. 210-218. DOI: 10.1016/j.procbio.2010.08.009

Salam, K. A., Velasquez-Orta, S. B. & Harvey, A. P. (2016). A sustainable integrated *in situ* transesterification of microalgae for biodiesel production and associated co-product-a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65(11/2016), ss. 1179-1198. DOI: 10.1016/j.rser.2016.07.068

Santamauro, F., Whiffin, F. M., Scott, R. J. och Chuck, C. J. (2014). Low-cost lipid production by an oleaginous yeast cultured in non-sterile conditions using model

waste resources. *Biotechnology for Biofuels*, 7(34), ss. 1-11. DOI:10.1186/1754-6834-7-34

- Saxe, M., Henriksson, M., Lagerkvist Tolke, C. & Marksten, T. (2013). *Jordbrukets klimatpåverkan – globala utsläpp och lokala åtgärder. Underlag för val och prioritering i regionala energi- och klimatstrategier.* (Rapport 2013:08). Falun: Länsstyrelsen Dalarnas län.  
[http://extra.lansstyrelsen.se/energi/SiteCollectionDocuments/Jordbruk%20och%20skogsbbruk/Jordbrukets%20klimatp%c3%a5verkan%20-%20globala%20utsl%c3%a4pp%20och%20lokala%20-%20tg%c3%a4rder%20Rapport%202013\\_08.pdf](http://extra.lansstyrelsen.se/energi/SiteCollectionDocuments/Jordbruk%20och%20skogsbbruk/Jordbrukets%20klimatp%c3%a5verkan%20-%20globala%20utsl%c3%a4pp%20och%20lokala%20-%20tg%c3%a4rder%20Rapport%202013_08.pdf)
- se.avstånd.org (u.å.). se.avstand.org [2018-05-26]
- SFGate (u.å.). *The Amino Acid Profile of an Apple.*  
<http://healthyeating.sfgate.com/amino-acid-profile-apple-5296.html> [2018-05-24]
- Sitepu, I. R., Garay, L. A., Sestric, R., Levin, D., Block, D. E., German, J. B. & Boundy-Mills, K. L. (2014). Oleaginous yeasts for biodiesel: Current and future trends in biology and production. *Biotechnology Advances*, 32(7), ss. 1336-1360. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2014.08.003
- Sivakumar, G., Vail, D. R., Xu, J., Burner D. M., Lay Jr., J. O., Ge, X & Weathers, P. J. (2010). Bioethanol and biodiesel: Alternative liquid fuels for future generations. *Engineering in Life Sciences*, 10(1), ss. 8-18. DOI: 10.1002/elsc.200900061
- SPBI (2010). *Energiinnehåll, densitet och koldioxidemission.*  
<http://spbi.se/blog/faktadatabas/artiklar/berakningsmodeller/> [2018-05-24]
- SPBI (2011). *FAME.* <http://spbi.se/blog/faktadatabas/artiklar/fame/> [2018-05-08]
- SPBI (2014). *HVO - Hydrogenated Vegetable Oil.*  
<http://spbi.se/blog/faktadatabas/artiklar/hvo-hydrogenated-vegetable-oil/> [2018-05-08]
- Statoil (2002). *Metanol. Lösningssmedel.*  
<http://www.varmlandsmetanol.se/dokument/Metanol%20Specification%20STATOIL.pdf> [2018-05-31]
- Svenskt Gastekniskt Center (2011). Biogas. Basdata om biogas. Malmö: Svenskt Gastekniskt Center.  
<http://www.sgc.se/ckfinder/userfiles/files/BasdataomBiogas2012.pdf> [2018-08-12]
- Subramaniam, R., Dureche, S., Zappi, M. & Bajpaj, R. (2010). Microbial lipids from renewable resources: production and characterization. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 37(12), ss. 1271-1287. DOI 10.1007/s10295-010-0884-5
- Tchakouteu, S. S., Kalantzi, O., Gardeli, C., Koutinas, A. A., Aggelis, G. & Papanikolaou, S. (2015). Lipid production by yeasts growing on biodiesel-derived crude glycerol: strain selection and impact of substrate concentration on the fermentation efficiency. *Journal of Applied Microbiology*, 118(4), ss. 911-927. DOI: 10.1111/jam.12736

Tredici, M. R., Bassi, N., Prussi, M., Biondi, N., Rofolfi, L., Zittelli, G. C. & Sampietro, G. (2015). Energy balance of algal biomass production in a 1-ha “Green Wall Panel” plant: How to produce algal biomass in a closed reactor achieving a high Net Energy Ratio. *Applied Energy*, 154(2015), ss. 1103-1111. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.01.086

University of Michigan (u.å.). *Visual Encyclopedia of Chemical Engineering*. <http://encyclopedia.che.engin.umich.edu/Pages/Reactors/menu.html> [2018-07-08]

Vane, L. M. (2008). Separation technologies for the recovery and dehydration of alcohols from fermentation broths. *Biofuels, Bioproducts & Biorefining*, 2(6), ss. 553-588. DOI: 10.1002/bbb.108

Viana, M. B., Freitas, A. V., Leitão, R. C., Pinto, G. A. S. & Santaella, S. T. (2012). Anaerobic digestion of crude glycerol: a review. *Environmental Technology Reviews*, 1(1), ss. 81-92. DOI: 10.1080/09593330.2012.692723

Vi Bilägare (2013). *E85 – bränslet allt fler väljer bort*. <http://www.vibilagare.se/reportage/e85-branslet-allt-fler-valjer-bort> [2018-04-24]

Wilkie, A. C., Riedesel, K. J. & Owens, J. M. (2000). Stillage characterization and anaerobic treatment of ethanol stillage from conventional and cellulosic feedstocks. *Biomass and Bioenergy*, 19(2), ss. 63-102. DOI: 10.1016/S0961-9534(00)00017-9

Yuan, J., Kendall, A. & Zhang, Y. (2015). Mass balance and life cycle assessment of biodiesel from microalgae incorporated with nutrient recycling options and technology uncertainties. *GCB Biology*, 7(2015), ss. 1245-1259. DOI: 10.1111/gcbb.12229

Zhang, X., Yan, S., Tyagi, R., Drougi, P. & Surampalli, R. Y. (2015). Ultrasonication aided biodiesel production from one-step and two-step transesterification of sludge derived lipid. *Energy*, 94(2016), ss. 401-408. DOI: 10.1016/j.energy.2015.11.016

Öresundskraft (2018). *Elens ursprung*. <https://oresundskraft.se/privat/produkter-tjaenster/elhandel/ursprungsmaerkning/> [2018-08-19]

## **Bilaga 1 – Analys av restströmmar på mustieriet**

### ***Halt av näringsämnen i äppelrester***

#### **Förutsättningar**

TS-halt: 148,1 g per kg våtvikt

Halt N: 1,2 % (torrvikt)

Halt N-NH<sub>3</sub> av N: 100 g N-NH<sub>3</sub>/kg N

Halt P: 0,2 % (torrvikt)

Halt S: 1 % (torrvikt)

Halt Mg: 0,19 % (torrvikt)

#### **Beräkningar**

Vikt N-NH<sub>3</sub> per ton äppelrester:  $(0,012 \times 148,1 \text{ g/kg}) \times (100 \text{ g} / 1000 \text{ g}) \times (1000 \text{ kg} / 1 \text{ ton}) = 178 \text{ g}$

Vikt P per ton äppelrester:  $0,002 \times 148,1 \text{ g/kg} \times (1000 \text{ kg} / 1 \text{ ton}) = 296 \text{ g}$

Vikt S per ton äppelrester:  $0,01 \times 148,1 \text{ g/kg} \times (1000 \text{ kg} / 1 \text{ ton}) = 1481 \text{ g}$

Vikt Mg per ton äppelrester:  $0,0019 \times 148,1 \text{ g/kg} \times (1000 \text{ kg} / 1 \text{ ton}) = 281 \text{ g}$

### ***Halt av näringsämnen i koncentrat***

#### **Förutsättningar**

Andel socker i äppelrester: 6,25 %

Andel socker i koncentratet: 4,20 %

Halt N-NH<sub>3</sub> i pressrester: 178 g/ton

Halt P i äppelrester: 296 g/ton

Halt S i äppelrester: 1481 g/ton

Halt Mg i äppelrester: 281 g/ton

#### **Beräkningar**

Andel socker jämfört med äppelrester:  $4,20 \% / 6,25 \% = 0,67$

Vikt N-NH<sub>3</sub>:  $0,67 \times 178 \text{ g/ton} = 119 \text{ g/ton}$

Vikt P:  $0,67 \times 296 \text{ g/ton} = 198 \text{ g/ton}$

Vikt S:  $0,67 \times 1481 \text{ g/ton} = 992 \text{ g/ton}$

Vikt Mg:  $0,67 \times 281 \text{ g/ton} = 188 \text{ g/ton}$

### ***Halt av näringsämnen i slam***

#### **Förutsättningar**

TS-halt: 0,97 %

Halt N-NH<sub>3</sub>: 10,9 g/kg TS

Halt P: 14 g/kg TS

Halt Mg: 2,0 g/kg TS

Andel socker i äppelrester: 6,25 %

Andel socker i slam: 0,21 %

Halt S i äppelrester: 1481 g/ton

#### **Beräkningar**

Vikt TS per ton slam:  $(0,97 \text{ kg} / 100 \text{ kg}) \times (1000 \text{ kg} / 1 \text{ ton}) = 9,7 \text{ kg TS/ton}$

Vikt N-NH<sub>3</sub> per ton slam:  $10,9 \text{ g/kg TS} / 9,7 \text{ kg TS/ton} = 1,12 \text{ g/ton}$

Vikt P per ton slam:  $14 \text{ g/kg TS} / 9,7 \text{ kg TS/ton} = 1,44 \text{ g/ton}$

Vikt Mg per ton slam:  $2,0 \text{ g/kg TS} / 9,7 \text{ kg TS/ton} = 0,21 \text{ g/ton}$

Andel socker jämfört med äppelrester:  $0,21 \% / 6,25 \% = 0,0336$

Vikt S per ton slam:  $0,0336 \times 1481 \text{ g/ton} = 49,8 \text{ g/ton}$

## **Genomsnittlig sockerhalt i samtliga restströmmar**

### **Förutsättningar**

Vikt slam: 16 900 ton/år (antagen densitet: 1 ton/1 m<sup>3</sup>)

Vikt äppelrester: 459 ton/år

Vikt koncentrat: 2127 ton/år (antagen densitet: 1 ton/1 m<sup>3</sup>)

Sockerhalt slam: 0,21 vikt-%

Fermenterbart socker i äppelrester: 11,3 vikt-%

Sockerhalt i koncentrat: 4,2 vikt-%

### **Beräkningar**

Sockerhalt i samtliga restströmmar:  $((0,0021 \times 16\,900 \text{ ton/år}) + (0,113 \times 459 \text{ ton/år}) + (0,0420 \times 2127 \text{ ton/år})) / (16\,900 \text{ ton/år} + 459 \text{ ton/år} + 2127 \text{ ton/år}) = 0,0091$

## **Genomsnittligt pH-värde i samtliga restströmmar**

### **Förutsättningar**

Volym slam: 16 900 m<sup>3</sup>/år

Volym äppelrester: 459 m<sup>3</sup>/år (antagen densitet: 1 ton/1 m<sup>3</sup>)

Volym koncentrat: 2127 m<sup>3</sup>/år

pH-värde slam: 6,6

pH-värde äppelrester: 3,3

pH-värde koncentrat: 3-7

### **Beräkningar**

Lägsta pH-värde:  $((6,6 \times 16\,900 \text{ m}^3/\text{år}) + (3,3 \times 459 \text{ m}^3/\text{år}) + (3 \times 2\,127 \text{ m}^3/\text{år})) / (16\,900 \text{ m}^3/\text{år} + 459 \text{ m}^3/\text{år} + 2\,127 \text{ m}^3/\text{år}) = 6,1$

Högsta pH-värde:  $((6,6 \times 16\,900 \text{ m}^3/\text{år}) + (3,3 \times 459 \text{ m}^3/\text{år}) + (7 \times 2\,127 \text{ m}^3/\text{år})) / (16\,900 \text{ m}^3/\text{år} + 459 \text{ m}^3/\text{år} + 2\,127 \text{ m}^3/\text{år}) = 6,6$

## **Genomsnittlig ammoniumkvävehalt i samtliga restströmmar**

### **Förutsättningar**

Antagen densitet i samtliga restströmmar: 1 ton/1 m<sup>3</sup>

Vikt slam: 16 900 ton/år

Vikt äppelrester: 459 ton/år

Vikt koncentrat: 2127 ton/år

Halt N-NH<sub>3</sub> i slam: 1,12 g/ton

Halt N-NH<sub>3</sub> i äppelrester: 178 g/ton

Halt N-NH<sub>3</sub> i koncentrat: 119 g/ton

Halt socker i samtliga restströmmar: 9,1 g/l

### **Beräkningar**

Medelhalt av N-NH<sub>3</sub>:  $((16\,900 \text{ ton/år} \times 1,12 \text{ g/ton}) + (459 \text{ ton/år} \times 178 \text{ g/ton}) + (2\,127 \text{ ton/år} \times 119 \text{ g/ton})) / (16\,900 \text{ ton} + 459 \text{ ton} + 2\,127 \text{ ton}) = 18,2 \text{ g/ton}$

Medelhalt per liter:  $(18,2 \text{ g/ton} \times 1 \text{ ton/m}^3) / (1000 \text{ l/m}^3) = 0,0182 \text{ g/l}$

Medelhalt per gram socker:  $0,0182 \text{ g/l} / 9,1 \text{ g/l} = 0,0020 \text{ g/g}$

## **Genomsnittlig fosforhalt i samtliga restströmmar**

### **Förutsättningar**

Antagen densitet i samtliga restströmmar: 1 ton/1 m<sup>3</sup>

Vikt slam: 16 900 ton/år

Vikt äppelrester: 459 ton/år

Vikt koncentrat: 2127 ton/år

Halt P i slam: 1,44 g/ton

Halt P i äppelrester: 296 g/ton

Halt P i koncentrat: 198 g/ton  
Halt socker i samtliga restströmmar: 9,1 g/l

### **Beräkningar**

Medelhalt av P:  $((16\,900 \text{ ton/år} \times 1,44 \text{ g/ton}) + (459 \text{ ton/år} \times 262 \text{ g/ton}) + (2\,127 \text{ ton/år} \times 198 \text{ g/ton})) / (16\,900 \text{ ton/år} + 459 \text{ ton/år} + 2\,127 \text{ ton/år}) = 29,0 \text{ g/ton}$

Medelhalt per liter:  $(29,0 \text{ g/ton} \times 1000 \text{ mg/g} \times 1 \text{ ton/m}^3) / (1\,000 \text{ l/m}^3) = 29,0 \text{ mg/l}$

Medelhalt per gram socker:  $29,0 \text{ mg/l} / 9,1 \text{ g/l} = 3,2 \text{ mg/g}$

### **Genomsnittlig svavelhalt i samtliga restströmmar**

#### **Förutsättningar**

Antagen densitet i samtliga restströmmar: 1 ton/1 m<sup>3</sup>

Vikt slam: 16 900 ton/år

Vikt äppelrester: 459 ton/år

Vikt koncentrat: 2127 ton/år

Halt S i slam: 49,8 g/ton

Halt S i äppelrester: 1481 g/ton

Halt S i koncentrat: 992 g/ton

Halt socker i samtliga restströmmar: 9,1 g/l

### **Beräkningar**

Medelhalt av S:  $((16\,900 \text{ ton/år} \times 49,8 \text{ g/ton}) + (459 \text{ ton/år} \times 1481 \text{ g/ton}) + (2\,127 \text{ ton/år} \times 992 \text{ g/ton})) / (16\,900 \text{ ton/år} + 459 \text{ ton/år} + 2\,127 \text{ ton/år}) = 186,36 \text{ g/ton}$

Medelhalt per liter:  $(186,36 \text{ g/ton} \times 1000 \text{ mg/g} \times 1 \text{ ton/m}^3) / (1\,000 \text{ l/m}^3) = 186,4 \text{ mg/l}$

Medelhalt per gram socker:  $186,4 \text{ mg/l} / 9,1 \text{ g/l} = 20,5 \text{ mg/g}$

### **Genomsnittlig magnesiumhalt i samtliga restströmmar**

#### **Förutsättningar**

Antagen densitet i samtliga restströmmar: 1 ton/1 m<sup>3</sup>

Vikt slam: 16 900 ton/år

Vikt äppelrester: 459 ton/år

Vikt koncentrat: 2127 ton/år

Halt Mg i slam: 0,2 g/ton

Halt Mg i äppelrester: 281 g/ton

Halt Mg i koncentrat: 188 g/ton

Halt socker i samtliga restströmmar: 9,1 g/l

### **Beräkningar**

Medelhalt av Mg:  $((16\,900 \text{ ton/år} \times 0,2 \text{ g/ton}) + (459 \text{ ton/år} \times 281 \text{ g/ton}) + (2\,127 \text{ ton/år} \times 188 \text{ g/ton})) / (16\,900 \text{ ton/år} + 459 \text{ ton/år} + 2\,127 \text{ ton/år}) = 27,3 \text{ g/ton}$

Medelhalt per liter:  $(27,3 \text{ g/ton} \times 1000 \text{ mg/g} \times 1 \text{ ton/m}^3) / (1\,000 \text{ l/m}^3) = 27,3 \text{ mg/l}$

Medelhalt per gram socker:  $27,3 \text{ mg/l} / 9,1 \text{ g/l} = 3,0 \text{ mg/g}$

## Bilaga 2 – Odlingsförutsättningar och etanolutbyte

### Tillsatser för tillväxt av BY4741

Tabell 23. Tillsatser i substrat för tillväxt av BY4741 (Hanscho et al. 2012)

Aminosyra	Koncentration (mg/l)
Glutamin	100
Histidin	35
Leucin	110
Lysin	120
Metionin	40
Fenylalanin	50
Serin	375
Treonin	200
Uracil	40

### Innehåll av aminosyror i äpplen

Tabell 24. Innehåll av urval av aminosyror i äpplen

Aminosyra	Koncentration (mg/g N) <sup>1</sup>	Koncentration (mg/äpple) <sup>2</sup>
Glutamin	uppgift saknas	44
Histidin	100	9
Leucin	336	24
Lysin	uppgift saknas	22
Metionin	uppgift saknas	11
Fenylalanin	uppgift saknas	11
Serin	uppgift saknas	18
Treonin	200	11
Uracil	uppgift saknas	uppgift saknas

<sup>1</sup>Matkalkyl.se (u.å.)

<sup>2</sup>SFGate (u.å.)

### Analys av mängden aminosyror i restströmmarna

#### Förutsättningar

TS-halt äppelrester: 148,1 g per kg

TS-halt slam: 0,97 % eller 9,7 g/kg

Halt N i äppelrester: 1,2 % (torrvikt)

Histidin i äpplen: 100 mg/g N

Andel socker i äppelrester: 6,25 %

Andel socker i koncentrat: 4,20 %

Andel aminosyror i reningsslam: 61 % (torrvikt)

Antagen andel histidin av aminosyror i reningsslam: 3 %

#### Beräkningar

N-halt i äppelrester:  $0,012 \times 148,1 \text{ g/kg} = 1,78 \text{ g/kg}$

Vikt histidin per kg äppelrester:  $((100 \text{ mg/g} \times 1780 \text{ mg/g}) / 1000 \text{ mg/g}) \times 1000 \text{ g/kg} = 17,8 \text{ g/kg}$

Vikt histidin per kg koncentrat:  $(4,20 \% / 6,25 \%) \times 17,8 \text{ g/kg} = 11,9 \text{ g/kg}$

Vikt histidin i reningsslam:  $9,7 \text{ g/kg} \times 0,61 \times 0,03 = 0,2 \text{ g/kg}$

Histidin i samtliga restströmmar (antagna densiteter 1 kg/l):  $((17,8 \text{ g/l} \times 549\,000 \text{ l}) + (11,9 \text{ g/l} \times 2\,127\,000 \text{ l}) + (0,2 \text{ g/l} \times 16\,900\,000 \text{ l})) / (549\,000 \text{ l} + 16\,900\,000 \text{ l} + 2\,127\,000 \text{ l}) = 2,0 \text{ g/l}$

### **Utbyte av etanol per gram glukos för BY4741**

#### **Förutsättningar**

18,1 mmol etanol ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ) per 12 mmol glukos ( $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ )

#### **Beräkningar**

Molvikt  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ :  $(2 \times 12,01 \text{ g}) + (5 \times 1,008 \text{ g}) + 16,00 \text{ g} + 1,008 \text{ g} = 46,07 \text{ g}$

Molvikt  $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 = (6 \times 12,01 \text{ g}) + (12 \times 1,008 \text{ g}) + (6 \times 16,00 \text{ g}) = 180,16 \text{ g}$

Vikt etanol per gram glukos:  $((18,1 / (1\,000 \text{ mmol/mol})) \times 46,07 \text{ g}) / ((12 / (1\,000 \text{ mmol/mol})) \times 180,16 \text{ g}) = 0,386 \text{ g}$

### **Behov av näringsämnen vid odling av BY4741**

#### **Förutsättningar**

5 g  $(\text{NH}_4)\text{SO}_4/\text{l}$  substrat

1,7 g YNB/l substrat

Antagen densitet för YNB: 1 g/0,001 l

1 g  $\text{KH}_2\text{PO}_4/\text{l}$  YNB

0,5 g  $\text{MgSO}_4/\text{l}$  YNB

#### **Beräkningar**

##### *Molvikter*

Molvikt  $\text{MgSO}_4$ :  $24,31 \text{ g} + 32,02 \text{ g} + (4 \times 16,00 \text{ g}) = 120,33 \text{ g}$

Molvikt  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ :  $39,10 \text{ g} + (2 \times 1,008 \text{ g}) + 30,97 \text{ g} + (4 \times 16,00 \text{ g}) = 136,086 \text{ g}$

Molvikt  $(\text{NH}_4)\text{SO}_4$ :  $14,01 \text{ g} + (4 \times 1,008 \text{ g}) + 32,02 \text{ g} + (4 \times 16,00 \text{ g}) = 114,062 \text{ g}$

##### *Ammoniumkväve*

Andel N- $\text{NH}_4$  i  $(\text{NH}_4)\text{SO}_4$ :  $14,01 \text{ g} / 114,062 \text{ g} = 0,123$

Vikt N- $\text{NH}_4$  per l substrat:  $0,123 \times (5 \text{ g/l} \times 1\,000 \text{ mg/g}) \times 1\,000 \text{ mg/g} = 615,0 \text{ mg/l}$

Vikt N-  $\text{NH}_4$  per g konsumerad glukos:  $615 \text{ mg/l} / 12 \text{ g/l} = 51,3 \text{ mg/g}$

##### *Fosfor*

Andel P i  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ :  $30,97 \text{ g} / 136,086 \text{ g} = 0,228$

Vikt P per l substrat:  $0,228 \times 1 \text{ g/l YNB} \times 0,0017 \text{ l YNB/l} = 0,00388 \text{ g/l}$

Vikt P i mg per l substrat:  $0,00388 \text{ g/l} \times 1\,000 \text{ mg/g} = 3,88 \text{ mg/l}$

Vikt P per g konsumerad glukos:  $3,88 \text{ mg} / 12 \text{ g} = 0,32 \text{ mg/g}$

##### *Svavel*

Andel S i  $\text{MgSO}_4$ :  $32,02 \text{ g} / 120,33 \text{ g} = 0,266$

Andel S i  $(\text{NH}_4)\text{SO}_4$ :  $32,02 \text{ g} / 114,062 \text{ g} = 0,281$

Vikt S per l substrat:  $((0,266 \times 0,5 \text{ g/l YNB} \times 0,0017 \text{ l YNB/l}) + (0,281 \times 5 \text{ g/l substrat})) \times 1\,000 \text{ mg/g} = 1405,2 \text{ mg/l}$

Vikt S per g konsumerad glukos:  $1\,405,2 \text{ mg/l} / 12 \text{ g/l} = 117,1 \text{ mg/g}$

##### *Magnesium*

Andel Mg i  $\text{MgSO}_4$ :  $24,31 \text{ g} / 120,33 \text{ g} = 0,202$

Vikt Mg per l substrat:  $0,202 \times 0,5 \text{ g/l YNB} \times 0,0017 \text{ l YNB/l} \times 1\,000 \text{ mg/g} = 0,172 \text{ mg/l}$

Vikt Mg per g konsumerad glukos:  $0,172 \text{ mg} / 12 \text{ g} = 0,014 \text{ mg/g}$



## **Behov av tillsatt ammoniumkväve på Företaget**

### **Förutsättningar**

Behov av N-NH<sub>4</sub> per gram glukos: 51,3 mg/g

Tillgängligt N-NH<sub>4</sub> i restströmmar: 2 mg/g glukos

Sockerkhalt i restströmmar: 9,1 g/l

Volym slam: 16 900 m<sup>3</sup>/år

Volym äppelrester: 459 m<sup>3</sup>/år (antagen densitet: 1 ton/ m<sup>3</sup>)

Volym koncentrat: 2 127 m<sup>3</sup>/år

### **Beräkningar**

Behov av N-NH<sub>4</sub> per l: (51,3 mg/g - 2 mg/g) x 9,1 g/l = 448,6 mg/l

Behov av per år: ((448,6 mg/l / 10<sup>6</sup> mg/kg) x 1000 l/m<sup>3</sup>) x (16 900 m<sup>3</sup>/år + 459 m<sup>3</sup>/år + 2 127 m<sup>3</sup>/år) = 8 556 kg/år

## **Behov av tillsatt svavel på Företaget**

### **Förutsättningar**

Behov av S per gram glukos: 117,1 mg/g

Tillgängligt S i restströmmar: 20,5 mg/g glukos

Sockerkhalt i restströmmar: 9,1 g/l

Volym slam: 16 900 m<sup>3</sup>/år

Volym äppelrester: 459 m<sup>3</sup>/år (antagen densitet: 1 ton/ m<sup>3</sup>)

Volym koncentrat: 2 127 m<sup>3</sup>/år

### **Beräkningar**

Behov av S per l: (117,1 mg/g - 20,5 mg/g) x 9,1 g/l = 879,1 mg/l

Behov av S per år: ((879,1 mg/l / 10<sup>6</sup> mg/kg) x 1 000 l/m<sup>3</sup>) x (16 900 m<sup>3</sup>/år + 459 m<sup>3</sup>/år + 2 127 m<sup>3</sup>/år) = 16 766 kg/år

## **Potentiell etanolproduktion på Företaget**

### **Förutsättningar**

0,39 g etanol/g socker ger 0,39 kg etanol/kg socker

Densitet etanol (vid 15 °C): 790 kg/m<sup>3</sup>

0,91 % socker i restströmmar

Vikt slam: 16 900 ton/år (antagen densitet: 1 ton/ m<sup>3</sup>)

Vikt äppelrester: 459 ton/år

Vikt koncentrat: 2 127 ton/år (antagen densitet: 1 ton/ m<sup>3</sup>)

### **Beräkningar**

Vikt socker i restströmmarna: (16 900 ton/år + 459 ton/år + 2 127 ton/år) x 1000 kg/ton x 0,0091 = 177 320 kg/år

Vikt etanol: 177 320 kg/år x 0,39 kg/kg socker = 69 155 kg/år

Volym etanol: 69 155 kg/år / 790 kg/m<sup>3</sup> = 87,54 m<sup>3</sup>/år

## **Bilaga 3 – Energibalanser, system etanolproduktion**

### ***Energivärde i producerad etanol***

#### **Förutsättningar**

Energivärde etanol: 21 240 MJ/m<sup>3</sup>

Etanolproduktion: 87,54 m<sup>3</sup>/år

#### **Beräkning**

Energivärde producerad etanol: 21 240 MJ/m<sup>3</sup> x 87,54 m<sup>3</sup>/år = 1 859 350 MJ/år

### ***Etanolproduktion per 100 g substrat***

#### **Förutsättningar**

Etanolproduktion per gram glukos: 0,39 g/g

Sockershalt: 9,1 g/l

Antagen densitet för substrat: 1 kg/l

#### **Beräkning**

Etanolproduktion per 100 g substrat:  $((0,39 \text{ g/g} \times (9,1 \text{ g/l} / 1 \text{ kg/l})) / 1000 \text{ g/kg}) \times 100 \text{ g}$   
= 0,355 g

### ***Energianvändning vid malning***

#### **Förutsättningar**

Energianvändning malning av äpplen: 0,108 MJ för 27,2 kg

Vikt äppelrester: 459 ton/år

#### **Beräkningar**

Energianvändning per kilo: 0,108 MJ / 27,2 kg = 3,97 MJ/kg

Energianvändning: 3,97 MJ/kg x 459 ton/år = 1 822 MJ/år

### ***Energianvändning vid fermentering***

#### **Förutsättningar**

Energianvändning: 9,9 MJ/m<sup>3</sup>

Volym slam: 16 900 m<sup>3</sup>/år

Volym äppelrester: 459 m<sup>3</sup>/år (antagen densitet: 1 ton/ m<sup>3</sup>)

Volym koncentrat: 2 127 m<sup>3</sup>/år

#### **Beräkning**

Energianvändning: 9,9 MJ/m<sup>3</sup> x (16 900 m<sup>3</sup>/år + 459 m<sup>3</sup>/år + 2 127 m<sup>3</sup>/år) = 192 911 MJ/år

### ***Energianvändning vid hydrolys***

#### **Förutsättningar**

Energianvändning: 15 MJ/m<sup>3</sup>

Volym äppelrester: 459 m<sup>3</sup>/år (antagen densitet: 1 ton/ m<sup>3</sup>)

#### **Beräkning**

Energianvändning: 15 MJ/m<sup>3</sup> x 459 m<sup>3</sup>/år = 8 262 MJ/år

### ***Energianvändning vid destillation***

#### **Förutsättningar**

Fossilbränsleanvändning för 0,355 vikt%: 23,8 MJ/kg etanol

Energianvändning vid användning av elektricitet: 1/3 av fossilbränsleanvändning

Etanolproduktion: 69 155 kg/år

#### **Beräkningar**

Energianvändning elektricitet per kg etanol: 23,8 MJ/kg / 3 = 7,9 MJ/kg

Energianvändning per år:  $7,9 \text{ MJ/kg} \times 69\,155 \text{ kg/år} = 548\,399 \text{ MJ/år}$

### ***Energianvändning vid avvattning***

#### **Förutsättningar**

Energianvändning per l substrat: 0,14 MJ/l

Vattenkoncentration i substrat som genomgått destillation: 4,37 vikt%

Vikt etanolproduktion: 69 155 kg/år

Volym etanolproduktion: 87 540 l/år

Densitet vatten: 1 kg/l

#### **Beräkningar**

Inkommande vätska (etanol + vatten):  $69\,155 \text{ kg/år} / (1 - 0,0437) = 72\,315 \text{ kg/år}$

Vikt vatten:  $72\,315 \text{ kg/år} - 69\,155 \text{ kg/år} = 3\,160 \text{ kg/år}$

Volym inkommande substrat:  $87\,540 \text{ l/år} + (3\,160 \text{ kg/år} \times 1 \text{ kg/l}) = 90\,700 \text{ l/år}$

Energianvändning:  $0,14 \text{ MJ/l} \times 90\,700 \text{ l/år} = 12\,698 \text{ MJ/år}$

### ***Transport till Karpalund (sträcka fram och tillbaka)***

#### **Förutsättningar**

Volym vinass per l producerad etanol: 16 l/l

Etanolproduktion: 87 540 l/år

Antagen densitet för vinass: 1 kg/l

32 ton last per upphämtning

Sträcka: 5,1 mil

Bränsleförbrukning: 5 l HVO per mil

Energivärde HVO:  $9\,440 \text{ kWh/Nm}^3$

#### **Beräkningar**

Producerad vinass:  $16 \text{ l/l} \times 87\,540 \text{ l/år} = 1\,400\,640 \text{ l/år}$

Vikt vinass:  $(1\,400\,640 \text{ l/år} \times 1 \text{ kg/l}) / 1\,000 \text{ kg/ton} = 1\,400,64 \text{ ton/år}$

Antal hämtningar:  $1\,400,64 \text{ ton/år} / 32 \text{ ton} = 44 \text{ ggr/år}$

Sträcka fram och tillbaka:  $(5,1 \text{ mil} \times 2) \times 44 \text{ ggr/år} = 448,8 \text{ mil/år}$

HVO-användning:  $448,8 \text{ mil/år} \times 5 \text{ l/mil} = 2\,244 \text{ l/år}$

Energivärde förbrukad HVO:  $(2\,244 \text{ l/år} / 1\,000 \text{ l/m}^3) \times (9\,440 \text{ kWh/m}^3 \times 3,6 \text{ MJ/kWh}) = 76\,260 \text{ MJ/år}$

### ***Biogaspotential i vinass***

#### **Förutsättningar**

Producerad etanol: 87 540 l/år

COD-innehåll i vinass: 0,45 kg COD per liter

Produktion av biogas:  $0,53 \text{ Nm}^3/\text{kg COD}$

Energivärde biogas:  $23,65 \text{ MJ/Nm}^3$

#### **Beräkningar**

COD i vinass:  $87\,540 \text{ l/år} \times 0,45 \text{ kg COD/l} = 39\,393 \text{ kg/år}$

Biogaspotential:  $39\,393 \text{ kg/år} \times 0,53 \text{ Nm}^3/\text{kg} = 20\,878 \text{ Nm}^3/\text{år}$

Energiproduktion:  $20\,878 \text{ Nm}^3/\text{år} \times 23,65 \text{ MJ/Nm}^3 = 493\,765 \text{ MJ/år}$

### ***Energianvändning vid biogasrötning***

#### **Förutsättningar**

Elanvändning: 0,052 MJ/MJ biogas

Energivärde vinass: 493 765 MJ/år

#### **Beräkning**

Elanvändning för biogasproduktion:  $493\,765 \text{ MJ/år} \times 0,052 \text{ MJ/MJ} = 25\,676 \text{ MJ/år}$

## ***Energianvändning vid uppgradering till fordonsgas***

### **Förutsättningar**

Biogaspotential vinass: 20 878 Nm<sup>3</sup>/år

Elanvändning vid uppgradering: 0,28 kWh/Nm<sup>3</sup> biogas

### **Beräkning**

Energianvändning vid uppgradering: 20 878 Nm<sup>3</sup>/år x (0,28 kWh/Nm<sup>3</sup> x 3,6 MJ/kWh) = 21 045 MJ/år

## ***Metanutsläpp vid biogasrötning***

### **Förutsättningar**

Energivärde vinass: 493 765 MJ/år

Metanutsläpp vid biogasrötning: 1,5 % av energivärdet

### **Beräkning**

Energivärde metanutsläpp: 493 765 MJ/år x 0,015 = 7 406 MJ/år

## ***Metanutsläpp vid uppgradering till fordonsgas***

### **Förutsättningar**

Energivärde vinass: 493 765 MJ/år

Energivärde metanutsläpp vid biogasrötning: 7 406 MJ/år

Metanutsläpp vid uppgradering: 1,0 % av energivärdet

### **Beräkning**

Energivärde metanutsläpp: (493 765 MJ/år - 7 406 MJ/år)  
x 0,01 = 4 864 MJ/år

## **Bilaga 4 – Klimatpåverkan vid etanolproduktion**

### ***Koldioxidbildning vid etanolfärmentering***

#### **Förutsättningar**

1 mol CO<sub>2</sub> per mol C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH (etanol)

Etanolproduktion: 69 155 kg/år

#### **Beräkningar**

Vikt en mol CO<sub>2</sub>: 12,01 g + (2 x 16,00 g) = 44,01 g

Vikt en mol C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH: (2 x 12,01 g) + (5 x 1,008 g) + 16,00 g + 1,008 g = 46,07 g

Producerad CO<sub>2</sub> per kg C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH: (44,01 g / 46,07 g) x 1 000 g/kg = 955,3 g/kg

Bildad CO<sub>2</sub> per år: (69 155 kg/år x 955,3 g/kg) / 10<sup>3</sup> g/kg = 66 064 kg/år

### ***Klimatutsläpp via elanvändning***

#### **Förutsättningar**

Malning: 1 822 MJ/år

Hydrolys: 8 262 MJ/år

Fermentering: 192 911 MJ/år

Destillation: 548 399 MJ/år

Avvattning: 12 698 MJ/år

Biogasrötning: 25 676 MJ/år

Uppgradering: 21 045 MJ/år

Koldioxidutsläpp vid elproduktion: 27,9 g CO<sub>2</sub>-ekv./MJ

#### **Beräkningar**

Elanvändning: 1 822 MJ/år + 8 262 MJ/år + 192 911 MJ/år + 548 399 MJ/år +

12 698 MJ/år + 25 676 MJ/år + 21 045 MJ/år = 810 813 MJ/år

Koldioxidutsläpp från elanvändning: 810 813 MJ/år x (27,9 g CO<sub>2</sub>-ekv./MJ / 1 000 g/kg)

= 22 622 kg CO<sub>2</sub>-ekv./år

### ***Klimatutsläppsminskning då etanol ersätter fossila bränslen***

#### **Förutsättningar**

Klimatutsläpp fossila bränslen: 2 879 kg CO<sub>2</sub>-ekv./m<sup>3</sup>

Energivärde fossila bränslen: 34 020 MJ/m<sup>3</sup>

Energivärde etanol: 21 240 MJ/m<sup>3</sup>

Energivärde producerad etanol: 1 859 350 MJ/år

#### **Beräkningar**

Ersatt fossilt bränsle: 1 859 350 MJ/år / 34 020 MJ/m<sup>3</sup> = 54,65 m<sup>3</sup>/år

Minskade klimatutsläpp: 54,65 m<sup>3</sup>/år x 2 879 kg CO<sub>2</sub>-ekv./m<sup>3</sup> = 157 337 kg CO<sub>2</sub>-ekv./år

### ***Klimatutsläpp från transport av vinass***

#### **Förutsättningar**

Klimatutsläpp HVO: 472 kg CO<sub>2</sub>-ekv./m<sup>3</sup>

HVO-förbrukning: 2 244 l/år

#### **Beräkning**

Klimatutsläpp HVO: 472 kg CO<sub>2</sub>-ekv./m<sup>3</sup> x (2 244 l/år / 1 000 l/m<sup>3</sup>) = 1 059 kg/år

### ***Klimatutsläpp vid rötanläggning***

#### **Förutsättningar**

Energivärde metanutsläpp: 7 406 MJ/år

Energivärde metan: 13,9 kWh/kg

Koldioxidekvivalenter metan: 25 kg CO<sub>2</sub>-ekv./kg

### **Beräkningar**

Vikt metanutsläpp:  $7\,406 \text{ MJ/år} / (13,9 \text{ kWh/kg} \times 3,6 \text{ MJ}) = 148 \text{ kg/år}$

Utsläpp av CO<sub>2</sub>-ekv:  $148 \text{ kg} \times 25 \text{ kg CO}_2\text{-ekv./kg} = 3\,700 \text{ kg CO}_2\text{-ekv./år}$

### ***Klimatutsläpp vid uppgradering av biogasen***

#### **Förutsättningar**

Energivärde metanutsläpp:  $4\,864 \text{ MJ/år}$

Energivärde metan:  $13,9 \text{ kWh/kg}$

Koldioxidekvivalenter metan:  $25 \text{ kg CO}_2\text{-ekv./kg}$

#### **Beräkningar**

Vikt metanutsläpp:  $4\,864 \text{ MJ/år} / (13,9 \text{ kWh/kg} \times 3,6 \text{ MJ/kWh}) = 97 \text{ kg/år}$

Utsläpp av CO<sub>2</sub>-ekv:  $97 \text{ kg/år} \times 25 \text{ kg CO}_2\text{-ekv./kg} = 2\,425 \text{ kg CO}_2\text{-ekv./år}$

### ***Klimatutsläppsminskning då biogas ersätter fossila bränslen***

#### **Förutsättningar**

Klimatutsläpp fossila bränslen:  $2\,879 \text{ kg CO}_2\text{-ekv./m}^3$

Energivärde fossila bränslen:  $34\,020 \text{ MJ/m}^3$

Energivärde biogas:  $9,97 \text{ kWh/Nm}^3$

Energivärde vinass:  $493\,765 \text{ MJ/år}$

#### **Beräkningar**

Ersatt fossilt bränsle:  $493\,765 \text{ MJ/år} / 34\,020 \text{ MJ/m}^3 = 14,51 \text{ m}^3\text{/år}$

Minskade klimatutsläpp:  $14,51 \text{ m}^3\text{/år} \times 2\,879 \text{ kg CO}_2\text{-ekv./m}^3 = 41\,774 \text{ kg CO}_2\text{-ekv./år}$

## **Bilaga 5 – Odlingförutsättningar och biodieselutbyte**

### **Behov av näringsämnen vid odling av C. 107**

#### **Förutsättningar**

3 g NH<sub>4</sub>Cl/l substrat  
7 g KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>/l substrat  
2 g NaHPO<sub>4</sub>/l substrat  
1,5 g MgSO<sub>4</sub> · 7H<sub>2</sub>O/ l substrat  
0,001 g ZnSO<sub>4</sub>/ l substrat  
30 g glukos/l substrat

#### **Beräkningar**

##### *Molvikter*

Molvikt (NH<sub>4</sub>)Cl: 14,01 g + (4 x 1,008 g) + 35,45 g = 53,49 g  
Molvikt KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>: 39,10 g + (2 x 1,008 g) + 30,97 g + (4 x 16,00 g) = 136,09 g  
Molvikt NaHPO<sub>4</sub>: 22,99 g + 1,008 g + 30,97 g + (4 x 16,00 g) = 118,97 g  
Molvikt MgSO<sub>4</sub>: 24,31 g + 32,02 g + (4 x 16,00 g) + (7 x ((2 x 1,008) x 16,00)) = 346,12 g  
Molvikt ZnSO<sub>4</sub>: 65,38 g + 32,02 g + (4 x 16,00 g) = 161,40 g

##### *Ammoniumkväve*

Andel N-NH<sub>4</sub> i NH<sub>4</sub>Cl: 14,01 g / 53,49 g = 0,262 g/g  
Vikt N-NH<sub>4</sub> per l substrat: (0,262 g/g x 3 g/l) x 1 000 mg/g = 262 mg/l  
Vikt N- NH<sub>4</sub> per g konsumerad glukos: 262 mg/l / 30 g/l = 8,7 mg/g

##### *Fosfor*

Andel P i KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>: 30,97 g / 136,09 g = 0,228 g/g  
Andel P i NaHPO<sub>4</sub>: 30,97 g / 118,97 g = 0,260 g/g  
Vikt P per l substrat: ((0,228 x 7 g/l) + (0,260 x 2 g/l)) x 1 000 mg/g = 2120 mg/l  
Vikt P per g konsumerad glukos: 2 120 mg/l / 30 g/l = 70,7 mg/g

##### *Svavel*

Andel S i MgSO<sub>4</sub> · 7H<sub>2</sub>O: 32,02 g / 346,12 g = 0,093 g/g  
Andel S i ZnSO<sub>4</sub>: 32,02 g / 161,40 g = 0,198 g/g  
Vikt S per l substrat: ((0,093 x 1,5 g) + (0,198 x 0,001 g)) x 1 000 mg/g = 14 mg/l  
Vikt S per g konsumerad glukos: 14 mg/l / 30 g/l = 0,005 mg/g

##### *Magnesium*

Andel Mg i MgSO<sub>4</sub> · 7H<sub>2</sub>O: 24,31 g / 346,12 g = 0,070 g/g  
Vikt Mg per l substrat: (0,070 g/g x 1,5 g/l) x 1 000 mg/g = 110 mg/l  
Vikt Mg per g konsumerad glukos: 110 mg/l / 30 g/l = 3,7 mg/g

### **Behov av tillsatt ammoniumkväve på Företaget**

#### **Förutsättningar**

Behov av N-NH<sub>4</sub>: 8,7 mg/g glukos  
Tillgängligt N-NH<sub>4</sub> i restströmmar: 2,0 mg/g glukos  
Sockershalt i restströmmar: 9,1 g/l  
Volym slam: 16 900 m<sup>3</sup>/år  
Volym äppelrester: 459 m<sup>3</sup>/år (antagen densitet: 1 kg/m<sup>3</sup>)  
Volym koncentrat: 2 127 m<sup>3</sup>/år

#### **Beräkningar**

Behov av N-NH<sub>4</sub> per l: (8,7 mg/g - 2,0 mg/g) x 9,1 g/l = 61,0 mg/l

Behov av N-NH<sub>4</sub> per år:  $((61,0 \text{ mg/l} / 10^6 \text{ mg/kg}) \times 1\,000 \text{ l/m}^3) \times (16\,900 \text{ m}^3/\text{år} + 459 \text{ m}^3/\text{år} + 2\,127 \text{ m}^3/\text{år}) = 1\,163 \text{ kg}/\text{år}$

### **Behov av tillsatt fosfor på Företaget**

#### **Förutsättningar**

Behov av P: 70,7 mg/g glukos

Tillgänglig P i restströmmar: 3,2 mg/g glukos

Sockerkhalt i restströmmar: 9,1 g/l

Volym slam: 16 900 m<sup>3</sup>/år

Volym äppelrester: 459 m<sup>3</sup>/år (antagen densitet: 1 kg/m<sup>3</sup>)

Volym koncentrat: 2 127 m<sup>3</sup>/år

#### **Beräkningar**

Behov av P per l:  $(70,7 \text{ mg/g} - 3,2 \text{ mg/g}) \times 9,1 \text{ g/l} = 614,3 \text{ mg/l}$

Behov av P per år:  $((614,3 \text{ mg/l} / 10^6 \text{ mg/kg}) \times 1\,000 \text{ l/m}^3) \times (16\,900 \text{ m}^3/\text{år} + 459 \text{ m}^3/\text{år} + 2\,127 \text{ m}^3/\text{år}) = 11\,716 \text{ kg}/\text{år}$

### **Behov av tillsatt magnesium på Företaget**

#### **Förutsättningar**

Behov av Mg: 3,7 mg/g glukos

Tillgänglig Mg i restströmmar: 3,0 mg/g glukos

Sockerkhalt i restströmmar: 9,1 g/l

Volym slam: 16 900 m<sup>3</sup>/år

Volym äppelrester: 459 m<sup>3</sup>/år (antagen densitet: 1 kg/m<sup>3</sup>)

Volym koncentrat: 2 127 m<sup>3</sup>/år

#### **Beräkningar**

Behov av Mg per l:  $(3,7 \text{ mg/g} - 3,0 \text{ mg/g}) \times 9,1 \text{ g/l} = 6,4 \text{ mg/l}$

Behov av Mg per år:  $((6,4 \text{ mg/l} / 10^6 \text{ mg/kg}) \times 1\,000 \text{ l/m}^3) \times (16\,900 \text{ m}^3/\text{år} + 459 \text{ m}^3/\text{år} + 2\,127 \text{ m}^3/\text{år}) = 122 \text{ kg}/\text{år}$

### **Potentiell biodieselproduktion på Företaget**

#### **Förutsättningar**

Lipidutbyte: 10,25 % av biomassa (torrvikt)

Torrvikt studie av Gill et al. (1977): 6,1 g/l

Konsumerat socker i studie av Gill et al. (1977): 12 g/l

Sockerkhalt restströmmar på Företaget: 9,1 g/l

Volym slam: 16 900 m<sup>3</sup>/år

Volym äppelrester: 459 m<sup>3</sup>/år (antagen densitet: 1 kg/m<sup>3</sup>)

Volym koncentrat: 2 127 m<sup>3</sup>/år

Andel lipider som extraheras: 70,8 %

Andel transesterifierbara lipider: 98,7 %

Densitet FAME: 884 kg/m<sup>3</sup>

#### **Beräkningar**

Torrvikt biomassa per gram glukos i studie av Gill et al. (1977):  $6,1 \text{ g/l} / 12 \text{ g/l} = 0,51 \text{ g/g}$

Torrvikt biomassa restströmmar på Företaget:  $0,51 \text{ g/g} \times 9,1 \text{ g/l} = 4,64 \text{ g/l}$

Lipidutbyte restströmmar på Företaget:  $4,64 \text{ g/l} \times 0,1025 = 0,48 \text{ g/l}$

Lipidutbyte per år på Företaget:  $((0,48 \text{ g/l} / 10^6 \text{ g/ton}) \times 1\,000 \text{ l/m}^3) \times (16\,900 \text{ m}^3/\text{år} + 459 \text{ m}^3/\text{år} + 2\,127 \text{ m}^3/\text{år}) = 9\,353 \text{ kg}/\text{år}$

Utbyte efter extraktion:  $9\,353 \text{ kg}/\text{år} \times 0,708 = 6\,622 \text{ kg}/\text{år}$

Utbyte av transesterifierbara lipider (biodiesel):  $6\,622 \text{ kg}/\text{år} \times 0,987 = 6\,536 \text{ kg}/\text{år}$

Volym biodiesel:  $6\,536 \text{ kg}/\text{år} / 884 \text{ kg/m}^3 = 7,39 \text{ m}^3/\text{år}$



## **Bilaga 6 – Energibalanser, system biodieselproduktion**

### ***Energivärde för producerad biodiesel***

#### **Förutsättningar**

Energivärde FAME: 32 900 MJ/m<sup>3</sup>

Volym biodiesel: 7,39 m<sup>3</sup>/år

#### **Beräkningar**

Energivärde producerad biodiesel: 7,39 m<sup>3</sup>/år x 32 900 MJ/m<sup>3</sup> = 243 131 MJ/år

### ***Energianvändning vid odling***

#### **Förutsättningar**

Energianvändning: 10,6 MJ/m<sup>3</sup>

Volym slam: 16 900 m<sup>3</sup>/år

Volym äppelrester: 459 m<sup>3</sup>/år (antagen densitet: 1 kg/m<sup>3</sup>)

Volym koncentrat: 2 127 m<sup>3</sup>/år

#### **Beräkningar**

Energianvändning: 10,6 MJ/m<sup>3</sup> x (16 900 m<sup>3</sup>/år + 459 m<sup>3</sup>/år + 2 127 m<sup>3</sup>/år) = 206 552 MJ/år

### ***Energianvändning vid centrifugering***

#### **Förutsättningar**

Energianvändning: 1,8 MJ/m<sup>3</sup>

Volym slam: 16 900 m<sup>3</sup>/år

Volym äppelrester: 459 m<sup>3</sup>/år (antagen densitet: 1 kg/m<sup>3</sup>)

Volym koncentrat: 2 127 m<sup>3</sup>/år

#### **Beräkning**

Energianvändning: 1,8 MJ/m<sup>3</sup> x (16 900 m<sup>3</sup>/år + 459 m<sup>3</sup>/år + 2 127 m<sup>3</sup>/år) = 35 075 MJ/år

### ***Energianvändning vid ultraljudsbehandling***

#### **Förutsättningar**

Antagen densitet för restströmmar och biomassa: 1 ton/1 m<sup>3</sup>

Torrsvikt biomassa: 4,6 g/l substrat

TS-halt centrifugerad biomassa: 17,5 %

Volym slam: 16 900 m<sup>3</sup>/år

Volym äppelrester: 459 m<sup>3</sup>/år

Volym koncentrat: 2 127 m<sup>3</sup>/år

Energianvändning vid 0,3-1,5 m<sup>3</sup>/h: 16 kW

#### **Beräkningar**

Torrsvikt biomassa per år: (4,6 g/l / 10<sup>3</sup> g/kg) x ((16 900 m<sup>3</sup>/år + 459 m<sup>3</sup>/år + 2 127 m<sup>3</sup>/år) x 1 000 l/m<sup>3</sup>) = 89 636 kg/år

Volym centrifugerad biomassa: (89 636 kg/år / 1 000 kg/ton x 1 ton/m<sup>3</sup>) / (0,175) = 512,2 m<sup>3</sup>/år

Medelhastighet: (0,3 m<sup>3</sup>/h + 1,5 m<sup>3</sup>/h) / 2 = 0,9 m<sup>3</sup>/h

Energianvändning per m<sup>3</sup>: 16 kW / 0,9 m<sup>3</sup>/h = 17,8 kWh/m<sup>3</sup>

Energianvändning i MJ: 17,8 kWh/m<sup>3</sup> x 3,6 MJ = 64,0 MJ/m<sup>3</sup>

Energianvändning per år: 64,0 MJ/m<sup>3</sup> x 512,2 m<sup>3</sup>/år = 32 781 MJ/år

### ***Energianvändning för produktion av metanol till extraktion***

#### **Förutsättningar**

Behov av metanol: 0,3 ml/g lipider

Vikt lipider: 9 353 kg/år  
Densitet metanol: 793 kg/m<sup>3</sup>  
Energianvändning produktion av metanol: 7,4 MJ/kg

### **Beräkningar**

Volym erfordrad metanol: 0,3 ml/g lipider x (1 000 ml/l / 1 000 g/kg) x 9 353 kg/år = 2 806 l/år

Vikt erfordrad metanol: (2 806 l/år / 1 000 l/m<sup>3</sup>) x 793 kg/m<sup>3</sup> = 2 225 kg/år

Energianvändning produktion av metanol: 2 225 kg/år x 7,4 MJ/kg = 16 465 MJ/år

### ***Energianvändning i extraktionsprocessen***

#### **Förutsättningar**

Energianvändning: 0,2 MJ/kg biomassa (torrvikt)

Torrvikt biomassa: 89 636 kg/år

#### **Beräkning**

Energianvändning: 0,2 MJ/kg x 89 636 kg/år = 17 927 MJ/år

### ***Energianvändning transesterifiering***

#### **Förutsättningar**

Uppvärmning med naturgas: 2,1 MJ/kg lipider

Energianvändning vid användning av elektricitet: 1/3 av fossilbränsleanvändning

Övrig energianvändning: 0,1 MJ/kg lipider

Transesterifierbara lipider: 6 536 kg/år

#### **Beräkning**

Energianvändning för transesterifiering: ((2,1 MJ/kg / 3) x 6 536 kg/år) + (0,1 MJ/kg x 6 536 kg/år) = 5 229 MJ/år

### ***Energianvändning för produktion av metanol till transesterifiering***

#### **Förutsättningar**

Behov av metanol: 1/10 av transesterifierbara lipider

Transesterifierbara lipider: 6 536 kg/år

Energianvändning produktion av metanol: 7,4 MJ/kg

#### **Beräkning**

Energianvändning: (6 536 kg/år / 10) x 7,4 MJ/kg = 4 837 MJ/år

### ***Transport till Karpalund (sträcka fram och tillbaka)***

#### **Förutsättningar**

Torrvikt biomassa före lipidextraktion: 86 900 ton/år (antagen densitet: 1 ton/m<sup>3</sup>)

Lipidhalt: 10,25 %

TS-halt efter centrifugering: 17,5 %

Vikt glycerol: 1/10 av transesterifierbara lipider

Transesterifierbara lipider: 6 536 kg/år

Andel lipider som extraheras: 70,8 %

Vikt per hämtning: 32 ton

Sträcka: 5,1 mil

Bränsleförbrukning: 5 l HVO/mil

Energiinnehåll för HVO: 9 440 kWh/Nm<sup>3</sup>

## **Beräkningar**

Vikt rötningsbart substrat:  $((89\,600\text{ kg/år} \times (1-0,1025) \times (1-0,708)) / 0,175) + (6\,536\text{ kg/år} / 10) = 134\,833\text{ kg/år}$

Antal hämtningar:  $(134\,833\text{ kg/år} / 1000\text{ kg/ton}) / 32\text{ ton/gång} = 4,2\text{ ggr}$  (krävs 5 hämtningar)

Sträcka fram och tillbaka:  $(5,1\text{ mil} \times 2) \times 5\text{ ggr/år} = 51,0\text{ mil/år}$

HVO-användning:  $51,0\text{ mil/år} \times 5\text{ l/mil} = 255\text{ l/år}$

Energianvändning:  $(255\text{ l/år} / 1\,000\text{ l/m}^3) \times (9\,440\text{ kWh/m}^3 \times 3,6\text{ MJ/kWh}) = 8\,666\text{ MJ}$

## ***Energivärde för restbiomassa vid biogasrötning***

### **Förutsättningar**

Andel VS: 8,7 g/kg cellbiomassa vid TS-halt 12,7 g/L

TS-halt biomassa: 17,5 % eller 175 g/l (antagen densitet 1 kg/l)

Torrsvikt biomassa före lipidextraktion: 89 600 kg/år

Lipidhalt: 10,25 %

Andel lipider som extraheras: 70,8 %

Metanutbyte: 334 ml/g VS eller 334 l/kg VS

Energivärde metan: 9,97 kWh/m<sup>3</sup>

### **Beräkningar**

Vikt VS vid TS-halt 17,5 % =  $8,7\text{ g/kg} \times (175\text{ g/l} / 12,7\text{ g/l}) = 119,9\text{ g VS/kg}$

Vikt VS:  $(119,9\text{ g VS/kg} / 1\,000\text{ g/kg}) \times ((89\,600\text{ kg} \times ((1-0,1025) / 0,708)) / 0,175) = 77\,820\text{ kg VS/år}$

Metanutbyte:  $77\,820\text{ kg VS/år} \times (334\text{ l/kg VS} / 1\,000\text{ l/m}^3) = 25\,992\text{ m}^3/\text{år}$

Energiinnehåll restbiomassa:  $(9,97\text{ kWh/m}^3 \times 3,6\text{ MJ/kWh}) \times 25\,992\text{ m}^3/\text{år} = 932\,905\text{ MJ/år}$

## ***Energivärde för glycerol vid biogasrötning***

### **Förutsättningar**

Vikt glycerol: 1/10 av transesterifierbara lipider

Transesterifierbara lipider: 6 536 kg/år

Biogasproduktion av glycerol: 556,9 ml/g VS

VS-innehåll glycerol: 924 g VS/kg

Energivärde biogas: 23,65 MJ/Nm<sup>3</sup>

### **Beräkningar**

Biogasproduktion per kilo glycerol:  $(556,9\text{ ml/g VS} \times 924\text{ g VS/kg}) / 1\,000\text{ ml/l} = 514,6\text{ l/kg}$

Biogasproduktion per år:  $(514,6\text{ l/kg} \times (6\,536\text{ kg/år} / 10)) / 1\,000\text{ l/m}^3 = 336,3\text{ m}^3/\text{år}$

Energivärde biogas per år:  $336,3\text{ m}^3/\text{år} \times 23,65\text{ MJ/m}^3 = 7\,953\text{ MJ/år}$

## ***Energianvändning vid biogasrötning***

### **Förutsättning**

Elanvändning: 0,052 MJ/MJ biogas

Biogasproduktion restbiomassa: 932 905 MJ/år

Biogasproduktion glycerol: 7 953 MJ/år

### **Beräkning**

Elanvändning för biogasproduktion:  $(932\,905\text{ MJ/år} + 7\,953\text{ MJ/år}) \times 0,052\text{ MJ/MJ} = 48\,925\text{ MJ/år}$

## ***Energianvändning vid uppgradering till fordonsgas***

### **Förutsättning**

Elanvändning: 0,28 kWh/Nm<sup>3</sup> biogas

Energivärde biogas: 23,65 MJ/Nm<sup>3</sup>

Biogasproduktion restbiomassa: 932 905 MJ/år

Biogasproduktion glycerol: 7 953 MJ/år

### **Beräkningar**

Volym biogas:  $(932\,905\text{ MJ/år} + 7\,953\text{ MJ/år}) / 23,65\text{ MJ/Nm}^3 = 28\,264\text{ Nm}^3/\text{år}$

Elanvändning uppgradering av biogas:  $39\,783\text{ Nm}^3/\text{år} \times (0,28\text{ kWh/Nm}^3 \times 3,6\text{ MJ/kWh})$   
 $= 40\,101\text{ MJ/år}$

## ***Metanutsläpp vid biogasrötning***

### **Förutsättningar**

Biogasproduktion restbiomassa: 932 905 MJ/år

Biogasproduktion glycerol: 7 953 MJ/år

Metanutsläpp vid biogasrötning: 1,5 % av energivärdet

### **Beräkning**

Energivärde metanutsläpp:  $(932\,905\text{ MJ/år} + 7\,953\text{ MJ/år}) \times 0,015 = 14\,113\text{ MJ/år}$

## ***Metanutsläpp vid uppgradering till fordonsgas***

### **Förutsättningar**

Biogasproduktion restbiomassa: 932 905 MJ/år

Biogasproduktion glycerol: 7 953 MJ/år

Energivärde metanutsläpp vid biogasrötning: 14 113 MJ/år

Metanutsläpp vid uppgradering: 1,0 % av energivärdet

### **Beräkning**

Energivärde metanutsläpp:  $(932\,905\text{ MJ/år} + 7\,953\text{ MJ/år} - 14\,113\text{ MJ/år}) \times 0,01 = 9\,267\text{ MJ/år}$

## **Bilaga 7 – Klimatpåverkan vid biodieselproduktion**

### ***Koldioxidbildning av oljebildande jästsvamp***

#### **Förutsättningar**

Producerad CO<sub>2</sub> per 0,06 mol C<sub>57</sub>H<sub>104</sub>O<sub>6</sub> (triglycerider): 4,41 mol + 2,61 mol (steg 1 och 2)

Lika del triglycerider som biodiesel

Producerad biodiesel: 9 231 kg/år

#### **Beräkningar**

Vikt en mol CO<sub>2</sub>: 12,01 g + (2 x 16,00 g) = 44,01 g

Vikt en mol C<sub>57</sub>H<sub>104</sub>O<sub>6</sub> = (57 x 12,01 g) + (104 x 1,008 g) + (6 x 16,00 g) = 885,4 g

Producerad CO<sub>2</sub> per g C<sub>57</sub>H<sub>104</sub>O<sub>6</sub>: ((4,41 + 2,61) x 44,01 g) / (0,06 x 885,4 g) = 5,816 g

Producerad CO<sub>2</sub> per kg C<sub>57</sub>H<sub>104</sub>O<sub>6</sub>: 5,816 g x 1000 g/kg = 5 816 g/kg

Producerad CO<sub>2</sub> per år: 9 231 kg/år x (5 816 g/kg / 10<sup>3</sup> g/ton) = 53 688 kg/år

### ***Klimatutsläpp via elanvändning***

#### **Förutsättningar**

Malning: 1 822 MJ/år

Hydrolys: 8 262 MJ/år

Odling av *C. 107*: 206 552 MJ/år

Centrifugering: 35 075 MJ/år

Metanolproduktion till extraktion: 16 465 MJ/år

Extraktionsprocess: 17 927 MJ/år

Ultraljud: 32 768 MJ/år

Transesterifiering: 5 229 MJ/år

Metanolproduktion till transesterifiering: 4 837 MJ/år

Biogasrötning: 48 925 MJ/år

Uppgradering: 40 101 MJ/år

Koldioxidutsläpp vid elproduktion: 27,9 g CO<sub>2</sub>-ekv./MJ

#### **Beräkningar**

Elanvändning: 1 822 MJ/år + 8 262 MJ/år + 206 552 MJ/år + 35 075 MJ/år + 16 465 MJ/år + 17 927 MJ/år + 32 768 MJ/år + 5 229 MJ/år + 4 837 MJ/år + 48 925 MJ/år + 40 101 MJ/år = 417 963 MJ/år

Koldioxidutsläpp vid elproduktion: 417 963 MJ/år x (27,9 g CO<sub>2</sub>-ekv./MJ / 10<sup>3</sup> g/kg) = 11 661 kg CO<sub>2</sub>-ekv./år

### ***Klimatutsläppsminskning då biodiesel ersätter fossila bränslen***

#### **Förutsättningar**

Klimatutsläpp fossila bränslen: 2 879 kg CO<sub>2</sub>-ekv./m<sup>3</sup>

Energivärde fossila bränslen: 34 020 MJ/m<sup>3</sup>

Energivärde producerad biodiesel: 243 131 MJ/år

#### **Beräkningar**

Ersatt fossilt bränsle: 243 131 MJ/år / 34 020 MJ/m<sup>3</sup> = 7,14 m<sup>3</sup>/år

Minskade klimatutsläpp: 7,14 m<sup>3</sup>/år x (2 879 kg CO<sub>2</sub>-ekv./m<sup>3</sup>) = 20 556 ton CO<sub>2</sub>-ekv./år

### ***Klimatutsläpp vid transport av restprodukter***

#### **Förutsättningar**

Klimatutsläpp vid HVO-användning: 472 kg CO<sub>2</sub>-ekv./m<sup>3</sup>

HVO-användning: 255 l/år

### **Beräkning**

Klimatutsläpp per år:  $472 \text{ kg CO}_2\text{-ekv./m}^3 \times (255 \text{ l/år} / 1\,000 \text{ l/m}^3) = 120 \text{ kg CO}_2\text{-ekv./år}$

### ***Klimatutsläpp vid rötanläggning***

#### **Förutsättningar**

Energivärde av metanutsläpp vid biogasproduktion: 14 113 MJ/år

Energivärde metan: 13,9 kWh/kg

Koldioxidekvivalenter metan: 25 kg CO<sub>2</sub>-ekv./kg

#### **Beräkningar**

Vikt metanutsläpp vid biogasproduktion:  $14\,113 \text{ MJ/år} / (13,9 \text{ kWh/kg} \times 3,6 \text{ MJ/kWh}) = 282 \text{ kg/år}$

Utsläpp av CO<sub>2</sub>-ekv:  $282 \text{ kg/år} \times 25 \text{ kg CO}_2\text{-ekv./kg} = 7\,050 \text{ kg CO}_2\text{-ekv./år}$

### ***Klimatutsläpp vid uppgradering av biogasen***

#### **Förutsättningar**

Energivärde av metanutsläpp vid uppgradering: 9 267 MJ/år

Energivärde metan: 13,9 kWh/kg

Koldioxidekvivalenter metan: 25 kg CO<sub>2</sub>-ekv./kg

#### **Beräkningar**

Vikt metanutsläpp:  $9\,267 \text{ MJ/år} / (13,9 \text{ kWh/kg} \times 3,6 \text{ MJ/kWh}) = 185 \text{ kg/år}$

Utsläpp av CO<sub>2</sub>-ekv:  $185 \text{ kg/år} \times 25 \text{ kg CO}_2\text{-ekv./kg} = 4\,625 \text{ kg CO}_2\text{-ekv./år}$

### ***Klimatutsläppsminskning då biogas ersätter fossila bränslen***

#### **Förutsättningar**

Klimatutsläpp fossila bränslen: 2 879 kg CO<sub>2</sub>-ekv./m<sup>3</sup>

Energivärde fossila bränslen: 34 020 MJ/m<sup>3</sup>

Energivärde biogas: 9,97 kWh/Nm<sup>3</sup>

Biogasproduktion restbiomassa: 932 905 MJ/år

Biogasproduktion glycerol: 7 953 MJ/år

#### **Beräkningar**

Ersatt fossilt bränsle:  $(932\,905 \text{ MJ/år} + 7\,953 \text{ MJ/år}) / 34\,020 \text{ MJ/m}^3 = 27,66 \text{ m}^3\text{/år}$

Minskade klimatutsläpp:  $27,66 \text{ m}^3\text{/år} \times (2\,879 \text{ kg CO}_2\text{-ekv./m}^3) = 79\,633 \text{ kg CO}_2\text{-ekv./år}$