



---

Sveriges  
lantbruksuniversitet

# Samproduktion av etanol och kraftvärme

## Integreringsmöjligheter i energikombinat

---

Linus Hagberg

## SAMMANFATTNING

Med klimathotet har efterfrågan på biodrivmedel och bioenergi ökat kraftigt i Sverige vilket gör att frågan om effektivt utnyttjande av biomassan och effektiva produktionssystem blivit allt viktigare.

Denna studie undersöker möjligheterna för effektiv produktion av etanol, Sveriges idag vanligaste biodrivmedel, genom integrering med el- och värmeproduktion i så kallade energikombinat. Studien har gått igenom principerna för etanolproduktion från spannmål (stärkelse) och skogsråvara (lignocellulosa) och lyft fram de viktigaste delarna ur ett integreringsperspektiv.

Tekniken för omvandling av socker- och stärkserika råvaror (t.ex. sockerrör, majs och spannmål) är enklare och finns kommersiellt tillgänglig medan tekniken för etanol från cellulosa kräver en mer komplicerad process och är fortfarande under utveckling. Studien visar att det finns flera möjligheter till integrering av etanol- och kraftvärmeproduktion. Etanolprocessen har ett stort ångbehov som kan produceras effektivt i ett kraftvärmeverk. Det möjliggör elproduktion på ångan före leverans till etanolanläggningen. Vid en integrering kan också spillvärme från etanolprocessen utnyttjas till fjärrvärme. I ett energikombinat ökar också möjligheten att effektivt hantera och utnyttja biprodukterna som uppstår vid etanoltillverkningen. Ligninresten som avskiljs vid etanoltillverkning från lignocellulosa (t.ex. skogsråvara) är energirikt och kan förbrännas direkt i kraftvärmeverket eller torkas till pellets. Dranken (från både spannmål och skogsråvara) kan också användas som biobränsle eller med fördel rötas till biogas för att minska energibehovet för torkning och samtidigt producera ytterligare biodrivmedel (biogas).

Beräkningar som gjorts på effekterna av en integrering mellan en kraftvärmeanläggning och två olika etanolanläggningar (spannmål respektive skogsråvara) visar att totalverkningsgraden blir högre om etanolproduktionen sker i energikombinat än i separata anläggningar. För kraftvärmeanläggningen innebär integreringen att värmeunderlaget ökar vilket ger bättre utnyttjande av kraftvärmeverkets kapacitet under sommarhalvåret. Elproduktionen kan därmed potentiellt öka över året med oförändrad efterfrågan på fjärrvärme.

Studien visar att samproduktion av etanol och kraftvärme i energikombinat ger möjlighet till bättre resursutnyttjande och energieffektivitet vid etanolproduktion. Att integrera el- och värmeproduktion med produktion av etanol kan också vara ett sätt för kraftvärmeproducenterna att öka sitt värmeunderlag och ge möjlighet till större elproduktion, särskilt då efterfrågan på fjärrvärme i framtiden väntas minska till följd kommande av energieffektiviseringar och ett varmare klimat.

**Nyckelord:** etanol, biodrivmedel, biobränsle, kraftvärme, energikombinat, jäsning

Institutionen för bioenergi, Sveriges Lantbruksuniversitet (SLU), Box 7060, 750 07 Uppsala, Sverige. ISSN 1401-5765.

## **ABSTRACT**

This study investigates the possibilities for effective production of bioethanol by integration with production of heat and power in so-called bio poly-generation plants. The study covers the principles of ethanol production from starch and lignocellulosic biomass with emphasis on the most important parts from an integration perspective. Mass and energy flows are described with temperature, pressure and energy terms and the possibilities for integration with heat and power production are discussed with focus on effectiveness from an energy, resource and environmental perspective.

There are several ways integration can be done. The ethanol process has a great demand of steam that can be produced efficiently in a combined heat and power plant (CHP). The steam can then be used for electricity generation before delivery to the ethanol plant. Waste heat from the ethanol process can also be utilized for district heating. In a poly-generation plant the possibility to efficiently handle and utilize the bi-products from the ethanol production are greater, e.g. by combustion. Stillage could also be used for biogas production.

The study shows that co-production of ethanol, heat and power in poly-generation plants provide possibilities for better utility of resources and better energy effectiveness in ethanol production. Calculations show that the efficiency in the conversion of biomass to useful energy is greater if the ethanol production is performed in a poly-generation plant compared to separate ethanol plants. Integrating production of heat, power and ethanol could also be an attractive way for the heat and power producers to increase their heat basis which provides for more electricity production.

**Keywords:** *poly-generation plant, ethanol, biofuel, heat and power, fermentation*

## FÖRORD

Detta examensarbete omfattar 20 poäng och ingår i civilingenjörsprogrammet Miljö- och Vattenteknik vid Uppsala Universitet och Sveriges Lantbruksuniversitet (SLU). Studien har utförts på IVL Svenska Miljöinstitutet i Stockholm och delvis ingått i projektet ”Fjärrvärmens roll för effektiv produktion av biodrivmedel” på uppdrag av Svensk Fjärrvärme. Projektet har utformats tillsammans med Jenny Gode på IVL.

Jag vill tacka följande för att examensarbetet har blivit förverkligat:

IVL för att jag fick chansen att göra detta intressanta projekt och för finansiellt stöd. Tack hela Klimatavdelningen för ett varmt välkomnande och för att ni har bidragit till några mycket lärorika första månader på IVL. Särskilt mina ämnesgranskare Jenny Gode och Erik Särholm för allt stöd genom projektets gång – från projekttid till rapportgranskning.

Alla som har hjälpt mig med dataunderlag, bidragit med kunskap och för trevligt mottagande vid besök på anläggningarna. Särskilt medarbetarna på Jämtkraft i Östersund som har bistått med material för systemanalysen.

Ämnesgranskare Matti Parikka vid Institutionen för bioenergi, SLU och examinator Allan Rodhe vid Institutionen för geovetenskaper, Luft- och vattenlära, Uppsala universitet.

Linus Hagberg

Stockholm, november 2007.

Copyright © Linus Hagberg och Institutionen för bioenergi, Sveriges Lantbruksuniversitet (SLU), Uppsala.

UPTEC W 07 021, ISSN 1401-5765

Tryckt hos Institutionen för geovetenskaper, Geotryckeriet, Uppsala, 2007.

## POPULÄRVETENSKAPLIG SAMMANFATTNING

Samproduktion av etanol och kraftvärme – integreringsmöjligheter i energikombinat

*Linus Hagberg*

För att bromsa klimatförändringarna har EU och Sverige högt ställda mål när det gäller minskning av utsläppen av växthusgaser framöver. De flesta sektorer minskar sina utsläpp, medan utsläppen av koldioxid inom transportsektorn fortsätter att öka. Därför kommer EU sannolikt införa bindande krav om att 10 % av fordonsbränslena ska utgöras av biodrivmedel senast år 2020. Samtidigt ska användningen av bioenergi öka inom exempelvis energisektorn. Detta gör att konkurrensen om biomassan har ökat, och kommer att öka ytterligare framöver. Det är därför viktigt att hitta effektiva och resurssnåla sätt för produktion av biodrivmedel, el och värme. Ett sätt kan vara att bilda bioenergi-kombinat, där biodrivmedel produceras tillsammans med värme och el och eventuellt andra energislag. Energit kombinat har fått ökat intresse över världen, framförallt i Sverige där fjärrvärmenäten är väl utbyggda och olika styrmedel gör det lönsamt med elproduktion från biomassa. Denna studie har undersökt hur Sveriges idag vanligaste biodrivmedel – etanol – framställs och vilka möjligheter det finns att integrera produktionen med ett kraftvärmeverk (med el- och värme produktion).

Etanol kan produceras från all biomassa som är uppbyggt av socker (t ex sockerrör, sockerbetor), stärkelse (t ex spannmål, majs) eller cellulosa (t ex ved, halm, blast). Idag sker storskalig produktion från främst sockerrör (Brasilien), majs (USA) och spannmål (Europa och USA). Tekniken för framställning av etanol från cellulosa är mer komplicerad och är fortfarande under utveckling, bland annat i Sverige, och väntas finnas för fullskalig produktion först om några år.

Etanolprocessen består av ett antal huvuddelar: förbehandling, jäsning, destillation och hantering av biprodukter. Förbehandlingen syftar till att bryta ner stärkelse eller cellulosa till jäsbart socker, vilket görs med värmebehandling och enzymer. För cellulosa krävs kraftigare förbehandling med högre temperaturer och tillsatts av syra och ibland också ett extra steg med enzymer. Sockerlösningen får sedan jäsa till etanol och koldioxid med hjälp av jästsvampar och den bildade etanolen separeras och renas genom destillation i flera steg. Som biprodukt efter destilleringen fås så kallad drank (icke jäst material). Drink från spannmål torkas vanligtvis till djurfoder, medan drank från skogsråvara kan torkas och används som bibränsle. Om skogsråvara används fås också en stor mängd lignin (som inte kan jäsas till etanol) men som är energirikt och ett utmärkt bibränsle.

För att driva etanolprocessens olika delar krävs en stor mängd värme i form av ånga, för etanol från spannmål räcker det med låg- och mellantrycksånga medan förbehandlingen av skogsråvara kräver ånga mellan 20-30 bar. En stor del av ångbehovet går åt vid torkning av biprodukterna varför ett intressant alternativ är att istället röta dranken till biogas, vilket ger ytterligare produktion av biodrivmedel och samtidigt sparar energi.

Det finns flera fördelar att integrera etanolanläggningen med ett kraftvärmeverk i form av ett energikombinat. Ångan kan då produceras effektivt i kraftvärmeverket och avtappas från el-turbinerna (där den först har genererat el) vid det tryck som behövs i etanolprocessen. Spillvärme från etanolprocessen (kondenserad ånga) kan sedan återföras till kraftvärmeverket och användas till fjärrvärme. Biprodukterna från etanolprocessen (drank och lignin) kan också förbrännas direkt i kraftvärmeverket för täcka etanolprocessens energibehov. Om dranken används för biogasproduktion bildas en rötrest som antingen kan säljas som gödningsmedel eller avvattnas och förbrännas i kraftvärmeverket. För etanol från skogsråvara kan energikombinatet med fördel utvidgas till att också innefatta en pelletsanläggning. Ligninresten kan då torkas och pelleteras ensamt eller tillsammans med annan skogsråvara och säljas som pellets. Torkanläggningen kan utformas så att lågtemperaturånga eller spillvärme används som torkmedium för att få ett bra utnyttjande av alla energiströmmar. Etanolproduktion i ett energikombinat kan således ge ett bättre utnyttjande av biomassa och energiströmmar och genom att el, värme, etanol och biogas/biobränsle produceras samtidigt kan totalverkningsgraden (d v s hur stor del av råvarans energi som omvandlas till användbar energi i form av t ex el, fjärrvärme och etanol) höjas jämfört med separat produktion.

Etanolanläggningens värmebehov året runt betyder att kraftvärmeverket kan utnyttjas bättre och dess driftstid kan förlängas under sommarhalvåret då det annars går på halvlast eller är avstängd. Det innebär att elproduktionen i kraftvärmeverket kan ökas totalt över året.

# INNEHÅLLSFÖRTECKNING

<b>SAMMANFATTNING</b> .....	<b>I</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>II</b>
<b>FÖRORD</b> .....	<b>III</b>
<b>POPULÄRVETENSKAPLIG SAMMANFATTNING</b> .....	<b>IV</b>
<b>1 INLEDNING</b> .....	<b>1</b>
1.1 SYFTE OCH MÅL .....	1
1.2 DEFINITIONER OCH AVGRÄNSNINGAR .....	2
1.3 TILLVÄGAGÅNGSSÄTT.....	2
<b>2 BAKGRUND</b> .....	<b>5</b>
2.1 ETANOLPRODUKTION - ÖVERSIKT .....	5
2.1.1 <i>Användning och produktion idag</i> .....	5
2.1.2 <i>Produktionskostnad, skatter och importtull</i> .....	6
2.1.3 <i>Tillverkningsprocessen i korthet</i> .....	6
2.1.4 <i>Råvaror</i> .....	7
2.1.5 <i>Energibalanser för bioetanol i litteraturen</i> .....	9
2.2 PRINCIPEN FÖR FJÄRRVÄRME- OCH KRAFTVÄRMEPRODUKTION.....	11
<b>3 ETANOL FRÅN STÄRKELSE</b> .....	<b>13</b>
3.1 PROCESSBESKRIVNING .....	13
3.1.1 <i>Råvaruberedning och mixning</i> .....	13
3.1.2 <i>Förvätskning och försockring</i> .....	14
3.1.3 <i>Fermentering</i> .....	14
3.1.4 <i>Destillering</i> .....	14
3.1.5 <i>Dehydrering</i> .....	15
3.1.6 <i>Hantering av dranken</i> .....	15
3.2 ENERGIBEHOV/ENERGIFLÖDEN .....	16
3.2.1 <i>Ånga</i> .....	16
3.2.2 <i>El</i> .....	16
3.2.3 <i>Spillvärme</i> .....	17
3.3 BIPRODUKTER.....	17
3.4 INTEGRERINGSMÖJLIGHETER .....	18
<b>4 ETANOL FRÅN LIGNOCELLULOSA</b> .....	<b>21</b>
4.1 PROCESSBESKRIVNING .....	21
4.1.1 <i>Råvaruberedning</i> .....	22
4.1.2 <i>Förbehandling</i> .....	22
4.1.3 <i>Enzymatisk hydrolys</i> .....	23
4.1.4 <i>Fermentering</i> .....	23
4.1.5 <i>Destillering och dehydrering</i> .....	24
4.1.6 <i>Hantering av biprodukter</i> .....	24
4.2 ENERGIBEHOV/ENERGIFLÖDEN .....	24
4.2.1 <i>El och ånga</i> .....	24
4.2.2 <i>Spillvärme</i> .....	25
4.3 BIPRODUKTER.....	26

4.4	INTEGRERINGSMÖJLIGHETER .....	26
<b>5</b>	<b>TRANSPORT, TILLGÄNGLIGHET OCH ANLÄGGNINGSTORLEK .....</b>	<b>29</b>
<b>6</b>	<b>EXEMPEL PÅ ENERGIKOMBINAT .....</b>	<b>30</b>
6.1	ETANOL FRÅN SPANNMÅL .....	30
6.1.1	<i>Agroetanol i Norrköping .....</i>	<i>30</i>
6.1.2	<i>Karlskoga .....</i>	<i>30</i>
6.2	ETANOL FRÅN LIGNOCELLULOSA.....	31
6.2.1	<i>Etanolpilotanläggningen i Örnköldsvik .....</i>	<i>31</i>
6.2.2	<i>Energikombinatet i Sveg.....</i>	<i>32</i>
<b>7</b>	<b>SYSTEMANALYS .....</b>	<b>33</b>
7.1	METOD .....	33
7.1.1	<i>Beskrivning av Jämtkrafts kraftvärmeverk .....</i>	<i>33</i>
7.1.2	<i>Kraftvärmelanläggningen i systemanalysen .....</i>	<i>34</i>
7.1.3	<i>Integrering med etanolanläggning .....</i>	<i>36</i>
7.2	RESULTAT FRÅN SYSTEMANALYSEN.....	37
7.2.1	<i>Integrering med spannmålsanläggning .....</i>	<i>37</i>
7.2.2	<i>Integrering med svagsyraanläggning .....</i>	<i>39</i>
7.2.3	<i>Jämförelse av verkningsgrader för separata och integrerade anläggningar .....</i>	<i>42</i>
7.2.4	<i>Elproduktion vid olika anläggningsstorlekar .....</i>	<i>43</i>
7.2.5	<i>Jämförelse av anläggningar som producerar 40 000 ton etanol/år .....</i>	<i>44</i>
<b>8</b>	<b>SAMMANFATTANDE RESULTAT .....</b>	<b>46</b>
8.1	INTEGRERINGSMÖJLIGHETER .....	46
8.2	SYSTEMANALYS.....	47
<b>9</b>	<b>DISKUSSION.....</b>	<b>48</b>
9.1	DISKUSSION OM METOD OCH DATAUNDERLAG .....	48
9.2	PROCESSUTFORMNING KONTRA ENERGIEFFEKTIVITET.....	48
9.3	HELA PRODUKTIONSKEDJAN ÄR VIKTIG.....	49
9.4	ENERGIKOMBINAT OCH KLIMAT .....	49
<b>10</b>	<b>SLUTSATSER.....</b>	<b>50</b>
<b>11</b>	<b>REFERENSER.....</b>	<b>51</b>
<b>12</b>	<b>BILAGOR.....</b>	<b>55</b>
12.1	ENERGIANVÄNDNINGEN I SVERIGE.....	55
12.1.1	<i>Transportsektorns användning av biodrivmedel.....</i>	<i>56</i>
12.2	EL- OCH VÄRMEPRODUKTION .....	56
12.2.1	<i>Fjärrvärme i Sverige .....</i>	<i>56</i>
12.2.2	<i>El i Sverige .....</i>	<i>58</i>
12.3	TILLGÅNG OCH POTENTIAL AV BIOBRÄNSLE .....	58
12.3.1	<i>Biobränsle från skogen.....</i>	<i>59</i>
12.3.2	<i>Biobränsle från jordbruket.....</i>	<i>60</i>
12.3.3	<i>Tillgång på biobränsle för etanolproduktion .....</i>	<i>60</i>
12.4	DATA FÖR SYSTEMANALYSEN .....	61



# 1 INLEDNING

Med växande oro för klimathotet, höga oljepriser och en stigande ambition inom EU att vara självförsörjande på energi har intresset för förnybar energi ökat kraftigt de senaste åren. Ett antal politiska styrmedel har etablerats på nationell och europeisk nivå som syftar till att öka användningen av bioenergi, bland annat systemet för handel med utsläppsrätter, elcertifikatsystemet och koldioxidskatter. Sverige har utöver åtagandena enligt Kyoto-protokollet satt upp ett nationellt mål att utsläppen av växthusgaser ska minska med 4 % fram till 2012 jämfört med 1990 års utsläpp (Energimyndigheten, 2007). Fortfarande ökar dock koldioxidutsläppen från transportsektorn vilket tillsammans med andra drivkrafter drivit fram ett EU-direktiv om förnybara drivmedel<sup>1</sup> där de nationella målen är att 5,75 % av fordonsbränsleanvändningen ska utgöras av biodrivmedel år 2010. I januari i år lade EU-kommissionen fram förslag om mål att reducera unionens utsläpp med minst 20 % till år 2020 samt att öka användningen av biodrivmedel till minst 10 % år 2020, som senare beslutades skall vara bindande (Regeringskansliet, 2007). Efterfrågan på biomassa till biodrivmedelsproduktion ökar samtidigt som konkurrensen om biomassan har ökat från andra sektorer, bland annat från energisektorn. Verkningsgraden är betydligt lägre då biomassan omvandlas till drivmedel än vid omvandling till el och värme. Genom att samproducera biodrivmedel, el och värme i s.k. bioenergikombinat kan dock högre verkningsgrader uppnås. För energiproducenterna kan produktion av biodrivmedel innebära nya affärsmöjligheter och samtidigt möjliggöra för effektivt utnyttjande av energiresurserna.

## 1.1 SYFTE OCH MÅL

Syftet med projektet är att undersöka möjligheterna för integrering av etanolproduktion och el- och fjärrvärmeproduktion.

Mål för projektet är att:

- presentera teknikbeskrivningar för etanoltillverkning genom processscheman med totala energi- och materialflöden.
- analysera vilka energiprocesser för produktion av etanol respektive kraftvärme som kan kombineras och därigenom ge förslag på hur etanolproduktion på ett effektivt sätt kan kombineras med värme- och kraftvärmeproduktion
- göra en systemanalys över hur produktionen i ett fjärrvärmesystem med kraftvärmeproduktion påverkas vid integrering med etanolproduktion

---

<sup>1</sup> Europaparlamentets och rådets direktiv 2003/30/EG av den 8 maj 2003 om främjande av användningen av biodrivmedel eller andra förnybara drivmedel

## 1.2 DEFINITIONER OCH AVGRÄNSNINGAR

I denna studie beskrivs etanolproduktion från stärkelse och lignocellulosa. Etanolproduktion från sockerråvaror behandlas endast mycket översiktligt. Tekniken för jäsnings av stärkelse är mogen och finns kommersiellt tillgänglig medan jäsnings av lignocellulosa fortfarande är under utveckling. Uppdaterad och verifierad data över energi- och materialflöden är därför svår att uppnå. Processbeskrivningarna och data över energi- och materialflöden baseras i vissa fall på etablerade anläggningar och i andra fall från simuleringar och beräkningar från forskningen eller för planerade anläggningar. Jämförelser mellan olika data ska därför göras med stor försiktighet.

Fokus i denna studie är att undersöka möjligheterna för integrering mellan etanolproduktion och kraftvärmeproduktion i så kallade energikombinat. Med energikombinat menas här bibränslebaserade anläggningar som samtidigt producerar flera olika energibärare; etanol, fjärrvärme och eventuellt el. Ett energikombinat kan dessutom innebära produktion av ytterligare någon typ av energibärare såsom biogas eller pellets. Med kraftvärme menas i denna rapport produktion av både el och fjärrvärme eller enbart fjärrvärmeproduktion. Då etanolanläggningar kräver storskalighet för god lönsamhet, blir integrering dock mest aktuellt mot större fjärrvärmesystem där det idag oftast finns kraftvärmeverk.

Energiinsats och miljöbelastning förknippad med framställning och transport av råvara liksom för användning och distribution av produkter och biprodukter är också viktigt vid värdering av omvandlingsteknik och biodrivmedel. Detta ligger dock utanför ramen för detta projekt och berörs endast översiktligt.

Systemanalysen över hur ett kraftvärmesystem påverkas vid integrering med etanolproduktion görs för två olika typer av etanolanläggningar som beskrivs i rapporten:

1. En anläggning som producerar etanol och biogas från spannmål
2. En anläggning som producerar etanol från skogsråvara genom svagsyrametoden.

Ingen av dessa processutformningar är ännu testade i kommersiell skala utan data är hämtade från beräkningar inför planerade anläggningar. Som fallstudie används data över Jämtkrafts kraftvärmearläggning i Östersund och typiska produktionsdata. Systemanalysen gäller endast för de antaganden som gjorts och systemanalysens resultat skulle bli annorlunda för andra lokala förutsättningar och för andra antaganden om etanolprocessens energibehov, materialutbyten och processutformning etc.

## 1.3 TILLVÄGAGÅNGSSÄTT

Studien har i huvudsak gjorts utifrån tillgänglig litteratur, genom personlig kontakt med representanter för befintliga eller planerade etanolanläggningar i Sverige och andra sakkunniga liksom egna bedömningar. Teknikbeskrivningarna har gjorts med utgångspunkt i utvecklingsprojekt eller planerade och befintliga anläggningar och de delar i processerna

som bedömts intressanta för integrering med kraftvärmeproduktion har lyfts fram. Integreringsmöjligheterna med kraftvärmeproduktion har sedan analyserats med fokus på effektivitet ur energi-, resurs- och miljösynpunkt.

Det finns ett antal delar av produktionskedjan där integreringsmöjligheter kan förekomma mellan etanolproduktion och el- och värmeproduktion. Dessa kan indelas i följande områden:

- Massflöden: råvara, biprodukter
- Energiflöden: processenergi, spillvärme
- Övriga samlokaliseringseffekter

#### *Råvara*

På råvarusidan kan finnas samlokaliseringseffekter. Samma eller liknande råvara kan i många fall användas för produktion av både kraftvärme och biodrivmedel och därmed kan logistik och produktion samköras. Vid sortering kan exempelvis renare material användas för biodrivmedelsproduktion och resten kan användas i kraftvärmeverket. Biprodukter från etanolprocessen kan också användas som råvara i kraftvärmeverket. Det kan skapa en önskad flexibilitet och råvarutrygghet för båda produktionsspåren. Möjliga råvaror och samlokaliseringseffekter beskrivs.

#### *Biprodukter*

Vid omvandling av biomassan till etanol uppkommer biprodukter (t.ex. drank och lignin) som det är viktigt att hitta avsättning för. Dessa kan vidareförädlas för extern försäljning eller användas för energiproduktion inom energikombinatet. Eventuella biprodukter identifieras och beskrivs och alternativ hantering och avsättning av dessa diskuteras utifrån ett energikombinatsperspektiv.

#### *Processenergi*

Vid etanolprocessen krävs energitillförsel av olika slag (värme, el). De energikrävande delarna av processen identifieras med temperaturer, tryck och ungefärligt energibehov där så är möjligt. Utifrån detta diskuteras hur energibehovet på ett effektivt sätt kan tillgodoses utifrån ett energikombinatsperspektiv.

#### *Spillvärme*

Eventuella restströmmar från etanolprocessen som innehåller värme identifieras och beskrivs med temperatur, tryck och energimängd där det är möjligt. Det kan röra sig om spillvärme i form av kylvatten eller mer högvärdig värme som överskott av ånga, kondensat från utnyttjad ångenergi eller rökvärme. Hur dessa energiströmmar kan tillvaratas i ett energikombinat diskuteras.

#### *Övriga samlokaliseringseffekter*

Det kan finnas andra fördelar/begränsningar med samlokaliserad produktion av etanol och kraftvärme. Betydelsen av transporter av råvara och produkter, anläggningsstorlek kontra värmeunderlag och energikombinatsalternativets flexibilitet och koppling till värmeverkens effektvariationer berörs också i studien.

En systemanalys över hur ett kraftvärmesystem påverkas vid integrering med etanolproduktion har gjorts utifrån data över energi- och materialflöden för två olika etanolprocesser som presenterats i teknikbeskrivningarna och utifrån data över Jämtkrafts kraftvärmeverk i Östersund med tillhörande fjärrvärmenät. Utförlig metodbeskrivning för systemanalysen återfinns i avsnitt 7.1.

## 2 BAKGRUND

### 2.1 ETANOLPRODUKTION - ÖVERSIKT

#### 2.1.1 Användning och produktion idag

Etanol har fördelen att kunna blandas i bensin och därmed distribueras och användas på samma sätt som bensin. Sedan 2006 sker låginblandning av etanol på 5 % i all 95-oktanig bensin i Sverige och användningen av bränsleflexibla bilar som kör på E85 (85 % etanol) ökar stadigt. Dessutom finns på olika håll i Sverige bussar som kör på E92. Energiinnehållet (effektiva värmevärdet, LHV) är 5,9 MWh/m<sup>3</sup> eller 7,5 MWh/ton (Nykomb Synergetics, 2007). Eftersom energiinnehållet i bensin är högre motsvarar en liter etanol ca 0,87 liter bensin för samma transportarbete (Bioenergiportalen, 2007). Vid låginblandning på 5 % är etanol och bensin likvärdigt eftersom etanolen har vissa tändförbättrande egenskaper.

Världsproduktionen av etanol ökade från drygt 30 till nästan 46 miljarder liter mellan 2001 och 2005. Brasilien och USA är de i särklass största producentländerna följt av Kina och Indien. I Brasilien sker produktionen nästan uteslutande från sockerrör och i USA produceras huvuddelen av etanolen av majs. Brasilien och USA svarar tillsammans för drygt 70 % av världens etanolproduktion (SJV, 2006). Etanolproduktion från skogsråvara är än så länge mycket liten och tekniken väntas inte finnas i stor skala förrän framåt år 2015 (Lindstedt, 2007).

Mellan år 2004 och 2006 ökade den svenska etanolanvändningen för drivmedelsändamål från ca 280 milj liter till ca 320 milj liter (SJV, 2006; SCB, 2007). Av detta importeras merparten från Brasilien. Den inhemska produktionen är idag ca 73 milj liter etanol per år. Det finns en storskalig anläggning i Norrköping som drivs av Agroetanol AB sedan 2001 som producerar ca 55 milj liter per år från spannmål. Näst största producenten är Domsjö Fabriker AB i Örnsköldsvik som producerar ca 18 milj liter per år från svartlut. I övrigt driver SEKAB en liten utvecklingsanläggning för etanolproduktion från skogsråvara i Örnsköldsvik som har en kapacitet på 0,2 milj liter per år (SJV, 2006). Den svenska etanolproduktionen väntas öka kraftigt de närmaste åren. Agroetanol bygger nu ut sin anläggning med ytterligare ca 150 milj liter och det finns planer på ett antal nya etanolanläggningar runt om i Sverige, bland annat i Sveg (skogsråvara), Karlskoga (spannmål), Härnösand (spannmål), Sala (spannmål) och Örnsköldsvik (skogsråvara) (Gode m fl, 2007).

### 2.1.2 Produktionskostnad, skatter och importtull

I Sverige är bränsleetanol befriat från punktskatter till 100 %, dvs. energiskatten på 2,86 kr/liter och koldioxidskatten på 2,13 kr/liter som gäller för bensin är borttagna, vilket tillsammans med motsvarande momseffekt ger en total skattelättnad på 6,24 kr/liter (SJV, 2006). Produktionskostnaderna för svensk etanol ligger på ungefär 4,50 – 5,50 kr/liter medan brasiliansk etanol kan kosta under 3 kronor (inkl. fraktkostnader) vid import till EU. Idag finns ett gränsskydd för etanol som importeras till EU på ca 1,80 kr/liter, som i stor utsträckning utjämnar prisskillnaden mellan import och inhemsk produktion (Jönsson, 2007). Mycket tyder dock på att tullen kommer att avskaffas de närmaste åren, vilket gör det svårare för inhemska producenter att konkurrera med billig etanol från Brasilien.

### 2.1.3 Tillverkningsprocessen i korthet

Jäsning är den dominerande tekniken för att framställa etanol ur biomassa. Etanol kan även framställas syntetiskt genom förgasningsteknik, men det behandlas inte här. Etanol kan produceras av allt biologiskt material som är uppbyggt av socker, stärkelse och cellulosa. Grundprincipen är att först bryta ner biomassan till fria sockermolekyler som sedan jäses av mikroorganismer till etanol. Etanolen avskiljs och uppkoncentreras sedan genom destillation. Tekniken för att framställa etanol från sockerråvara och från stärkelsrika råvaror är väl etablerad medan teknologin för lignocellulosa är under utveckling. Tillverkningsprocessen kan uppdelas i huvudstegen:

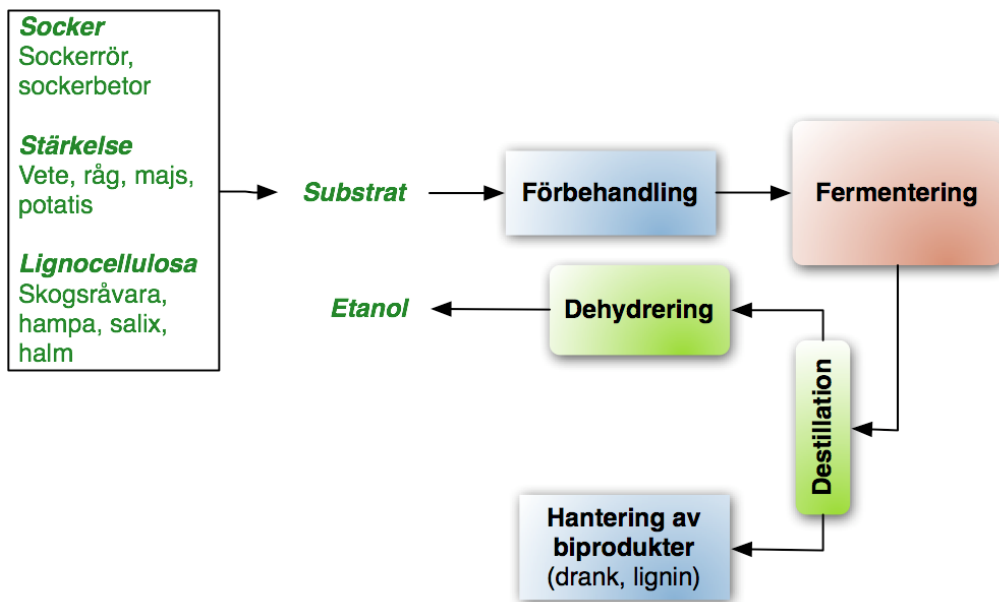
- förbehandling
- fermentering<sup>2</sup>
- destillation och dehydrering<sup>3</sup>
- hantering av biprodukter.

Processen skiljer sig för olika råvaror framförallt avseende förbehandlingssteget och i vilka biprodukter som uppstår. I Figur 1 visas en schematisk bild över möjliga råvaror, produkter och biprodukter vid framställning av etanol från biomassa.

---

<sup>2</sup> Jäsning

<sup>3</sup> Avdrivning av vatten från etanolen så att ren etanol erhålls



Figur 1 Schematisk bild över etanolproduktion genom jäsning.

#### 2.1.4 Råvaror

Etanol kan produceras av allt biologiskt material som är uppbyggt av socker, stärkelse och cellulosa. Beroende på råvara skiljer sig omvandlingstekniken åt liksom etanolutbytet. Ungefärligt etanolutbyte för några råvaror visas i Tabell 1.

Tabell 1 Etanolutbyte för några olika råvaror (SJV, 2006).

Råvara	Mängd <sup>1</sup> (kg) råvara för att producera 1 liter etanol	Antal <sup>1</sup> liter producerad etanol från 1 ton råvara
Sockerrör	12,7	78,7
Sockerbetor	10,3	97,1
Potatis	8,5	117,6
Trä	3,85	259,7
Majs	2,68	373,1
Vete	2,6	384,6

<sup>1</sup> Genomsnittsvärden; mängden producerad etanol beror på produktionsteknik och kvaliteten på råvaran.  
Källa: F.O. Lichts World Ethanol Markets The Outlook to 2012.

#### Sockerråvara

De råvaror som innehåller tillräckligt hög sockerhalt (17–18 %) för att det ska vara lönsamt att framställa etanol är sockerbetor och sockerrör. För Sveriges del kan sockerbetor till viss mån komma att bli intressant för etanolframställning, men odlingen begränsar sig till de allra sydligaste delarna av Sverige. Sveriges betodlares centralförening (SBC) menar att det

på sikt finns en potential på ca 1 TWh etanol i Sverige. Fördelen med sockerråvaror är att processen för att få fram jäsbart socker är enkel och kostnadseffektiv. Sackarosen i råvaran extraheras i varmvatten och hydrolyseras sedan till lika delar jäsbart glukos och fruktos enligt reaktionen



Som biprodukt fås betmassa som kan torkas till djurfoder. Nackdelar med etanolframställning från sockerbetor är att etanolutbytet är lågt, eftersom man behöver ca 10 kg betor för att få 1,0 liter etanol (jämfört med knappt 3 kg för spannmål). En annan nackdel är att betorna inte är lagringsbara, och att man därför inte har tillgång på betor året runt. (Nilsson, 2006).

Fortsättningsvis behandlas etanolframställning endast från stärkelse- och cellulosahaltiga råvaror, men likheterna är många då sockerbetor används.

### Stärkelsråvara

Exempel på stärkelsrika råvaror är spannmål, majs och potatis. Spannmål består till 60–70 % av stärkelse. Stärkelse är en polysackarid uppbyggd av en blandning av grenade och ogrenade kedjor av upp till flera tusen enheter glukos. För att få jäsbart socker, glukos, måste stärkelsen hydrolyseras enligt



Detta görs med varmvattenbehandling och enzymer. Som biprodukt fås en proteinrik drank<sup>4</sup> som oftast används som djurfoder.

### Cellulosaråvara

Exempel på biomassa som består av lignocellulosa, dvs. både cellulosa och lignin, är skogsprodukter, energigrödor (salix, hampa) och restprodukter från jordbruket (halm). Barrved som är en framtida intressant råvara i Sverige består till ca 40 % av cellulosa, 25 % av hemicellulosa och 28 % lignin (Goldschmidt, 2005). Hemicellulosa byggs upp av både pentoser och hexoser. Exempel på pentoser är xylos och arabinos och hexoser är bl.a. glukos, mannos, galaktos (Vallander m fl, 2006). Hexoserna kan jäsas med konventionell jäst, medan pentoserna kräver annan typ av jäst som håller på att utvecklas (Fransson m fl, 2006). För lövved och halm som innehåller mycket hemicellulosa är det avgörande med pentosjäsende jäst för att få ett bra etanolutbyte (Vallander m fl, 2006). Cellulosafibrer är uppbyggda av glukosmolekyler men dess kristallina natur gör dem mycket hållfasta och olösliga i vatten. Detta gör att det är svårare att hydrolysera cellulosa till jäsbara sockermolekyler. Därför krävs kraftig förbehandling vid hög temperatur med syra och/eller enzym som katalysator. För barrved är det teoretiska etanolutbytet omkring 510 liter etanol per ton torrsbstans om både pentoser och hexoser kan jäsas (Söderström, 2004). Lignin

---

<sup>4</sup> Restprodukt med icke jäst organiskt material som separeras av vid destilleringen.



kan inte jäsas till etanol eftersom det inte är uppbyggt av sockerarter. Det blir en energirik biprodukt som måste avskiljas vid etanolprocessen. Förutom lignin fås också drank som biprodukt.

### 2.1.5 Energibalanser för bioetanol i litteraturen

Många olika energibalansberäkningar har gjorts både i Sverige och internationellt. En sammanställning från Börjesson (2006) över energibalanser från svenska och internationella studier för etanol från olika råvaror visas i Tabell 2. Med energibalans menas här energi i drivmedel dividerat med all den energi som använts i produktionskedjan, från odling till förädling till bioetanol. Energiinsatsen baseras på primärenergiåtgång där såväl direkta som indirekta energiinsatser inkluderas (exempelvis energiåtgång vid gödselproduktion). Om energibalansen är över 1 betyder det att energiutbytet i form av etanol är större än den hjälpenergi som gått åt för att producera etanolen. Energibalansen varierar kraftigt beroende vad som inkluderas i produktionssystemet samt hur energiåtgången fördelas mellan bioetanol och de biprodukter som uppstår (Börjesson, 2006).

Etanol från lignocellulosa beräknas generellt ha högre energibalans än etanol från spannmål. Detta beror dels på att energiinsatsen vid odling av energiskog eller vid uttag av hyggesrester är betydligt lägre än för spannmålsodling, dels på att totala energiverkningsgraden i etanolprocessen ofta beräknas högre för lignocellulosabaserad etanol (Börjesson, 2006). Däremot är etanolutbytet lägre från lignocellulosa än från spannmål. Omkring 50-60 % av energiinnehållet i spannmål omvandlas till etanol jämfört med motsvarande högst 30-40 % för lignocellulosa (Börjesson, 2006; Stenmark, 2007; Goldschmidt, 2005).

Tabell 2 Energibalansberäkningar för etanol från svenska och internationella studier. Sammanställt från Börjesson (2006).

	Spannmål	Sockerbetor	Majs	Lignocellulosa
Genomsnittlig energibalans	1,6	1,8	1,4	3,2
Spridning i svenska studier	0,7 – 2,8	-	-	1,8 – 5,7
Spridning i internationella studier	1 – 2,3	1,2 – 2,5	0,7 – 2,5	1,8 – 5,6

Börjesson (2004) har beräknat och jämfört energibalansen för etanol från vete för tre olika fall, där: 1) drank torkas till foder, 2) drank rötas till biogas och 3) drank och även halm rötas till biogas. Tabell 3 visar att energibalansen (drivmedelsutbyte/energiinsats) blir betydligt högre om dranken används för biogasproduktion och ännu högre om även halmen utnyttjas för biogasproduktion.

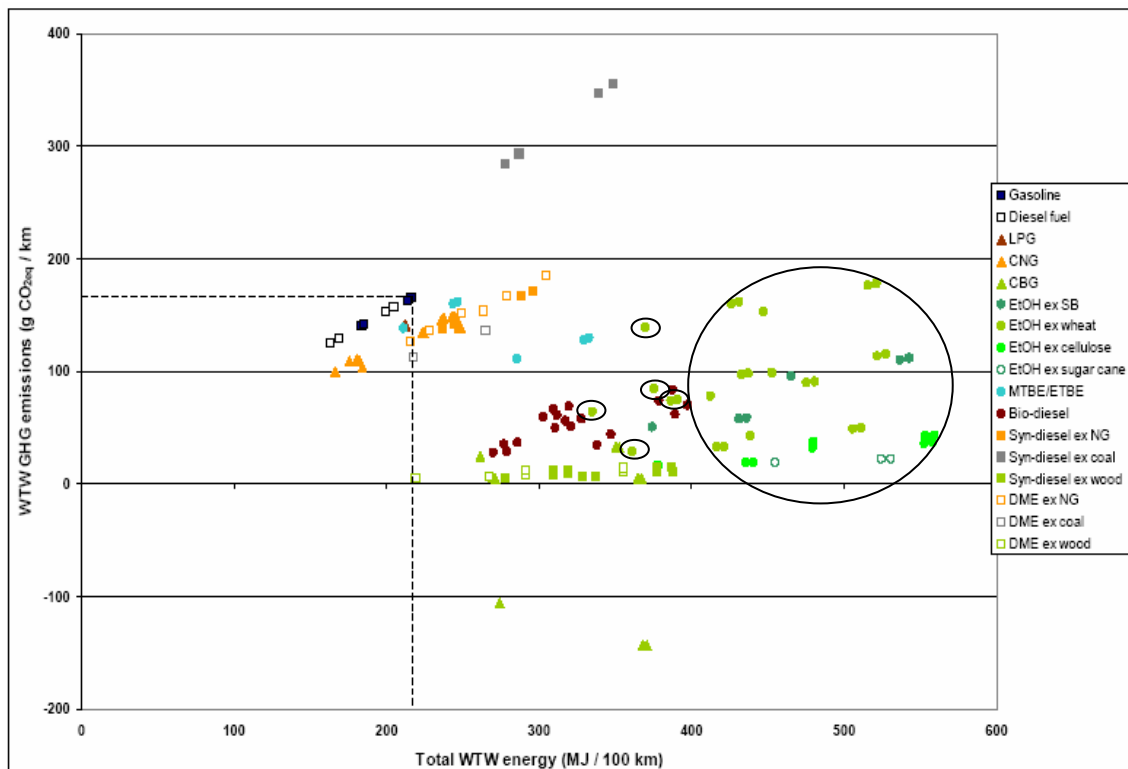
Tabell 3 Energibalans för vetebaserad etanol för tre alternativa bränslekedjor (Börjesson, 2004).

Bränslekedja	Energibalans (drivm.utbyte/energiinsats)	Energiinsats (% av energiinnehåll i drivmedel)
1. Vete → etanol	1,31	76
Drank → foder <sup>a</sup>		
Halm → plöjs		
2. Vete → etanol	1,97	51
Drank → biogas		
Halm → plöjs		
3. Vete → etanol	2,05	49
Drank → biogas		
Halm → biogas		

<sup>a</sup> Energiinsatsen för odling av vete reduceras med 30 % då denna energiinsats allokeras till foderproduktion i form av drank. Energiinsats för transport av drank till användare inkluderas.

En annan stor europeisk ”well-to-wheel<sup>5</sup>”-studie är den som genomförts av Concawe, EUCAR & EC Joint Research Centre (2007) där olika drivmedel jämförts ur ett energi- och klimatperspektiv. I Figur 2 visas resultaten från studien som total energiförbrukning respektive utsläpp av växthusgaser per 100 kilometer för olika biodrivmedel och fossila drivmedel baserat på antagna förutsättningar efter år 2010. I totala energiåtgången ingår inte bara den hjälpenergi som krävs vid odling och omvandling utan även bränslets energiinnehåll. Bland de olika etanolalternativen (inringat i figuren) är etanol från sockerrör effektivast ur klimatsynpunkt (lägst utsläpp av växthusgaser). Etanol från vete visar stor spridning men tenderar att ha högst utsläpp av växthusgaser (i ett par exempel t.o.m. lika stora utsläpp som diesel och bensen) men ofta lägst energiförbrukning av etanolalternativen. Etanol från cellulosa ger låga utsläpp av växthusgaser men har hög total energiåtgång per 100 km. Energieffektiviteten för alla etanolalternativ är relativt låg i förhållande till övriga drivmedelsalternativ.

<sup>5</sup> Utsläpp av växthusgaser och energiåtgång under hela produktionskedjan, från odling till användning.



Figur 2 Utsläpp av växthusgaser (g CO<sub>2</sub>-ekvivalenter/km) samt total energiförbrukning (MJ/100 km) då en mellanklassbil körs med olika drivmedel. Beräkningarna är gjorda utifrån ett "well-to-wheel"- perspektiv för förutsättningarna år 2010+ (Källa: Concawe m fl, 2007).

## 2.2 PRINCIPEN FÖR FJÄRRVÄRME- OCH KRAFTVÄRMEPRODUKTION

I ett värmeverk utnyttjas en mängd olika bränslen såsom avfall, skogsbränslen, restvirke, torv och olja till att hetta upp varmvatten som förs ut i fjärrvärmenäten. Fastigheterna värms upp genom värmeväxlare och det nedkylda returvattnet upphettas på nytt i värmeverket. Fjärrvärmenäten möjliggör också en resurseffektiv elproduktion i kraftvärmeverk. I ett kraftvärmeverk kombineras el- och värmeproduktion vilket gör att omkring 90 % av energiinnehållet i råvaran utnyttjas till nyttig el och värme. Ca 1/3 blir el och 2/3 blir värme. Utbytet av el och värme i kraftvärmeverk varierar beroende på råvara och kan också styras beroende på fjärrvärmebehov och elpriser. Ett kraftvärmeverk består vanligen av en ångpanna där bränslet förbränns och rökgaserna används för att hetta upp vatten till ånga. Ångan som då har ett högt tryck får sedan expandera genom en turbin för att producera el. Energin som är kvar i ångan används slutligen för att värma upp fjärrvärmenätet. I många värmeverk och kraftvärmeverk finns idag också rökgaskondensering, vilket innebär att energin i vattenångan i rökgaserna återvinns. På så sätt kan verkningsgraden från bränsle till el- och värme komma upp till 110 % (räknat på effektiva värmevärden<sup>6</sup>). Större andel el kan produceras i ett gaskombiverk, där naturgas eldas i en

<sup>6</sup> Effektivt värmevärde (Lower Heat Value, LHV) anger ett bränsles energiinnehåll minus den energi som binds i vattenångan i rökgaserna, till skillnad från kalorimetriskt värmevärde (Higher Heat Value, HHV) som

gaspanna. I systemanalysen beskrivs ett typiskt biobränsleeldat kraftvärmeverk (se avsnitt 7.1.1).

---

anger hela energiinnehållet i bränslet. Effektivt värmevärde används i förbränningsammanhang eftersom fukten normalt försvinner ut genom skorstenen. (Bioenergi, 2007).

## 3 ETANOL FRÅN STÄRKELSE

### 3.1 PROCESSBESKRIVNING

Framställning av etanol från stärkelsehaltiga råvaror som spannmål kan grovt indelas i följande huvudsteg:

- Råvaruberedning
- Förvätskning och försockring
- Fermentering
- Destillation (rening och uppkoncentrering av etanolen)
- Hantering av restprodukt (indunstning/torkning/rötning)

Råvaruberedningen syftar till att bryta upp stärkelsestrukturen genom att först mala spannmålen till mjöl, blanda med vatten och tillsätta värme så att stärkelsen ”kokar”, förvätskas. Samtidigt spjälkas de långa kolvätekedjorna i stärkelsen till kortare med hjälp av enzymer. Vid försockringen bryts alla kolväten ned till jäsbart envärt socker, glukos, med hjälp av andra enzymer. Vid fermenteringen får jästsvampar jäsa sockret till koldioxid och etanol. För att avskilja etanolen destillerar man etanolblandningen i flera steg så att föroreningar och restprodukter kan skiljas bort. För att uppnå en ren etanol måste etanolen dessutom dehydreras (avskiljas på vatten). Destillationssteget är det mest energikrävande momentet i själva etanolprocessen. Förutom etanol får man en destillationsrest som kallas för drank. Bra hantering och god avsättning för dranken är väsentlig för att få ekonomi i etanolframställningen. Vanligtvis avvattnas den genom indunstning och torkning och säljs som djurfoder, en process som kräver stor energiåtgång. Ur energikombinatsperspektiv kan det bli intressant att istället röta dranken till biogas, något som är under utveckling.

De huvudsakliga processtegen och betingelserna är likartade vid etanolproduktion från olika stärkelserika råvaror men hur processen designas varierar lite beroende på tillverkare. Man kan ha en satsvis (batch), kaskad eller kontinuerlig process som den nedan. Antal tankar varierar och återcirkuleringar av sekundärånga, destillationsrest och kondensat kan lösas på olika sätt, men är en viktig del för god effektivitet vad gäller både energiåtgång och ekonomi. Den process som beskrivs nedan är i huvudsak hämtad från Chematur (2007a-b) och bygger på deras Biostil®-process. En schematisk bild över etanoltillverkning från spannmål visas i Figur 3.

#### 3.1.1 Råvaruberedning och mixning

Först måste spannmålen rensas från skräp och sten. Sedan mals det i en hammarkvarn till mjöl för att minska partikelstorleken så att förvätskningen av stärkelsen underlättas. Mjölet blandas sedan med vatten och recirkulerat processvatten som förvärmats till 80°C. Blandningen består till ca 33 % av vetemjöl.

### 3.1.2 Förvätskning och försockring

Förvätskningen syftar till att gelatinisera stärkelsen genom värmebehandling och börja bryta ned den till kortare polymerer med hjälp av enzymet alfa-amylas. Vid försockringen omvandlas slutligen all stärkelse till jäsbart socker, glukos, av enzymet gluko-amylas. Enzymer står för ca 10–20 % av etanolens produktionskostnad.

Förvätskning sker i två tankar med omrörning som är kopplade i serie. Temperaturen höjs till 90°C genom ånginjicering i första tanken vilket får stärkelsen att gelatiniseras och stärkelsestrukturen att brytas upp. Ett enzym, alfa-amylas, tillsätts som sköter förvätskningen av stärkelsen. Stärkelsen börjar då hydrolyseras till kortare polymerer. pH hålls vid 6–6.5 med hjälp av NaOH. Upphållstiden i varje tank är ca 2 h.

Mäsken kyls sedan till 60°C och förs till tre försockringstankar kopplade i serie. Ett andra enzym, gluko-amylas, tillsätts för att bryta ner den förvätskade stärkelsen till jäsbart socker. Ett tredje enzym tillsätts också för att sänka viskositeten på sockerlösningen. pH kontrolleras till omkring 4 med H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> för att undvika kontaminerande bakterietillväxt (DDGS, 2007; Ibsen m fl, 2005). Upphållstid är 7–8 timmar i vardera tanken.

### 3.1.3 Fermentering

Vid fermenteringen jäser jästsvampar glukosen till lika delar koldioxid och etanol enligt



Koldioxiden kan omhändertas och säljas eller släppas ut till atmosfären. Den vanligaste jästsvampen är *Saccharomyces cerevisiae*. Vid satsvisa processer avbryts jäsningsen normalt då etanolkoncentrationen i mäsken är 9–10 vikt-%. I den kontinuerliga Biostil-processen omsätts sockret omedelbart till etanol och koldioxid och etanolkoncentrationen i fermentorn hålls konstant vid 6–6.5 % vikt genom kontinuerligt uttag av etanol. Ungefär 95 % av sockret omvandlas till etanol, 1 % till celltillväxt i jästen och resterande 4 % till biprodukter som glycerol (DDGS, 2007). Jäsningsen sker vid 30–33°C och överskottsvärme kyls bort via externa värmeväxlare. Utgaserna som består av koldioxid, etanol och flyktiga ämnen kan renas i en vattenskrubber för att ta tillvara ytterligare etanol. Skrubbervattnet kan sedan användas som processvatten i förvätskningen. Mäsken förs sedan till destillationen, oftast via ett jästsepareringssteg där jästen skiljs av och återcirkuleras.

### 3.1.4 Destillering

För att avskilja etanolen från mäsken använder man destillering. Destillation är en separationsmetod för vätskeblandningar där den ånga som står i jämvikt med vätskan har en annan sammansättning än vätskan. Om vätskeblandningen förångas och ångan (destillatet) sedan kondenseras, sker en anrikning av någon av komponenterna i vätskeblandningen (NE, 2007). Denna princip utnyttjas stegvis i olika kolonner för att avskilja etanolen från mäsken och föroreningar. För att minimera energiåtgång och vattenåtgång recirkuleras ofta delar av destillationsresten till tidigare processteg.

Destillationskolonnerna (mäskkolonn och rektifieringskolonn) drivs av ånga och genom att arbeta vid olika tryck kan mäskkolonnen drivas med sekundärånga från rektifieringskolonnen. I mäskkolonnen skiljs etanolen av från mäskan samtidigt som flyktiga ämnen som acetaldehyd drivs av. Etanolen kondenseras sedan och uppkoncentreras därefter i rektifieringskolonnen till omkring 95 % etanol. Högre alkoholer, så kallade finkeloljor, avskiljs också här. Bottenströmmen, lutternvattnet, återcirkuleras inom processen.

### **3.1.5 Dehydrering**

Efter destillationen avskiljs etanolen på återstående vatten till ren etanol (> 99,8 %) i en av två molekylsiktat, medan den andra regenereras. Vattnet återförs till rektifieringskolonnen.

### **3.1.6 Hantering av dranken**

Återstoden från destillationen, så kallad drank, har normalt en torrsbstanshalt på mindre än 6–7 % (Chematur, 2007a). I de flesta etanolanläggningar används större delen av dranken till att göra torrfoder. Då separeras först fiberfraktionen i dranken från vätskefraktionen, drankvattnet, i en centrifug. Fiberfraktionen, som kallas våtkaka, har då en torrsbstanshalt (TS) på 33–35 % (Stavklint, 2007; Ibsen m fl, 2005). Våtkakan kan säljas som våtfoder, men torkas oftast till torrfoder. Drankvattnet recirkuleras delvis till förvätsknings- och fermenteringsstegen, medan resten avvattnas genom indunstning i flera steg till trögflytande sirap med ca 50–55 % TS (Stavklint, 2007; Ibsen m fl, 2005). Sirapen kan säljas direkt som foderprodukt.

För att få ett torrfoder med över 90 % TS (så kallad DDGS) måste våtkakan och eventuellt sirapen torkas. Det finns många olika utformningar på torkar, men mest aktuellt för energikombinat är antagligen någon form av ångtork, med varm vattenånga som torkmedium. Antingen torkas sirapen och våtkakan tillsammans för att sedan pelleteras, eller så torkas våtkakan enbart och blandas sedan med sirap vid pelletering. Sirapen ger nämligen bra stadga i pelleten. Omkring hälften av ångbehovet vid etanoltillverkning åtgår ofta vid torkningen (Stavklint, 2007).

I Biostil processen har dranken 25–30 % TS direkt efter destillationen. Den kan då säljas direkt som flytande djurfoder eller torkas i en ångtork till torrt djurfoder. I den processen behövs alltså ingen separering med centrifug eller avvattning genom indunstning, vilket kraftigt minskar energiåtgången (Chematur, 2007b).

Ett lovande alternativ som förts fram är att använda den blöta dranken för rötning till biogas. Då undviks de energikrävande indunstnings- och torkningsstegen och samtidigt produceras biogas. Av materialet i dranken kvarstår i rötresten efter rötningen då endast ca 1/3 (Stenmark, 2007).

## **3.2 ENERGIBEHOV/ENERGIFLÖDEN**

### **3.2.1 Ånga**

Ånga behövs vid uppvärmning av mäsken under förbehandlingen och vid destillationen. Ånga åtgår också vid indunstning och torkning av dranken till foderpellets, eller för torkning av rötresten till biobränsle då dranken rötas till biogas. I Tabell 4 visas material- och energibalans för två olika anläggningstyper.

I Agroetanols anläggning i Norrköping från 2001 som är av mer konventionell typ där dranken indunstas och torkas till foderpellets används totalt 3,1 MWh ånga per ton producerad etanol. Av detta används ca 7 % före destillation, 45 % vid destillering och dehydrering och resterande 48 % vid torkning av dranken (Bernesson, 2004). Ångan levereras vid 16 bar som är det högsta ångdata som används i processen, men så hög ångdata är inte nödvändig i alla delar av processen (Stavklint, 2007; Svensson, 2007).

För en anläggning som bygger på Biostil och där dranken används för biogasproduktion anges ångbehovet till totalt motsvarande ca 2,1 MWh per ton etanol plus 0,5 MWh om rötresten torkas till biobränsle istället för att avsättas som gödningsmedel (Stenmark, 2007). Processen är optimerad för 7 bars ånga men kan designas för ånga ner till 2,8 bar. Om dranken istället torkas till foderpellets i ångtork blir ångbehovet ungefär det dubbla (Nilsson, 2007).

### **3.2.2 El**

El behövs vid många delar av etanolprocessen, bland annat vid malning, dehydrering, centrifugering och för pumpar. Som visas i Tabell 4 är elförbrukningen vid Agroetanols anläggning ca 0,42 MWh per ton etanol, varav ca 30 % åtgår före destilleringssteget, 20 % vid destillering och dehydrering och 50 % vid avvattning av dranken (Bernesson, 2004). För Biostil med efterföljande rötning anges elförbrukningen till motsvarande 0,45 MWh per ton etanol (Stenmark, 2007).



Tabell 4 Material- och energibalans för två olika vetebaserade etanolanläggningar. MWh per ton producerad etanol<sup>7</sup>.

Anläggning	Tillförd energi [MWh/ ton etanol]			Producerad energi [MWh/ ton etanol]			
	Vete	El	Ånga	Etanol	Biprodukter	Kylvatten (<40°C)	Konden- sat <sup>c</sup>
Agroetanol <sup>a</sup>	13,7	0,42	3,1 (16 bar)	7,5	foder 5,4	i.u.	0,46
Biostil + Scangas <sup>b</sup>	13,7	0,45	2,6 (7 bar)	7,5	metan 3,4 rötrest 2,0	2,9	0,58

<sup>a</sup> Agroetanols anläggning i Norrköping. Dranken torkas till foderpellets (1,1 ton DDGS, 91 % TS, 5 kWh/kg (Kindblom, 2007). Beräknat från Bernesson (2004).

<sup>b</sup> Utifrån beräkningar för planerad anläggning av Chematur och Scandinavian Biogas (Stenmark, 2007). Dranken rötas till biogas (0,25 ton metan). Rötresten torkas till biobränsle (60 % TS).

<sup>c</sup> Egna beräkningar från information i avsnitt 3.2.3. Antaget att 90 % av ångan kan återföras som kondensat.

### 3.2.3 Spillvärme

Större delen av energin som tillförs som ånga blir spillvärme vid olika temperaturnivåer. I processen finns ett kylbehov som producerar en mängd lågvärdig spillvärme, som beroende på ingående kylvattentemperatur håller ca 20–40°C. I Biostil-processen anges ett kylvattenbehov på ca 135 m<sup>3</sup> per ton etanol där kylvattnet värms upp ca 17°C, vilket innebär att ca 2,9 MWh behöver kylas bort per ton etanol, se Tabell 4. Denna energi är svår att hitta användning för eftersom den håller så pass låg temperatur, men kan rent tekniskt t.ex. uppgraderas till fjärrvärme med hjälp av värmepump. Vanligast är att kyla bort värmen i kyltorn.

Större delen av ångan som används i processen kondenseras och kan återföras till kraftvärmeverket. Agroetanol skickar kondensat tillbaka till EON:s kraftvärmeverk där det utnyttjas till fjärrvärme. Kondensatet har då en temperatur på ca 110°C och ett tryck på 4,5 bar (Stavklint, 2007). För en Biostil-anläggning som planeras i Karlskoga kommer ca 90 % av ångan att kondenseras och skickas till kraftvärmeverkets matarvattentank. Den har då samma tryck som vid ångleveransen, 7 bar, och en temperatur kring 165°C (motsvarar kondensationstemperatur vid 7 bar). Resterande del av ångan, ca 10 %, injiceras direkt in i mäsken vid förvätskningen och måste därför ersättas med samma mängd spädvatten i matarvattentanken (Stenmark, 2007). Man kan i ett energikombinat tänka sig annan användning för kondensatet före retur till kraftvärmeverket, såsom förvärmning av biobränsle eller som torkmedium i pelletstorkar.

## 3.3 BIPRODUKTER

Vid fermenteringen bildas stora mängder koldioxid som kan renas och säljas om det finns avsättning för det. Eventuellt kan det i framtiden bli aktuellt att lagra koldioxiden. Dessutom bildas i processen även ett antal biprodukter såsom andra alkoholer och

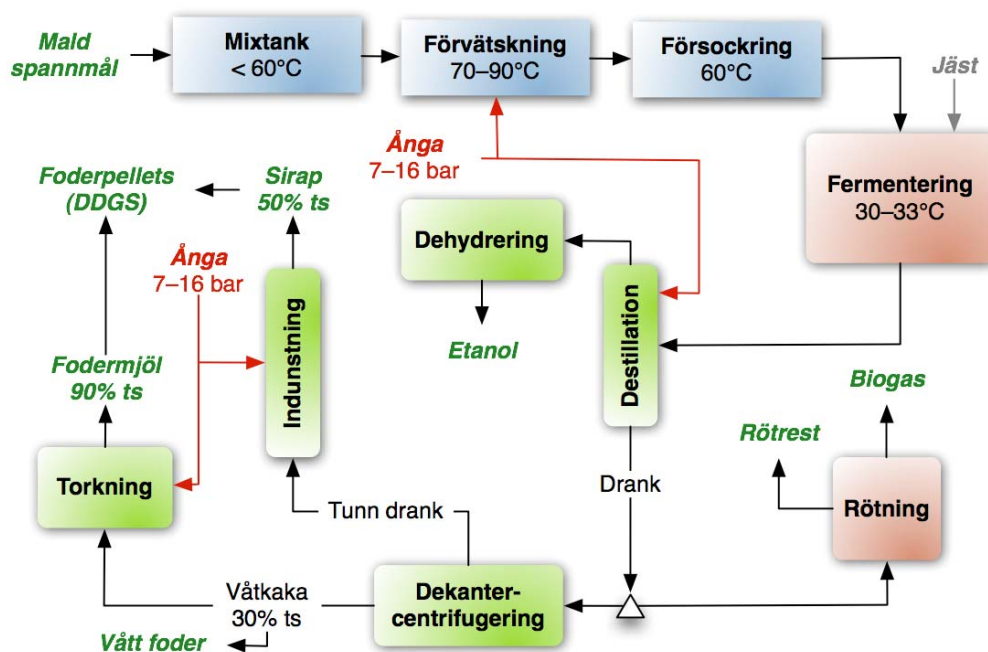
<sup>7</sup> Baserat på effektiva värmevärden (LHV).

aldehyder. Destilleringsstegen efter mäskkolonnen kan designas så att dessa kan avskiljas och säljas (Stavklint, 2007; Chematur, 2007). Den viktigaste biprodukten är dock de stora mängder drank som uppstår.

Dranken består av protein, icke-jäst socker, fibrer och näringsämnen och har ett effektivt värmevärde på knappt 5,5 kWh/kg torrs substans, TS (Stenmark, 2007; Kindblom, 2007). Som behandlats ovan kan den säljas som vått eller torkat djurfoder, vilket görs vid de flesta anläggningar. Dranken kan i ett energikombinat också rötas till biogas. För varje ton etanol fås 3,86 ton drank (28 % TS) som efter rötning blir 1.34 ton rötrest (30 % TS) enligt beräkningar av Stenmark på Chematur. Rötresten har ett effektivt värmevärde på ca 5 kWh/kg TS (Stenmark, 2007). En annan möjlighet är att förbränna dranken för värme- och elproduktion, efter avvattning och/eller torkning.

### 3.4 INTEGRERINGSMÖJLIGHETER

Figur 3 visar en schematisk sammanfattning över etanolprocessens viktigaste delar med alternativ hantering av dranken, tänkbara biprodukter liksom relevanta processenergiströmmar.



Figur 3 Schematisk bild över etanoltillverkning från spannmål med processenergiflöden, alternativ hantering av dranken och möjliga biprodukter. Figuren baseras huvudsakligen på data från Chematur (2007a-b), Stenmark (2007) och Stavklint (2007).

När det gäller processenergi är ett energikombinat att föredra. Etanolprocessen kräver en hel del energi i form av ånga och el som kan produceras både billigare och effektivare i ett kraftvärmeverk. Ångbehovet kan till stora delar tillgodoses med ånga från ett kraftvärme-

verk vid relativt låga tryck, omkring 7 bar, men Agroetanol använder i sin anläggning 16 bars ånga. Som riktvärde är ångförbrukningen fram till och med destillering 1,6–2 MWh/ton etanol. Om dranken sedan används för produktion av foderpellets genom indunstning och /eller torkning blir totala ångförbrukningen nära det dubbla.

En etanolanläggning producerar stora mängder spillvärme vid olika temperaturnivåer och det är viktigt för energibalansen att hitta användning för den. Stora delar av ångan kondenseras och kan skickas tillbaka till kraftvärmeverket. Beroende på hur anläggningen designas finns möjligheter att utnyttja värmeenergin i kondensatet till andra ändamål, såsom lågtemperatortorkning av biobränsle. Hur stort energibehovet är eller vilken ångdata som krävs beror på hur processen utformats och hur man väljer att hantera restprodukterna. Det finns stora möjligheter för återcirkuleringar av varmt processvatten och återanvändning av sekundärånga från en del av processen till en annan. Genom att använda flera steg i serie vid exempelvis destillation och indunstning där efterföljande steg drivs av sekundärånga från det första, kan energiförbrukningen minskas markant. Men samtidigt ökar investeringskostnaden. Det innebär också en större temperaturdifferens mellan ånga in och kondensat ut. För kraftvärmeverket innebär det då en minskad potential för elproduktion eftersom ånga då måste levereras vid högre tryck och temperatur till etanolanläggningen. Det blir från fall till fall en ekonomisk optimering.

När det gäller biprodukterna finns också stora vinster att göra i ett väl integrerat energikombinat. Det vanligaste vid etanolframställning från spannmål är att indunsta och torka dranken till foderpellets som kan lagras och säljas året runt. Denna marknad kan dock snabbt mättas med sänkta priser som följd, vilket varit fallet i USA. Vårt foder å sin sida är en färskvara som det finns begränsad avsättning för, varför det i de flesta fall bara kan bli en delprodukt. Om dranken istället rötas till biogas kan ångförbrukningen halveras genom att indunstning och delar av torkningen undviks. Biogasproduktion av dranken är än så länge en ny och obeprövad teknologi i de stora volymer det handlar om. Men det finns ett antal planerade energikombinat där dranken från etanoltillverkningen skall rötas och där biogasen används inom kombinatet för el- och värmeproduktion eller för uppgradering till fordonsgas. Bland annat har Scandinavian Biogas tillsammans med Chematur Engineering utvecklat ett sådant koncept. Det kan i vissa fall bli svårt att få avsättning för så stora volymer rötslam i form av gödningsmedel inom rimliga transportavstånd. Därför kan det bli aktuellt i ett energikombinat att avvattna eller torka slammet till biobränsle för förbränning i kraftvärmeverket, men med större ångbehov som följd.

Dranken – som är energirik – kan i ett energikombinat även utnyttjas som biobränsle för el- och värmeproduktion. Förbränningsegenskaperna av drank eller eventuell rötrest är föremål för forskning. Sirapen har visat sig kunna ge vissa driftsproblem vid förbränning i vanliga pannor, men det borde kunna lösas i framtiden. Fiberfraktionen, våtkakan, har efter torkning till ca 90 % TS vid försök visat sig gå bra att förbränna i samförbränningspannor (Stenmark, 2007). Eftersom de flesta biobränsleeldade kraftvärmeverk är optimerade för en hög fukthalt på biobränslet (upp mot 50 %) borde drank med en torrhalt över 30 % TS kunna förbrännas direkt i en samförbränningspanna, och värmen i vattenångan kan sedan utnyttjas via rökgaskondensering. Med bra avvattningsteknik i kombination med

återcirkuleringar av processvatten borde tillräckligt hög torrhalt kunna uppnås på dranken utan de energikrävande indunstnings- och torkningsstegen.

Vad som är optimal utformning av ett energikombinat styrs av lokala förutsättningar såsom värmeunderlag och kapacitet i värmeverket, avsättningsmöjligheter för biprodukter och vad som är huvudmålet med energikombinatet.

## 4 ETANOL FRÅN LIGNOCELLULOSA

### 4.1 PROCESSBESKRIVNING

För framställning av etanol från lignocellulosa finns två dominerande processer, den något mer etablerade svagsyrprocessen och den nyare lovande enzymatiska processen. En tredje etablerad process är starksyraprocessen som ger ett högt utbyte, men den har man gått ifrån mer och mer beroende på problem som uppstår då stora mängder starka syror används.

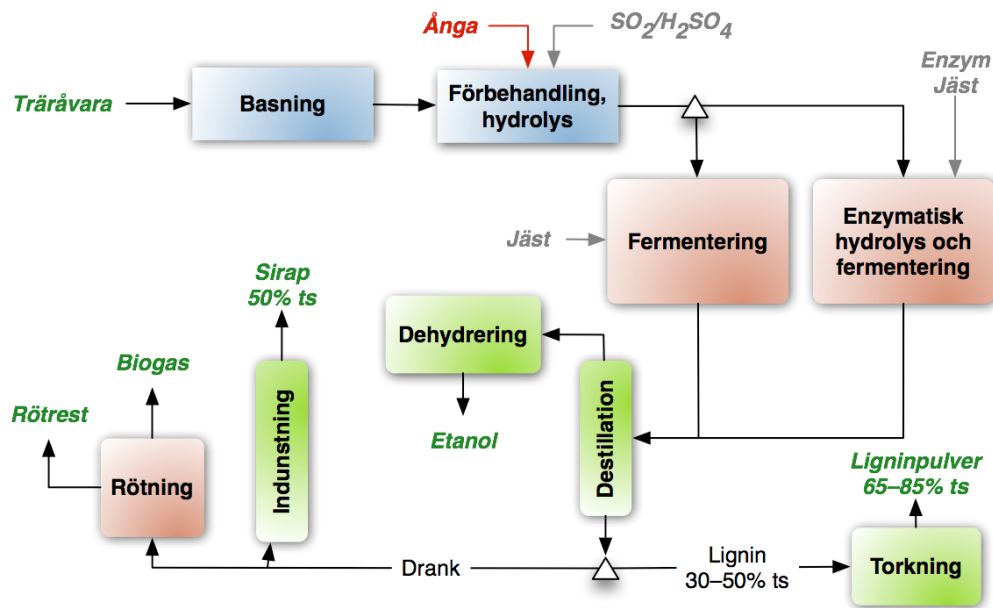
Processbeskrivningen nedan bygger i huvudsak på information från de utvecklingsarbeten som genomförts på Lunds Tekniska Högskola och vid pilotanläggningen för etanoltillverkning från träråvara i Örnsköldsvik (Fransson m fl, 2006; Franzén, 2006; Vallander m fl, 2006; Wingren, 2005).

Tillverkningsprocessen kan indelas i följande huvudsteg:

- Råvaruberedning
- Förbehandling/hydrolys
- Fermentering
- Destillering
- Hantering av biprodukter

Från fermentering och framåt är processen i stort sätt samma som för spannmålsetanol med den skillnaden att förutom drank fås lignin som måste hanteras. Svagsyrametoden och den enzymatiska metoden har stora likheter. I de utvecklingsarbeten som utförs vid etanolpilotanläggningen i Örnsköldsvik testas båda metoderna. Den enzymatiska processen med två stegs förbehandling och svagsyrprocessen har då alla steg lika utom ett extra tredje hydrolyssteg med enzymer.

Vid förbehandlingen frigörs cellulosa fibrerna från veden mekaniskt och kemiskt med hjälp av högtrycksånga och svavelsyra eller  $\text{SO}_2$ . Vid hydrolyssteg bryts cellulosan och hemicellulosan ner till jäsbart socker med hjälp av syra eller enzymer. Sockerlösningen (mäskan) får sedan jäsas till etanol och koldioxid av jästsvampar. Ligninet avskiljs normalt före jäsningen och torkas till bränsleprodukt. Vid enzymatisk process sker ofta hydrolys och jäsning samtidigt. Då avskiljs ligninresten först efter jäsningen, vilket försvårar jästatervinning. Etanolen renas från mäskan genom destillation i flera steg och dehydreras slutligen i exempelvis molekylsiktare för att få ren etanol. Dranken som fås som destillationsrest indunstas och torkas till bränsleprodukt eller rötas till biogas. En skiss över tillverkningsprocessen visas i Figur 4.



Figur 4 Principskiss över lignocellulosabaserad tillverkning av etanol med svagsyrametoden respektive enzymatiska metoden. Figuren baseras på data från Fransson m fl (2006), Franzén (2006), Vallander m fl (2006) och Wingren (2005).

#### 4.1.1 Råvaruberedning

Efter att råvaran har rensats från sand och sten och eventuellt krossats till lämplig storlek genomgår den ofta ett basningssteg (förvärmning).

#### 4.1.2 Förbehandling

Förbehandling med svagsyrametoden sker i två hydrolyssteg. Syftet med första stegets hydrolys är att bryta ner hemicellulosa som omger cellulosastrukturer och att börja luckra upp cellulosastrukturen. Nästan all hemicellulosa och en liten del av cellulosa bryts ner till monomeriskt socker i detta steg. Hemicellulosans utlösta socker kan vid för hårda betingelser vid hydrolysen degraderas vidare till bl. a. svaga alkoholer och furfuraler vilket både sänker etanolutbytet och stör fermenteringen. Därför används två stegs hydrolys där det första steget har mildare betingelser. Därefter tvättas sockerlösningen ut och går till fermentering medan den fasta återstoden (cellulosa och lignin) går till nästa hydrolyssteg med hårdare betingelser.

Vid första stegets hydrolys impregneras veden med  $SO_2$  eller  $H_2SO_4$  som katalysator och behandlas sedan med direktinsprutad högtrycksånga (ca 10–15 bar) vid ca 180–190°C under några minuter. Trycket sänks sedan hastigt genom att materialet kyl-flashas till 100°C, vilket får vedstrukturen att expandera kraftigt och ”explodera”. Större delen av hemicellulosans socker löses ut och separeras av från den fasta olösliga återstoden (cellulosa och lignin). Sockerlösningen går till fermenteringen. Den fasta återstoden tvättas, impregneras på nytt och går till andra stegets hydrolys.

Andra förbehandlingssteget är optimerat för hydrolys av cellulosan genom att behandlingen vid första steget upprepas vid högre temperatur, ca 200–220°C. Det kräver ånga vid ca 22–30 bars tryck. Här bryts cellulosan ner till jäsbart glukos.

Socketrutbytena med svagsyrametoden är dock fortfarande låga. Vid svagsyrahydrolys av barrved i två steg uppnås i lab-skala utbyten av hemicellulosans socker på 70–98 %, medan endast ca 50 % för glukos (Söderström, 2004). Upp till 70 % glukosutbyte kan uppnås endast vid mycket utspädda sockerlösningar (Hamelinck m fl, 2004). För att uppnå bättre utbyten av glukosen i cellulosan kan förbehandlingen följas av ett steg med enzymatisk hydrolys. Vid enzymmetoden förbehandlas veden antingen i två steg som ovan eller bara i ett steg vid ca 215°C.

#### 4.1.3 Enzymatisk hydrolys

Vid enzymatisk hydrolys spjälkas cellulosan till glukosmolekyler med hjälp av enzymer, cellulaser. Antingen sker det i ett separat steg, eller så sker det samtidigt som fermenteringen, så kallad SSF (Simultaneous Saccharification and Fermentation), vilket ger något bättre etanolutbyten. Fördelen med den enzymatiska metoden är högt etanolutbyte, p. g. a. den effektiva omvandlingen av cellulosa till glukos, och att reaktionen sker vid lägre temperatur. Dessutom är degraderingen av bildat socker till inhibitorer låg. Nackdelar är den långsamma reaktionstiden och de höga enzymkostnaderna (Alriksson, 2006). Nya effektivare enzymer är under utveckling. SSF sker vid ca 37°C med en omsättningstid på ca 48 timmar. pH hålls vid ca 5 genom tillsatts av NaOH. Försök med enzymmetoden och SSF har vid Lunds Tekniska Högskola gett ett totalt etanolutbyte på 81 % av det teoretiska (357 liter etanol per ton granflis).

#### 4.1.4 Fermentering

Mäskan från de två hydrolysstegen förs sedan till fermentorn. I allmänhet behövs först ett detoxifieringssteg där mäskan renas från störande ämnen som bildas vid den hårda förbehandlingen. Vid fermenteringen jäser mikroorganismer sockermolekylerna till etanol och koldioxid enligt reaktionerna



Teoretiskt maximalt utbyte per kg socker är 0,51 kg etanol och 0,49 kg koldioxid. Jäsningen sker vid en temperatur på 30–37°C med vanlig bagerijäst, men den klarar inte av att jäsa pentoser vilket är viktigt om man vill använda annan råvara än barrved. Jäst som kan jäsa både pentoser och hexoser är under utveckling. Då kan etanolutbytet av ettåriga grödor och lövved öka från ca 18 % till 25 %. Utbytet för barrved kan bli ca 23 % (Fransson m fl, 2006).

#### **4.1.5 Destillering och dehydrering**

Etanolen avskiljs från mäskan genom destillering och dehydreras till ren etanol i molekylsiktar på samma sätt som för spannmålsetanol (avsnitt 3.1.4 och 3.1.5).

#### **4.1.6 Hantering av biprodukter**

Ligninresten avskiljs normalt före fermenteringen. Med enzymmetoden då fermentering och enzymatisk hydrolys sker samtidigt (SSF) avskiljs ligninet först efter destillationen, som visas i Figur 4. Ligninet avvattnas i centrifug eller kammarfilterpress och kan då nå en torrsubstanshalt på 40–50 % (Lindstedt, 2007). Det är tillräckligt för att förbrännas direkt i ett kraftvärmeverk. Alternativt torkas ligninet i en lignintork till pellets (ca 90 % ts). Då åtgår en stor mängd processånga. På samma sätt som vid etanolframställning från spannmål fås också drank som vid etanolpilotanläggningen i Örnsköldsvik indunstas till sirap med 50–65 % TS. Den kan då förbrännas i ett kraftvärmeverk. Numer tror man mest på rötning av dranken till biogas, vilket är mer energieffektivt (Lindstedt, 2007).

### **4.2 ENERGIBEHOV/ENERGIFLÖDEN**

#### **4.2.1 El och ånga**

Eftersom det inte finns några fullskaliga anläggningar för etanol från lignocellulosa, blir energibehovet en uppskattning utifrån utvecklingsarbeten och simuleringar som gjorts. Behovet av processenergi beror på processdesign och på vilken metod som används, svagsyrametoden eller den antaget mer effektiva enzymmetoden. Energiåtgången beror dessutom till stor del på hur man hanterar biprodukterna. På samma sätt som vid etanoltillverkning från spannmål finns olika sätt att öka energiutbytet i energikombinatet. Det blir en avvägning mellan investering, energieffektivitet och produktion av el och värme.

Tabell 5 summerar energibehov och energi i slutprodukter för etanoltillverkning från barrved. Data är hämtat och omräknat från en simulerad svagsyraanläggning (Franzén, 2006) och två simulerade enzymanläggningar (Franzén, 2006 respektive Wingren, 2005). I svagsyraanläggningen avvattnas ligninet till 40 % TS och dranken indunstas till sirap med 65 % TS. I enzymanläggningarna torkas ligninet från 30 % TS till 85 % TS i en ångtork och dranken indunstas till sirap med 50 % TS. Ångbehovet är i storleksordningen 5–8 MWh/ton producerad etanol, där det högre värdet gäller för svagsyrametoden. Omkring 40 % av ångbehovet består av högtrycksånga (15–30 bar). Om dranken används för biogasproduktion minskar ångförbrukningen med ca 35–40 % eftersom en stor del av torkningen utgår. Elbehovet beräknas i Wingren (2005) vara omkring 0,9 MWh/ton för en enzymanläggning, antagligen något högre för en svagsyraanläggning.



Tabell 5 Ungefärlig energibalans för etanolframställning från barrved. MWh per ton etanol<sup>8</sup>.

Anläggning	Tillförd energi [MWh/ton etanol]			Producerad energi [MWh/ton etanol]			
	Träflis	Ånga	El	Etanol	Biprodukter	Kon- densat	Kylvatten (<40°C)
Svagsyra- anläggning <sup>a</sup>	32,8	8,5 (3-30 bar)	iu	7,5	Lignin 13,1 Sirap 3,8 Bark mm 3,8	1,5 (3 bar)	2-4
Enzym- anläggning <sup>b</sup>	19,9 <sup>c</sup>	5,2 (4-25 bar)	iu	7,5	Lignin 8,2 Sirap 3,6	iu	2-4
Enzym- anläggning <sup>c</sup>	24,1 <sup>c</sup>	5,9 (3-22 bar)	0,9	7,5	Lignin 9,5 Sirap 3,6	iu	iu

<sup>a</sup> Förslag till utvecklingsanläggning från Etek Etanolteknik AB. Uträknat från Franzén (2006). Råvara inkluderar grot och bark. Bark m.m. utsorteras och förbränns. Eff. värmevärde för ligninrest motsvarar 6,4 kWh/kg TS och för sirap 5,3 kWh/kg TS.

<sup>b</sup> Uträknat från en simulerad enzymanläggning från Franzén (2006). Eff. värmevärde för ligninrest motsvarar 6,2 kWh/kg TS och för sirap 5,6 kWh/kg TS.

<sup>c</sup> Uträknat från en simulerad anläggning från Wingren (2005). Produktion: 6,9 m<sup>3</sup> etanol/timme, elbehov: 4,7 MW, ångbehov: 32 MW. Eff. värmevärde för ligninrest motsvarar 6,2 kWh/kg TS och för sirap 5,6 kWh/kg TS.

<sup>e</sup> Antaget eff. värmevärde är 5,3 kWh/kg TS för flis och grot (Strömberg, 2004).

#### 4.2.2 Spillvärme

Vid etanolframställningen fås i stort sätt samma energimängd som tillsätts i form av processånga ut som spillvärme vid olika temperaturnivåer. Största energimängderna återfinns i kylvatten som håller en temperatur på 30–35°C. Omkring 2–4 MWh måste kylas bort per ton etanol (Franzén, 2006). En möjlighet är att med hjälp av värmepumpar upparbeta spillvärmerna till fjärrvärmetemperatur. Det är dock tveksamt om det är aktuellt med rådande elpriser.

Större delen av ångan från de olika delarna av processen kondenseras och kan föras tillbaka till ångpannan som kondensat eller användas till fjärrvärme. Vid förbehandlingen direktinsprutas ångan som därför blir förorenad och måste ersättas med lika mängd spädvatten. I ett energikombinat kan man tänka sig andra användningsområden för kondensatet såsom förtorkning av biobränsle eller pelletstork. Tryck och temperatur på kondensatet beror på processutformningen men håller i allmänhet temperaturer över 100°C. I svagsyraanläggningen ovan fås rent kondensat vid 3 bar motsvarande 1,5 MWh/ton etanol. Dessutom tillkommer smutsig ånga och kondensat från bland annat förbehandlingen och indunstning vars energi torde kunna återvinnas genom värmeväxlingssystem.

<sup>8</sup> Baserat på effektiva värmevärden (LHV).

### 4.3 BIPRODUKTER

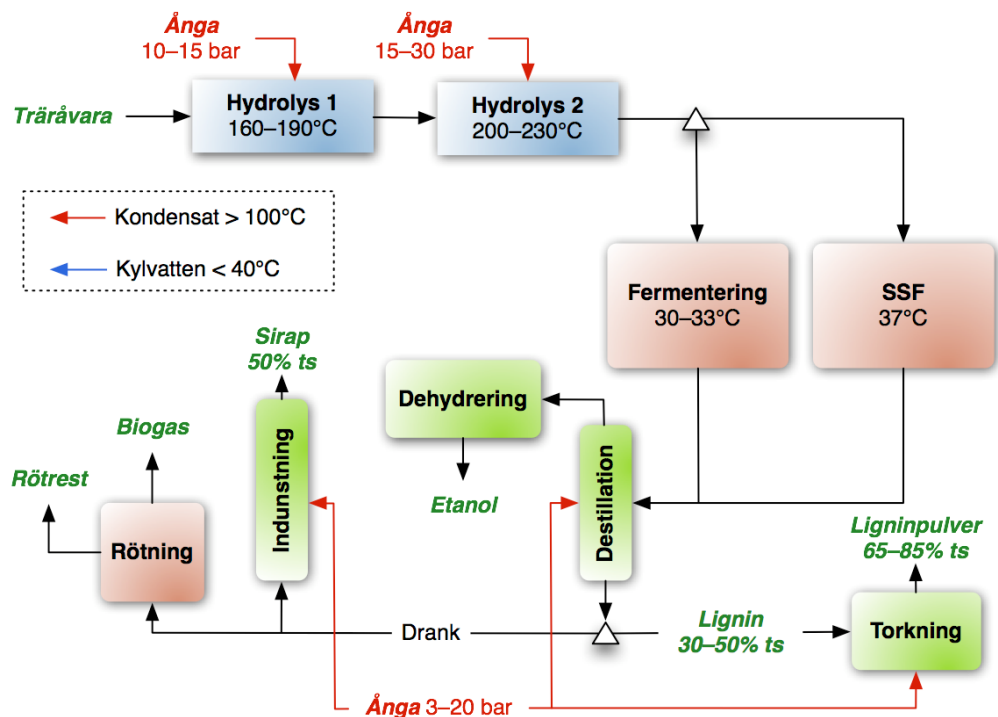
Vid etanolframställning från lignocellulosa uppstår ett antal biprodukter som är viktiga att hitta optimal avsättning för. Vid jäsningen bildas lika vikt etanol och koldioxid. Koldioxiden kan renas och säljas för kommersiellt bruk om det finns avsättning för det. I ett planerat energikombinat i Sveg kan exempelvis koldioxiden utnyttjas i ett växthus. Ligninresten utgör upp till 40 % av träråvarans energiinnehåll och är med sitt höga energivärde utmärkt för förbränning i ett kraftvärmeverk. Dess goda bindningsegenskaper gör den också lämplig för pelletstillverkning. Ligninresten kan torkas till ligninpulver, men numer uppnår man dock 40–50 % TS på ligninresten efter avvattning i kammarfilterpress vilket gör att den kan förbrännas direkt i ett kraftvärmeverk (Lindstedt, 2007).

Den icke jäsbara sockerresten och askan som återfinns i dranken har också ett förhållandevis högt energivärde och kan förbrännas. Man tittar nu alltmer på möjligheten att istället röta dranken till biogas, vilket höjer biodrivmedelsutbytet (i form av etanol och biogas) och minskar energiåtgången för indunstning. Det gäller dock att få avsättning för rötresten som gödningsmedel, alternativt kan den avvattnas och förbrännas.

Av Tabell 5 framgår att mer än hälften av energin i råvaran återfinns i biprodukterna som i ett energikombinat kan användas för el- och värmeproduktion. Ligninresten har ett värmevärde på 5,4–7,2 MWh/ton TS och sirapen 4,2–4,9 MWh/ton (Franzén, 2006; Forsling, 2006; Goldschmidt, 2005).

### 4.4 INTEGRERINGSMÖJLIGHETER

Energikombinat i någon form är en förutsättning vid etanoltillverkning från lignocellulosa. Det finns många delar där integrering är möjlig med el- och värmeproduktion. I ett energikombinat räcker energin i biprodukterna för att driva etanolprocessen och samtidigt producera el och värme för extern försäljning. Genom integrering med en pelletsfabrik kan ligninet dessutom på ett energieffektivt sätt användas för pelletsproduktion. I Figur 5 visas en förenklad bild över etanolprocessen med de viktigaste energiströmmarna och möjliga slutprodukter.



Figur 5 Förenklad bild över etanoltillverkning från lignocellulosa med viktiga procesströmmar och möjliga slutprodukter. Figuren är baserad på data från Fransson m fl (2006), Franzén (2006), Vallander m fl (2006) och Wingren (2005).

Eftersom skogsråvara används både till etanolproduktion och till el- och värmeproduktion i ett biobränsleledat kraftvärmeverk finns många synergieffekter vid integrering. Det gäller bland annat logistik och hantering av råvaran. Det finns en flexibilitet i valet av råvara för etanoltillverkningen och sorteringen kan optimeras utifrån lokala förutsättningar. Bark och annat avrens kan t.ex. förbrännas medan veden går till etanolproduktion.

Processenergibehovet tillgodoses med fördel från ett kraftvärmeverk. Högtrycksånga behövs vid förbehandlingen medan låg- och mellantrycksånga räcker för destillering och torkning av biprodukterna. Genom optimala ångavtappningar vid olika trycknivåer kan ångan generera maximalt med el före leverans till etanolanläggningen. En liten del av ångenergin finns kvar i form av kondensat och kan utnyttjas till fjärrvärme eller till lågtemperatortorkning av biprodukterna. Spillvärme i form av kylvatten kan eventuellt upparbetas till fjärrvärme med värmepump, men det är förmodligen inte lönsamt vid så låga temperaturer (under 40°C). I det planerade kombinatet i Sveg finns planer på att utnyttja spillvärme från etanolprocessen för uppvärmning av växthus (Taflin, 2007). En etanolanläggning kan utgöra ett positivt extra mottryck för ett kraftvärmeverk med överkapacitet, vars drifttid då kan förlängas under sommarhalvåret. Genom att pannan utnyttjas bättre under sommarhalvåret finns möjligheter till ökad elproduktion med oförändrat värmeunderlag i övrigt. Under vinterhalvåret när fjärrvärmebehovet är stort bör det istället innebära en minskning av elproduktionen. Då kan etanolanläggningens stora ångbehov vara svårt att tillgodoses från befintliga kraftvärmeverk. I allmänhet behövs ny

pannkapacitet som optimeras för kombinatet. Det borde finnas möjligheter att bygga om de flesta kraftvärmeverk för de ångavtappningar som behövs, men för de stora ångflöden det handlar om för att en etanolanläggning ska bli lönsam så blir det i många fall nödvändigt att bygga ny pannkapacitet och eventuell turbin som anpassas efter etanolanläggningens behov.

I ett energikombinat kan biprodukterna utnyttjas på bästa sätt. Lignin och sirap (om dranken indunstas) kan förbrännas direkt i kraftvärmeverket. Lignin är också ett bra bindemedel för pelletsproduktion ensamt eller i blandning med annan träråvara. Etanolanläggningens energibehov kan täckas av dess biprodukter och överskottet kan säljas externt som el, värme och pellets. Biobränsle kan också torkas effektivt genom att utnyttja lågvärdig värme, vilket skulle kunna utnyttjas i ett etanolkombinat (Hagberg m fl, 2007 (kommande)). Dranken kan också rötas till biogas för intern el- och värmeproduktion eller för uppgradering till fordonsgas. Det är en energieffektiv lösning som är under utveckling och planeras i ett antal kommande energikombinat i Sverige.

På SEKAB räknar man med verkningsgrader på ca 75 % i ett etanolkombinat från skogsråvara till nyttig energi i form av etanol, värme och el (Lindstedt, 2007).

## **5 TRANSPORT, TILLGÄNGLIGHET OCH ANLÄGGNINGSTORLEK**

De stora investeringarna det handlar om gör att etanolanläggningarna kräver storskalighet. Existerande och planerade etanolanläggningar ligger i storleksordningen 40–150 000 m<sup>3</sup>/år för spannmål och för skogsråvara talar man om anläggningar större än 60 000 m<sup>3</sup>/år. Etanolproduktionen bör hållas igång så gott som året runt för god lönsamhet, varför en etanolanläggning i ett kombinat kommer att utgöra en jämn baslast för ett kraftvärmeverk hela året. Det innebär att etanolkombinat i allmänhet kräver stora fjärrvärmenät och hög kapacitet på kraftvärmeverket.

Med storskaligheten ökar också upptagningsområdet för råvaror och avståndet till mottagare av biprodukter, med ökade transporter som följd. I flera planerade etanolanläggningar för spannmål kommer merparten av spannmålen behöva importeras (t.ex. Karlshamn och Härnösand). Energibesparing i tillverkningen kan göras genom att sälja vått foder istället för torrt eller genom att röta dranken till biogas. Men transporterna blir då omfattande om stora volymer våt drank eller rötrest ska distribueras. Alternativet är att förbränna biprodukterna i kraftvärmeverket.

Vid rötning av dranken till biogas blir komplexiteten i anläggningen större och rötningsprocessen måste hållas igång året runt utan avbrott, pga. den känsliga rötningsprocessen. Biogasen måste dessutom avsättas lokalt. I ett energikombinat kan samtliga biprodukter användas internt för el- och värmeproduktion vilket minskar transportbehovet. Det gäller särskilt för skogsråvara som förutom drank ger en energirik ligninrest.

## 6 EXEMPEL PÅ ENERGIKOMBINAT

### 6.1 ETANOL FRÅN SPANNMÅL

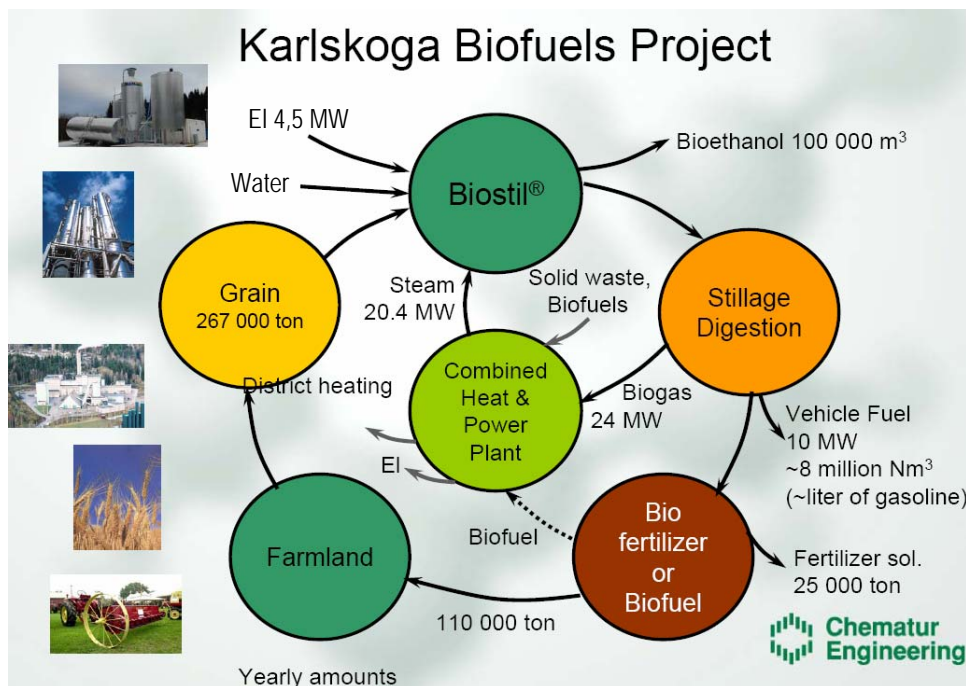
Än så länge är Agroetanols anläggning i Norrköping Sveriges enda storskaliga etanolanläggning. På olika håll i Sverige finns varierande långt gångna planer på ett antal spannmålsbaserade etanolanläggningar, bland annat i Sala, Karlshamn, Härnösand och Karlskoga. En del av dessa finns beskrivna i Värmeforskrapporten Gode m fl (2007). Nedan beskrivs kortfattat Agroetanols befintliga anläggning och ett planerat energikombinatsprojekt i Karlskoga.

#### 6.1.1 Agroetanol i Norrköping

Det är ett energikombinat där processången levereras vid 16 bar från EON:s intilliggande kraftvärmeverk som får tillbaks ångkondensat vid 110°C (4,5 bar) som sedan huvudsakligen används som matarvatten och en liten del till fjärrvärme. Av dranken produceras foderpellets, men en liten del rötas till biogas i en försöksanläggning. Den nuvarande kapaciteten på ca 50 000 m<sup>3</sup> (ca 40 000 ton) etanol/år kommer år 2008 utökas med ytterligare ca 150 000 m<sup>3</sup>/år (Stavklint, 2007). Den nya anläggningen kommer att ha liknande upplägg men med förbättrade energidata (Granstedt, 2007). Vid EON kommer man att bygga ny pannkapacitet och investera i en turbin för elproduktion av ångan före leverans till etanolanläggningen.

#### 6.1.2 Karlskoga

Karlskoga Biofuel planerar ett energikombinat som ska producera 100 000 m<sup>3</sup> (ca 79 000 ton) etanol per år. Dranken ska rötas till biogas, där 70 % används för el- och värmeproduktion i kraftvärmeverket för att täcka etanolanläggningens energibehov. Resten uppgraderas till fordonsgas. Rötresten avsätts som gödningsmedel eller torkas för förbränning i kraftvärmeverket. En översikt över energikombinatet visas i Figur 6. Etanol- och rötningsprocessen är utvecklad av Chematur och Scandinavian Biogas. El och processånga på 7 bar levereras från kraftvärmeverket till en total effekt av 4,5 MW<sub>e</sub> respektive 20,3 MW<sub>th</sub>. Spillvärme i form av ångkondensat vid 165°C och 7 bar från etanolanläggningen återförs till kraftvärmeverkets matarvattentank. Genom energikombinatlösningen anges att 80 % av energin i vetet blir till biodrivmedel (55 % etanol och 25 % biogas). Ytterligare ca 13 % av energin återfinns i rötresten. Energiåtgången uppgår till ca 18 % av energin i råvaran, varav 15 % ånga och 3 % el. (Stenmark, 2007).



Figur 6 Det planerade energikombinatet i Karlskoga (Stenmark, 2007).

## 6.2 ETANOL FRÅN LIGNOCELLULOSA

Ännu är tekniken för etanolproduktion från lignocellulosa inte färdigutvecklad, och storskalig produktion saknas i Sverige. En pilotanläggning finns i Örnsköldsvik och ett par fullskaleanläggningar i energikombinat planeras inom de närmaste åren. Närmare beskrivning av energikombinatsprojekten nedan finns i Gode m fl (2007).

### 6.2.1 Etanolförbrukningen i Örnsköldsvik

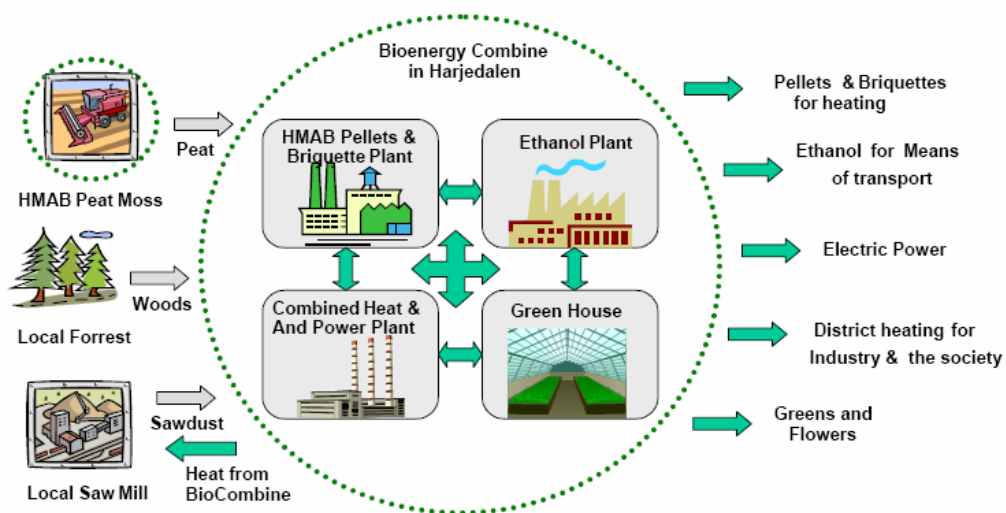
I Domsjö i Örnsköldsvik finns ett löst energikombinat där SEKAB tillverkar 17 000 m<sup>3</sup> etanol per år från sulfittlut från en sulfittfabrik. AGA har utvinning av koldioxiden från etanoltillverkningen. Här byggs också ett kraftvärmeverk. Hela Domsjöområdet har gemensam försörjning av vatten, ånga, el och biorening (Assarsson & Blomqvist, 2005). Sedan 2004 finns en pilotanläggning med kapacitet på 300–400 liter etanol/dygn, där den enzymatiska metoden och svagsyrametoden testas och utvecklas (SEKAB, 2007). Till år 2010 projekteras en industriell utvecklingsanläggning (6000 m<sup>3</sup>/år) intill etanolförbrukningen. Där kommer båda processerna att utvecklas för industriell skala, parallellt som utvecklingsarbetet fortsätter i etanolförbrukningen. (Lindstedt, 2007).

En förstudie pågår om att bygga ett demokombinat med en kapacitet på 60 000 m<sup>3</sup>/år som är väl integrerat med ett kraftvärmeverk. Var det ska placeras och hur det ska se ut är inte fastlagt. Man räknar på SEKAB med att tekniken för etanol från lignocellulosa är klar för kommersialisering kring år 2014–2015 (Lindstedt, 2007).

För närmare information om utvecklingsarbetena i piloten och vid Lunds Tekniska Högskola, se bl. a. Fransson m fl (2006) och Vallander m fl (2006).

### 6.2.2 Energikombinatet i Sveg

I Sveg projekteras för ett större bioenergikombinat som ska producera etanol, pellets, briketter, el och fjärrvärme. Anläggningen som beräknas kosta omkring 2 miljarder kronor ska enligt planerna stå klar under 2009. I det nya bioenergikombinatet ska en befintlig pellets- och brikettfabrik kompletteras med en etanolanläggning med skogråvara (gran och tall) som råvara, och integreras med ett nytt kraftvärmeverk på ca 50 MW<sub>th</sub>. En växthusanläggning på 40 000 m<sup>2</sup> ska värmas med en stor del av spillvärmen, där man också får avsättning för koldioxiden som bildas vid fermenteringen. En skiss över energikombinatet visas i Figur 7. I ett första skede byggs en pilotanläggning där den än så länge kommersiellt obeprövade tekniken ska testas och utvecklas. Därefter bygger man en fullstor anläggning med en kapacitet på 75 000 m<sup>3</sup> etanol per år. Dranken från destillationssteget kommer att indunstas till ca 50 % TS och brännas i kraftvärmeverket, och ligninet pelleteras. I framtiden har man planer på att istället röta dranken till biogas för elproduktion, för att öka totalverkningsgraden i kombinatet ytterligare. Barken förbränns i kraftvärmeverket som kommer att vara självförsörjande på restprodukter från etanoltillverkningen. Man räknar med att 90 % av tillförd energi i råvaran utnyttjas i kombinatet, förutsatt att spillvärmen (< 100°C) kan tas till vara i växthusen. (Taflin, 2007; Ny Teknik, 2006; Nordiska industriprojekt, 2006).



Figur 7 Energikombinatet i Sveg (Taflin, 2007).



## 7 SYSTEMANALYS

I systemanalysen görs en fallstudie över en kraftvärmeanläggning som integreras med två olika etanolanläggningar. Som referensanläggning används Jämtkrafts kraftvärmeanläggning i Östersund med tillhörande fjärrvärmenät som beskrivs inledningsvis (avsnitt 7.1.1) och därefter med gjorda modellantaganden (avsnitt 7.1.2). Två olika etanolanläggningar ingår i modellen – en från spannmål och en från skogsråvara – som beskrivs i avsnitt 7.1.3. Resultaten från beräkningarna beskriver hur produktionen förändras när kraftvärmeanläggningen integreras med de två olika etanolanläggningarna (vid olika storlek) samt jämför verkningsgraden för separat etanolproduktion med etanolproduktion integrerat med kraftvärmeproduktion.

### 7.1 METOD

#### 7.1.1 Beskrivning av Jämtkrafts kraftvärmeverk

I systemanalysen används Jämtkrafts kraftvärmeverk med tillhörande fjärrvärmenät i Östersund. Beskrivningen nedan bygger på information från Nyström (2007) och Selander (2007) på Jämtkraft.

Kraftvärmeverket (KVV) togs i drift 2002 och producerar ett normalår ca 470 GWh värme och ca 200 GWh el (Jämtkraft, 2007). KVV består av en biomassaeldad ångpanna - en cirkulerande fluidbädd (CFB) – med rökgaskondensering (RGK), två ångturbiner (en högtrycksturbin och en lågtrycksturbin), en elgenerator och turbinkondensatorer som värmväxlar mot fjärrvärmenätet.

Pannan som har en maxeffekt på  $125 \text{ MW}_{\text{th}}$  kan sameldas med de flesta typer av biomassa (ej avfall). Nu används en blandning av flis, GROT<sup>9</sup>, restvirke och ca 10 % torv till en total torrhalt på 45-50 % TS. I pannväggarna går rör där matarvatten kokas och förångas. Ångan överhettas sedan i flera steg genom rökgaserna och tillbakafallande sand<sup>10</sup>. Den överhettade ångan, som nu har ett tryck på 140 bar och temperaturen 540°C, pumpas sedan till ångturbinerna. Där får ångan expandera från högt tryck till undertryck vilket driver en elproducerande generator. Ångan som nu har en temperatur på ca 90°C kondenseras sedan i turbinkondensatorerna där fjärrvärmenätet värms genom värmväxling. Beroende på utetemperatur värms inkommande vatten i fjärrvärmenätet från ca 55°C till ca 95°C, eller upp till 120°C riktigt kalla dagar. Före skorstenen sker rökgaskondensering där ångan i röken kondenseras för att förvärma fjärrvärmenätets returvatten från ca 45°C till 55°C. Önskas maximal elproduktion kan rökgaskondenseringen stängas av så att returvattnets

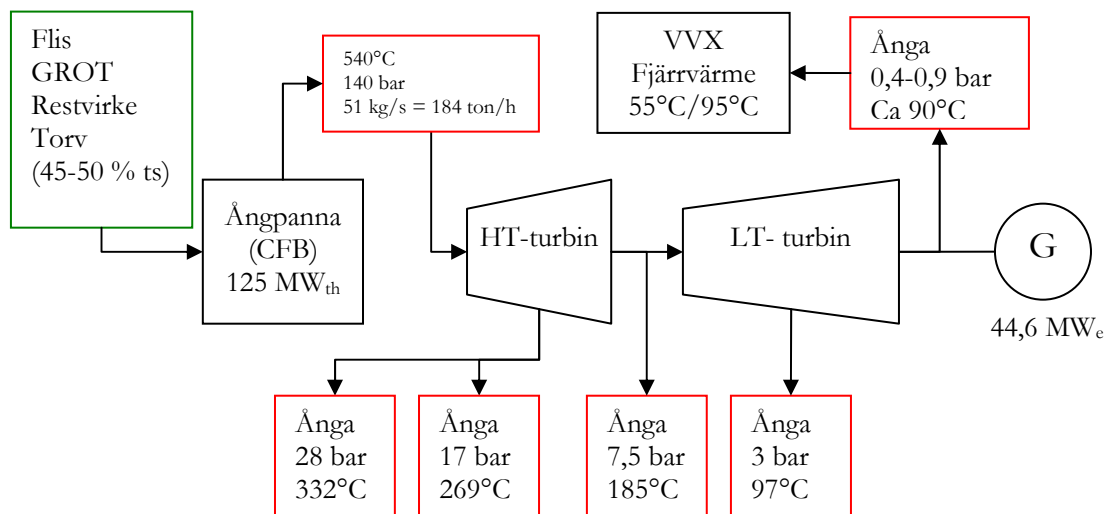
---

<sup>9</sup> GROT = Grenar och toppar

<sup>10</sup> I CFB-pannan cirkulerar biomassan tillsammans med sand med hjälp av luftfläktar underifrån. Biomassan får tillsammans med den upphettade sanden flygande egenskaper vilket ger effektiv och stabil förbränning. Sanden följer delvis med rökgaserna, men faller sedan tillbaks ner i pannan.

temperatur hålls så låg som möjligt. Ju större skillnad mellan in och utvatten vid värmeväxlarna efter turbinen, desto mer el kan produceras. Totala termiska verkningsgraden (energiutnyttjandet från bränslet) sjunker då till förmån för högre elproduktion. Från turbinerna finns ångavtappningar vid olika trycknivåer där en del av ångan leds av för olika effekthöjande åtgärder.

En skiss över kraftvärmeverket med ungefärliga ångavtappningar vid normaldrift med rökgaskondensering (maxlast 100 %) visas i Figur 8.



Figur 8 Schematisk bild över Jämtkrafts kraftvärmeverk i Östersund och ungefärliga ångavtappningar vid maxlast (100 %) inklusive rökgaskondensering (RGK). Baserat på data från Selander (2007).

KVV är dimensionerat för Östersunds fjärrvärmebehov som är ca 120 MW på vintern och ca 20 MW på sommaren. KVV går på maxlast vid en utetemperatur på ca -6°C. Under kallare dagar körs också någon av tre mindre bioeldade pannor (värmeverk) på 25 MW vardera. Med rökgaskondensering har de tillsammans en teoretisk maxeffekt på 93 MW värme. Dessa producerar endast ca 10 bars ånga för fjärrvärme. På sommaren då fjärrvärmebehovet är för lågt står KVV avstängd i ca 10 veckor och någon av biopannorna körs istället.

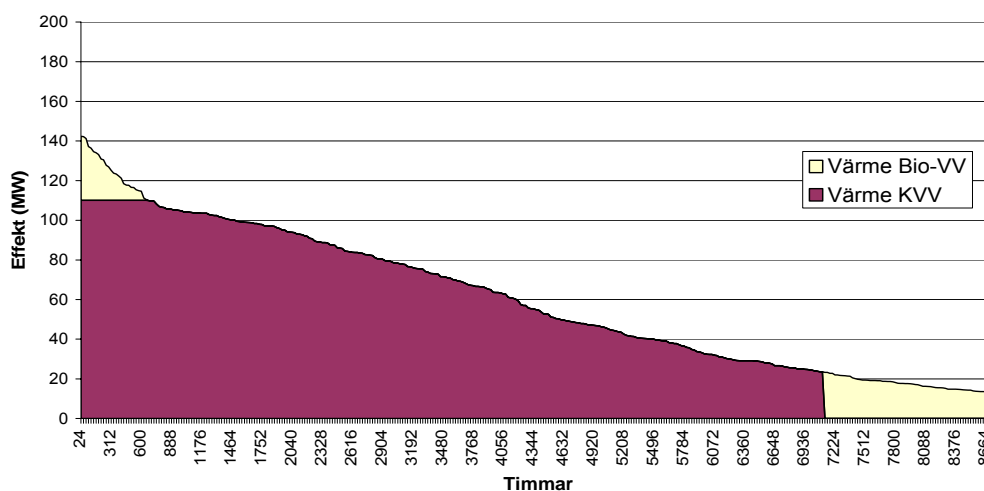
### 7.1.2 Kraftvärmeanläggningen i systemanalysen

Kraftvärmeanläggningen i systemanalysen består av kraftvärmeverket (KVV) och de bioeldade extrapannorna (Bio-VV) som beskrivits ovan. I systemanalysen används ett teoretiskt driftsfall av kraftvärmeanläggningen som gäller vid "lågt elpris" året runt. Det innebär att driften av anläggningen optimeras för värmeproduktion och hög totalverkningsgrad (snarare än elproduktion) genom att RGK används kontinuerligt i KVV. Bio-VV används som spetslast och har alltid RGK. Fjärrvärmeproduktionen baseras på

statistik för Östersunds fjärrvärmenät under åren 2005-2006. Verkningsgraden för KVV exklusive RGK har från information från Selander (2007) antagits till 87 % och 85 % för Bio-VV.

I Figur 9 visas ett varaktighetsdiagram över värmeproduktionen över ett år från anläggningen vid det valda driftsfallet. Varaktighetsdiagrammet beskriver producerad värmeeffekt i KVV och Bio-VV fördelat på antal timmar över ett helt år. Då producerad värme är som störst (längst till vänster i diagrammet) motsvarar de kallaste dagarna och längst till höger i diagrammet de timmar under året då produktionen är som lägst (de varmaste dagarna).

Årsproduktionen av värme är totalt 527,7 GWh/år och elproduktionen är 198,5 GWh/år, vilket visas i Tabell 6.



Figur 9 Varaktighetsdiagram över värmeproduktion i KVV och Bio-VV under ett år i systemanalysens normalfall. Effekt (MW) värme som dygnsmedelsvärden.

Tabell 6 Årsproduktion vid kraftvärmeanläggningen

	Enhet	KVV	Bio-VV	Totalt
Bränsleförbrukning	GWh/år	643	36,9	680
Fjärrvärme	GWh/år	488,9	38,8	527,7
El <sup>a</sup>	GWh/år	198,5	0	198,5
Elverkningsgrad <sup>b</sup>	%	30,9	0	29,2
Verkningsgrad inkl RGK	%	106,9 <sup>c</sup>	105,0	106,8
Verkningsgrad exkl. RGK <sup>c</sup>	%	87	85	-
Driftstid	Timmar/år	7104	2304	-

<sup>a</sup> 0,55\*värmeprod i turbinkondensatorer

<sup>b</sup> Elverkningsgrad = verkningsgrad inkl RGK \* elprod / (elprod + värmeprod)

<sup>c</sup> Totalverkningsgrad inkl. RGK = (värmeprod i kondensatorer + värmeprod i RGK + elprod) / bränsleförbrukning, där: bränsleförbrukning = (värmeprod i kondensatorer + elprod) / verkningsgrad exkl. RGK

<sup>c</sup> Selander (2007)

### 7.1.3 Integrering med etanolanläggning

Två olika etanolanläggningar ingår i systemanalysen. Den ena är en vetebaserad etanolanläggning där dranken rötas till biogas och rötresten torkas till biobränsle. Den bygger på Biostil och Scandinavian Biogas koncept och beskrivs kapitel 3. Den andra är en svagsyraanläggning för etanolproduktion från skogsråvara, där dranken indunstas till sirap och ligninresten torkas till ligninpulver (kapitel 4). Ångbehov och materialbalanser för respektive etanolprocess är hämtade från Tabell 4 och Tabell 5 i teknikbeskrivningarna. Alla biprodukter antas kunna förbrännas i kraftvärmeanläggningen.

Vid integrering av kraftvärmeanläggningen med en etanolanläggning har antagits att ånga till etanolanläggningen kan tappas av från KVV vid de befintliga avtappningarna som visas Figur 8. Spillvärme i form av rent kondensat återförs till KVV. Ökad värme/ångproduktion (dvs. ökat värmeunderlag) i KVV antas motsvara etanolanläggningens ångbehov minus återfört kondensat. Storleken på etanolanläggningarna har dimensionerats så att nettovärmebehovet (ånga-kondensat) blir 30 MW. Det har bedömts som en rimlig extra belastning för kraftvärmeanläggningen som innebär att maxeffekten på Bio-VV ökar från ca 32 MW till ca 62 MW under de kallaste dagarna. Teoretiskt skulle enligt modellen en extra belastning på 47,5 MW vara möjlig för att fortfarande tillgodose fjärrvärmebehovet med befintlig kapacitet i KVV och Bio-VV (maxlast på Bio-VV är då ca 80 MW). Driftstiden har antagits till 8016 timmar/år, dvs. 1 månads underhållsstopp på sommaren som samkörs med KVV. Etanolproduktionen blir då ca 120 000 ton/år i spannmålsanläggningen och ca 35 000 ton/år i svagsyraanläggningen. I Tabell 7 sammanfattas de viktigaste antagandena gjorda i systemanalysen för respektive etanolanläggning.

Den ånga som avtappas till etanolanläggningen antas annars ha producerat el i KVV, motsvarande energiinnehållet i den avtappade ångan subtraherat med energin i samma mängd ånga före kondensering i turbinkondensatorerna. Kondensering antas ske vid 0,6 bar och 90°C. Elproduktionsbortfallet i KVV till följd av ångavtappningarna har beräknats från entalpvärdena som återges i Tabell 12 (Bilagor).

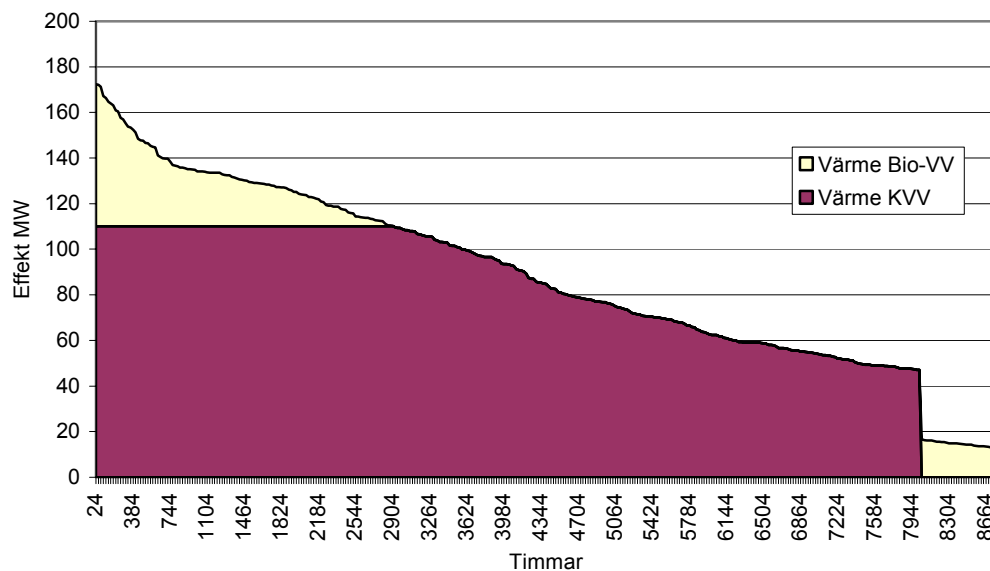
Tabell 7 Antaganden för etanolanläggningarna i systemanalysen.

	Enhet	Spannmålsanläggning	Svagsyraanläggning
Etanolproduktion	Ton/år	119 130	34 450
Driftstid	Timmar	8016	8016
Elbehov	MWh/ton etanol	0,45	1,3
Ångbehov	MWh/ton etanol	2,6	8,5
Spillvärme (kondensat)	MWh/ton etanol	0,6	1,5
Effektbehov ånga	MW	38,6	36,5
Varav avtappning vid:			
28 bar	MW	0	5,2
17 bar	MW	0	7,2
7,5 bar	MW	38,6	17,0
3 bar	MW	0	7,2
Effekt returnerat kondensat	MW	8,6	6,5
Totalt ökad värmeeffekt i KVV	MW	30	30

## 7.2 RESULTAT FRÅN SYSTEMANALYSEN

### 7.2.1 Integrering med spannmålsanläggning

I Figur 10 visas hur motsvarande varaktighetsdiagram som i Figur 9 över värmeproduktionen i KVV och Bio-VV blir vid integrering med spannmålsanläggningen. Driftstiden för KVV förlängs med 38 dagar och antalet fullasttimmar ökar. Produktionen i Bio-VV minskar på sommaren men ökar på vintern jämfört med fallet utan integrering. Skuttet i diagrammet sammanfaller med den tidpunkt då etanolanläggningen tas ur drift (1 månads underhållsstopp per år), vilket gör att värmebehovet är för litet för att KVV skall kunna köras.



Figur 10 Varaktighetsdiagram över värmeproduktion i KVV och Bio-VV vid integrering med spannmålsanläggningen.

I Tabell 8 visas årsproduktion och bränsleförbrukning vid integrering med spannmålsanläggningen samt förändring mot fallet utan integrering (dvs. endast kraftvärmeproduktion). Detta illustreras också i Figur 12. Elproduktionen i KVV ökar med ca 38 GWh/år, men eftersom elkonsumtionen i etanolanläggningen är större än elproduktionsökningen minskar elproduktionen för extern försäljning med ca 16 GWh/år (från 199 GWh/år till 183 GWh/år). Förbränning av rötresten i kraftvärmeanläggningen täcker nästan etanolanläggningens värmebehov, endast 4,6 GWh ytterligare biobränsle måste tillföras per år jämfört med fallet med enbart kraftvärmeanläggning. Fjärrvärmeproduktionen blir oförändrad, 527,7 GWh/år. Av tillförd energi i etanolanläggningen i form av spannmål så blir 55 % etanol och 25 % metan (biogas). Totalverkningsgraden<sup>11</sup> för hela energikombinatet blir ca 87 %, mot ca 107 % vid enbart kraftvärmeproduktion.

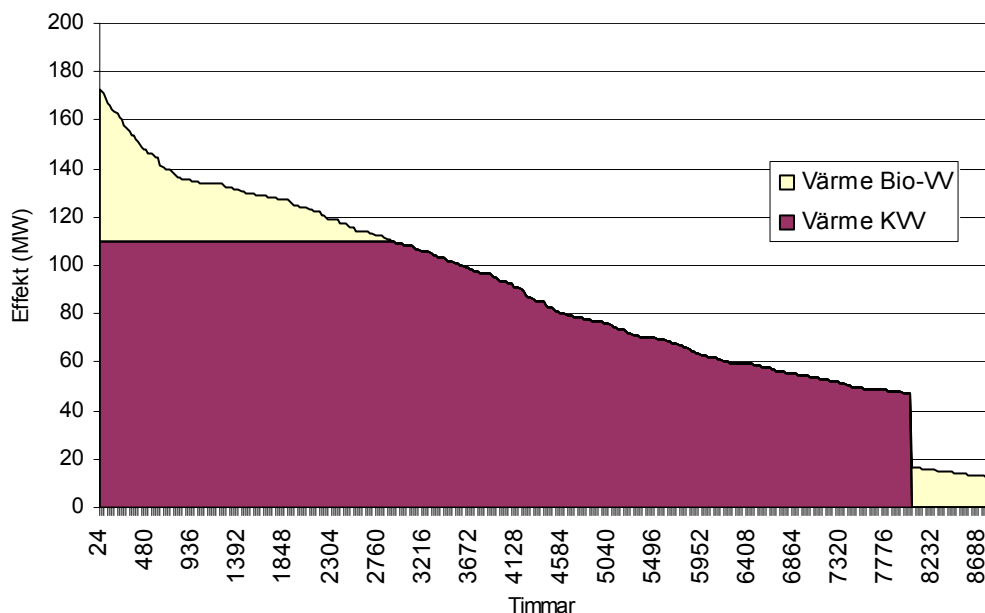
<sup>11</sup> Totalverkningsgrad = energi i utflöden / energi i inflöden

Tabell 8 Bränsleförbrukning och produktion vid integrering med spannmålsanläggningen samt förändring mot fallet med enbart kraftvärmeproduktion.

	GWh/år	Förändring (GWh/år)
<b>Inflöden</b>		
Bränslebehov KVV + Bio-VV	922,83	242,87
Varav förbränning av biprodukter	238,3	238,3
Varav externt bränsle (utöver förbränning av biprodukter)	684,6	4,6
Spannmål	1632,1	1632,1
Inflöden totalt (externt bränsle + spannmål)	2316,7	1636,7
<b>Utfloden</b>		
El totalt	236,5	37,9
El för extern försäljning	182,8	-15,7
Fjärrvärme	527,7	0,0
Etanol	893,5	893,5
Metan (biogas)	405,0	405,0
Utfloden totalt (el+fjärrvärme+biodrivmedel)	2009,1	1282,9
Biprodukter (förbränns i KVV + Bio-VV)		
Rötrest	238,3	238,3
<b>Verkningsgrad</b>	86,7%	-20,1%

### 7.2.2 Integrering med svagsyraanläggning

I Figur 11 visas hur motsvarande varaktighetsdiagram som i Figur 9 över värmeproduktionen i KVV och Bio-VV blir vid integrering med svagsyraanläggningen. Precis som vid integrering med spannmålsanläggningen förlängs drifttiden för KVV med 38 dagar och antalet fullasttimmar ökar. Produktionen i Bio-VV minskar på sommaren men ökar på vintern jämfört med fallet utan integrering.



Figur 11 Varaktighetsdiagram över värmeproduktion i KVV och Bio-VV vid integrering med svagsyraanläggningen.

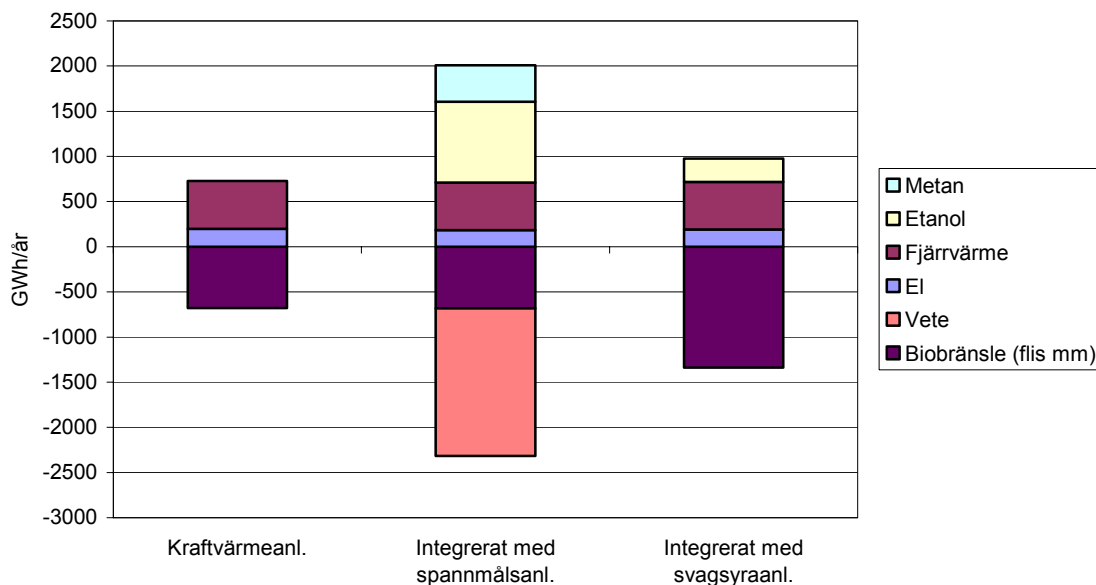
I Tabell 9 visas årsproduktion och bränsleförbrukning vid integrering med svagsyraanläggningen samt förändring mot fallet utan integrering (dvs. endast kraftvärmeproduktion). Detta illustreras också i Figur 12. Elproduktionen i KVV ökar med ca 37 GWh/år, men eftersom elkonsumtionen i etanolanläggningen är större än elproduktionsökningen minskar elproduktionen för extern försäljning med ca 8 GWh/år (från 199 GWh/år till 191 GWh/år). Eftersom de stora mängderna biprodukter från etanolanläggningen antas förbrännas i kraftvärmelanläggningen minskar behovet av bränsle till kraftvärmelanläggningen med ca 471 GWh/år. Om ligninpulvret istället skulle säljas externt blir minskningen av bränslebehovet endast ca 20 GWh/år. Istället ökar bränslebehovet i etanolanläggningen (i form av flis och GROT) så att totala behovet av biobränsle i energikombinatet ökar med ca 660 GWh/år jämfört med fallet med enbart kraftvärmeproduktion. Fjärrvärmeproduktionen blir oförändrad mot fallet utan integrering, 527,7 GWh/år. Av tillförd energi i etanolanläggningen i form av flis och GROT så blir ca 23 % etanol. Totalverkningsgraden<sup>12</sup> för hela energikombinatet blir ca 73 %, mot ca 107 % vid enbart kraftvärmeproduktion.

<sup>12</sup> Totalverkningsgrad = energi i utflöden / energi i inflöden



Tabell 9 Bränsleförbrukning och produktion vid integrering med svagsyraanläggningen samt förändring mot fallet med enbart kraftvärmeproduktion.

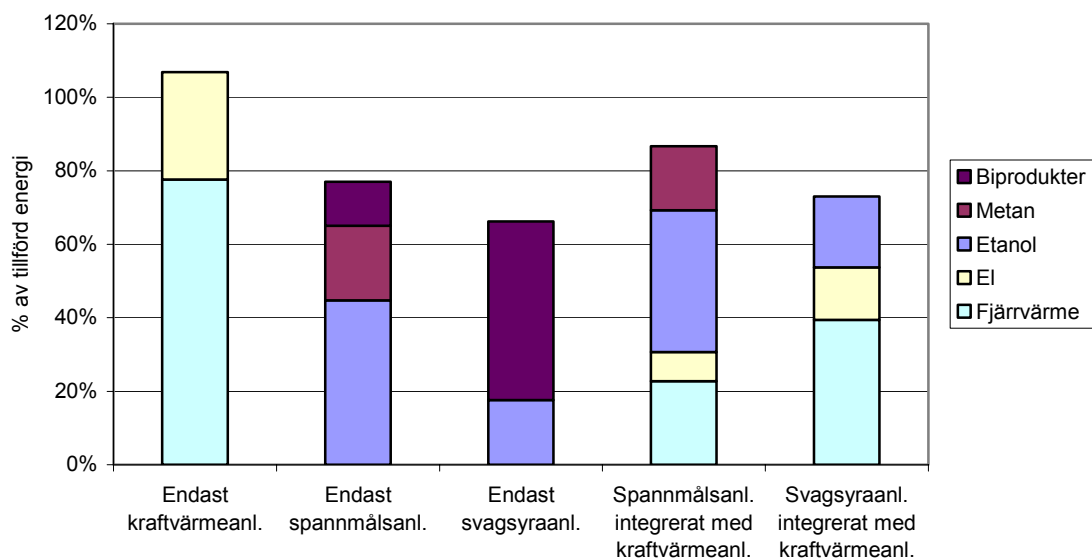
	GWh/år	Förändring (GWh/år)
<b>Inflöden</b>		
Bränslebehov KVV + Bio-VV	921,87	241,91
Varav förbränning av biprodukter	713,1	713,1
Varav externt bränsle (utöver förbränning av biprodukter)	208,8	-471,2
Bränsle (flis, GROT) till etanolanläggning	1130,0	1130,0
Inflöden totalt (externt bränsle + bränsle till etanolanl.)	1338,7	658,8
<b>Utflöden</b>		
El totalt	235,6	37,1
El för extern försäljning	190,9	-7,6
Fjärrvärme	527,7	0,0
Etanol	258,4	258,4
Utflöden totalt (el+fjärrvärme+biodrivmedel)	977,0	250,8
<b>Biprodukter (förbränns i KVV + Bio-VV)</b>		
Lignin	451,3	451,3
Sirap	130,9	130,9
Bark mm	130,9	130,9
Biprodukter totalt	713,1	713,1
<b>Verkningsgrad</b>	73,0%	-33,8%



Figur 12 Produktion och bränslebehov vid integrering med spannmålsanläggning (stapel 2) och svagsyraanläggning (stapel 3) jämfört med enbart kraftvärmeproduktion (stapel 1). Bränslebehov anges med negativa värden och produkter med positiva värden.

### 7.2.3 Jämförelse av verkningsgrader för separata och integrerade anläggningar

En jämförelse av verkningsgraderna för separat produktion av etanol och kraftvärme med verkningsgraderna då etanolanläggningarna integreras med kraftvärmeanläggningen visas i Figur 13. Totalverkningsgraden för kraftvärmeanläggningen (stapel 1) är energin i producerad el och fjärrvärme delat på tillförd energi i form av biobränsle (enligt Tabell 6 ovan). Totalverkningsgraden för etanolanläggningarna (stapel 2 och 3) är energin i produkterna (etanol, metan och biprodukter) delat med tillförd energi i form av flis/GROT/vete + elbehov + ångbehov. Ingen värdering av el- och ångproduktionen för de separata etanolanläggningarna har gjorts. Beräkningsdata för de separata etanolanläggningarna återfinns i Tabell 14 (Bilagor). För de integrerade anläggningarna (stapel 4 och 5) är totalverkningsgraden lika med energin i produkterna (el, fjärrvärme, etanol och metan) delat med energin i totalt tillförd biomassa (flis/GROT/vete för etanolanläggning + bränslebehov för kraftvärmeanläggning (där förbränning av biprodukter från etanoltillverkningen inräknas)), enligt Tabell 8 och Tabell 9 ovan.



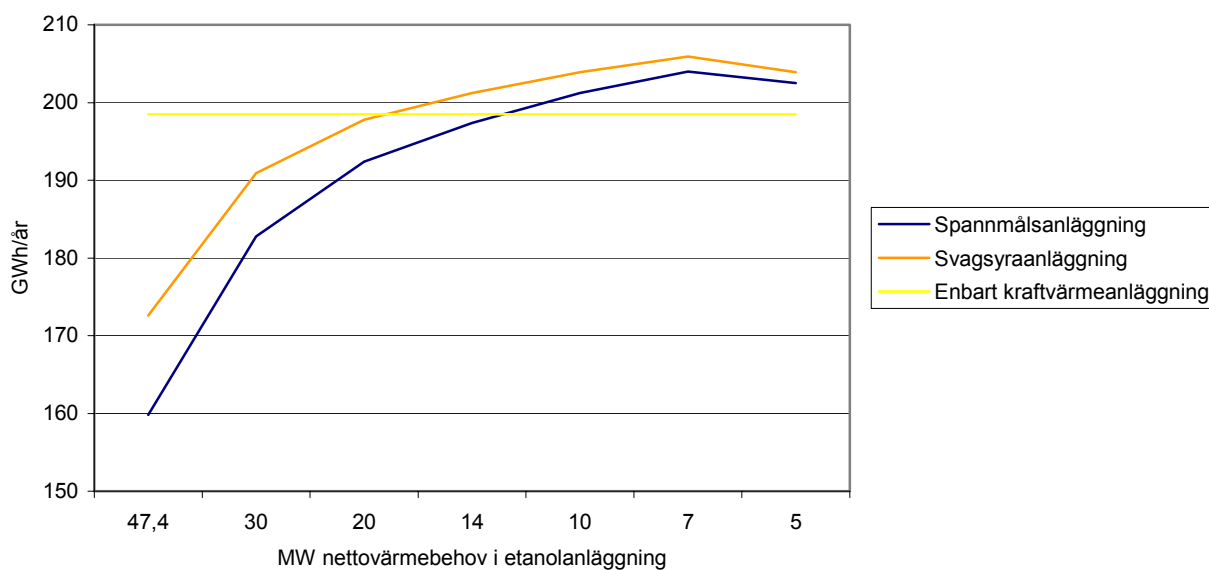
Figur 13 Jämförelse av verkningsgrader för separata och integrerade anläggningar. Verkningsgraden anges som % energi i produkter av totalt tillförd energi. För de separata etanolanläggningarna är tillförd energi lika med energi i tillförd flis/vete + elbehov + ångbehov. För kraftvärmeanläggningen och de integrerade anläggningarna är tillförd energi lika med total tillförd biomassa. I de integrerade anläggningarna förbränns biprodukter från etanolproduktionen i kraftvärmeanläggningen.

Av Figur 13 framgår att totalverkningsgraden är betydligt högre för enbart kraftvärme-produktion än vid samtidig produktion av etanol. Men vid etanolproduktion ser man att totalverkningsgraden blir högre för både spannmålsanläggningen och svagsyraanläggningen om de integreras med kraftvärmeproduktion. Totalverkningsgraden ökar vid integrering

från 77 % till 87 % för spannmålsanläggningen och från 66 % till 73 % för svagsyraanläggningen. Om man för de separata etanolanläggningarna antar att hjälpenergin i form av el och ånga dessutom produceras med viss förlust och utan rökgaskondensering (rimlig verkningsgrad är 85-90 % snarare än 100 %), blir totalverkningsgraden för separat etanolanläggning ännu mindre. Fördelen med integrering blir då större.

#### 7.2.4 Elproduktion vid olika anläggningsstorlekar

Systemanalysen visar att elproduktionen för extern försäljning minskar något vid integrering med både spannmålsanläggningen och svagsyraanläggningen. Framförallt beror det på att elkonsumtionen i etanolprocesserna är större än den elproduktionsökning som sker i KVV till följd av att KVV körs längre och med högre last vid integrering. Figur 14 visar hur elproduktionen för extern försäljning varierar med storleken på etanolanläggningen. För att elproduktionen ska öka vid integrering med spannmålsanläggningen får inte nettovärmebehovet i etanolanläggningen överstiga 13 MW, vilket motsvarar en etanolproduktion på ca 51 000 ton/år (384 GWh/år). För svagsyraanläggningen går gränsen vid ca 23 MW, vilket motsvarar ca 22 000 ton etanol/år (163 GWh/år). För en svagsyraanläggning är det antagligen för småskaligt för att få lönsamhet i tillverkningen.

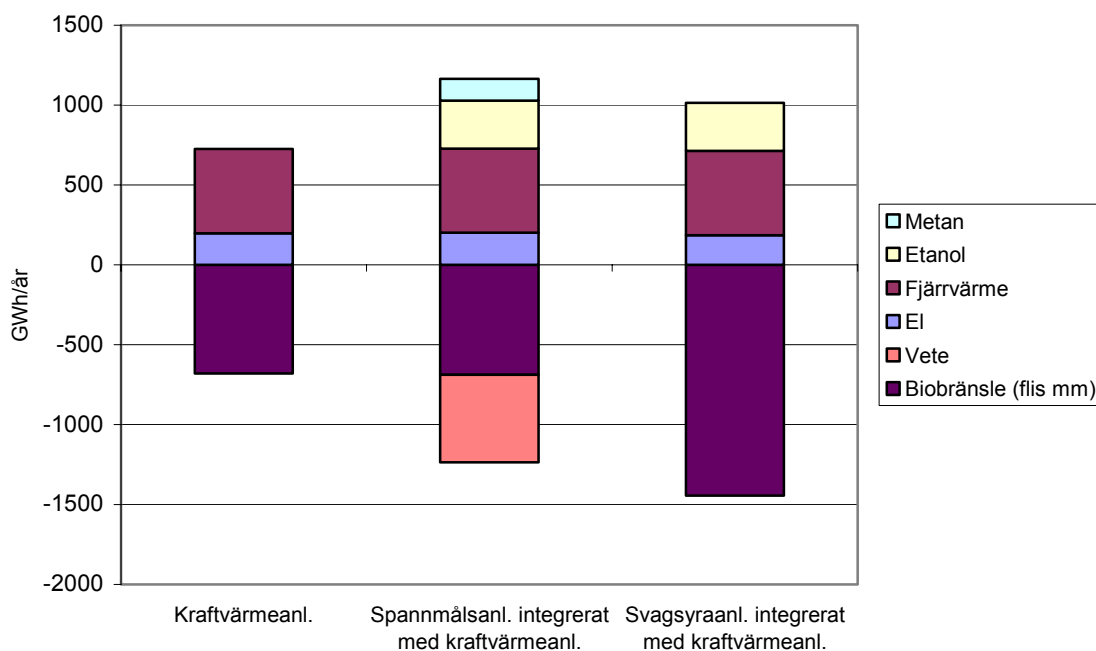


Figur 14 Elproduktion för extern försäljning i energikombinat i förhållande till etanolanläggningens storlek (givet som etanolanläggningens nettovärmebehov<sup>13</sup>).

<sup>13</sup> Etanolanläggningens nettovärmebehov är lika med effektbehov av ånga minus effekt kondensat som returneras till KVV.

## 7.2.5 Jämförelse av anläggningar som producerar 40 000 ton etanol/år

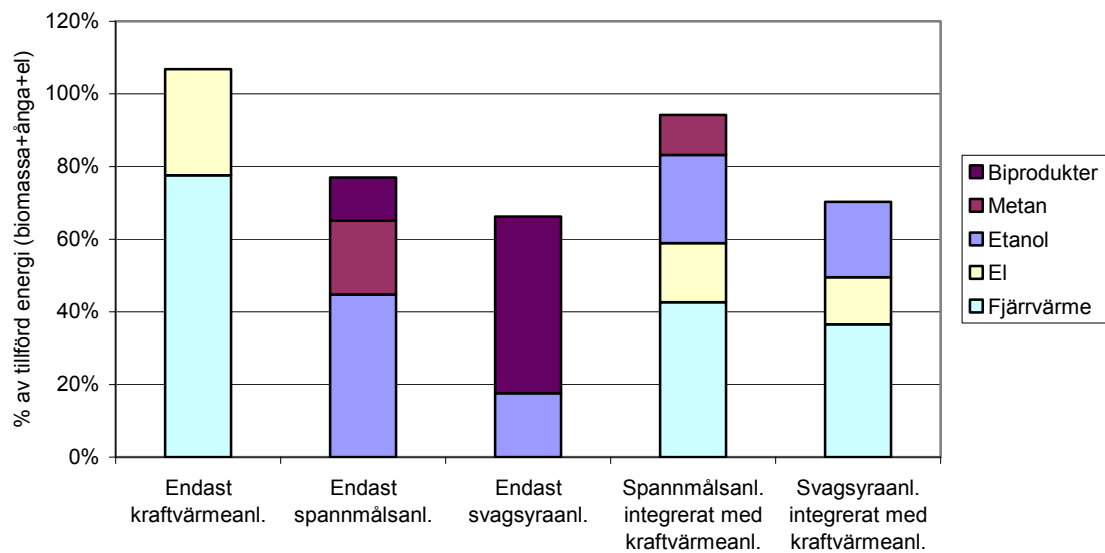
Om etanolanläggningen istället dimensioneras till en etanolproduktion på 40 000 ton/år (motsvarar ungefär Agroetanols anläggning i Norrköping) blir resultatet lite annorlunda. Eftersom energibehovet per ton etanol är ca tre gånger så stort för svagsyraanläggningen blir nettovärmebehovet ca 35 MW för svagsyraanläggningen och endast ca 10 MW för spannmålsanläggningen. Figur 15 visar produktion och bränslebehov för respektive anläggning vid integrering med kraftvärmeanläggningen. Elproduktionen ökar något (2,6 GWh/år) vid integrering med spannmålsanläggningen men minskar med ca 12 GWh/år vid integrering med svagsyraanläggningen. För spannmålsanläggningen täcks det extra bränslebehovet i kraftvärmeanläggningen i stort sätt genom förbränning av biprodukter (rötrest). Vete förbrukningen är ca 550 GWh/år. För kombinatet med svagsyraanläggningen mer än fördubblas det totala behovet av flis och GROT från 680 GWh/år till ca 1440 GWh/år, där det mesta går till etanolanläggningen. Av bränslebehovet i kraftvärmeanläggningen på ca 960 GWh/år täcks 760 GWh/år genom förbränning av biprodukter (lignin, sirap och bark mm) från etanolanläggningen.



Figur 15 Produktion och bränslebehov då kraftvärmeanläggningen integreras med respektive etanolanläggning som producerar 40 000 ton etanol per år.

Totalverkningsgraden ökar till 94 % då spannmålsanläggningen integreras med kraftvärmeanläggningen jämfört med 77 % för separat spannmålsanläggning, vilket visas i Figur 16. För svagsyraanläggningen ger integrering en ökning av totalverkningsgraden från 66 % till 70 %. Orsaken till att totalverkningsgraden för spannmålsanläggningen vid integrering blir högre nu än vid systemanalysens grundfall (87 %, se Figur 13) är framförallt att

etanolanläggningen nu är en tredjedel så stor och därmed får produktionen i kraftvärmeanläggningen (som ger högre totalverkningsgrad) större genomslag. För svagsyraanläggningen, som nu är något större än i grundfallet, blir totalverkningsgraden därför mindre (70 % mot 73 % vid integrering i grundfallet).



Figur 16 Verkningsgrader för separata och integrerade anläggningar vid en etanolproduktion på 40 000 ton/år.

## 8 SAMMANFATTANDE RESULTAT

Studien har gått igenom principerna för etanolproduktion från spannmål (stärkelse) och skogsråvara (lignocellulosa) och lyft fram de viktigaste delarna ur ett integreringsperspektiv. Energi- och materialströmmar har beskrivits med tryck, temperaturer och energimängder där så varit möjligt och möjligheterna till integrering med kraftvärmeproduktion har diskuterats med fokus på effektivitet ur energi-, resurs- och miljöperspektiv.

### 8.1 INTEGRERINGSMÖJLIGHETER

Studien har visat att det finns mycket goda möjligheter till integrering av etanol- och kraftvärmeproduktion. Integrering kan ske på flera sätt. Genom att integrera ång- och kondensatsystemen kan processånga för etanolanläggningen effektivt produceras i kraftvärmeanläggningen och spillenergi i kondensatet kan utnyttjas genom att returneras till kraftvärmeanläggningen, som fjärrvärme eller tillbaka till ångpannans matarvattentank. Före leverans till etanolanläggningen kan ångan utnyttjas för elproduktion och genom att tappa av ånga från kraftvärmeverket vid olika trycknivåer kan elproduktionen optimeras. För förbehandlingen vid jäsning av lignocellulosa krävs högtrycksånga uppemot 30 bar men för övriga processer räcker det med låg- och mellantrycksånga. För jäsning av stärkelse räcker det med låg- och mellantrycksånga, som mest 16 bar. Energiförbrukningen är betydligt högre per ton producerad etanol för jäsning av lignocellulosa än spannmål, delvis pga. den mer krävande processen men framförallt för att etanolutbytet är betydligt lägre från skogsråvara (23-30 %) än från spannmål (50-55 %).

Energikombinat möjliggör också för effektiv hantering och användning av de biprodukter som uppstår. Vid jäsning av lignocellulosa fås en stor mängd energirik ligninrest som kan torkas till pellets eller förbrännas direkt i kraftvärmeverket för el- och värmeproduktion. I Sveg planeras ett energikombinat där även en pelletsfabrik ingår som delvis ska använda ligninresten från etanoltillverkningen som råvara. Det möjliggör för effektivt energiutnyttjande och spillvärme kan utnyttjas som värmekälla för torkningen. Destillationsresten, dranken, kan efter avvattning och/eller indunstning också utnyttjas som biobränsle i kraftvärmeverket. Förbränning av dranken räcker för att täcka etanolanläggningens värmebehov. Detsamma gäller för jäsning av spannmål, men där är dranken så pass proteinrik att den vanligtvis torkas och säljs som djurfoder. Torkning av dranken till foderpellets utgör upp till halva energibehovet, varför man idag också tittar på möjligheten att istället röta dranken till biogas.

Rötning av dranken från både spannmål och lignocellulosa ger ytterligare produktion av biodrivmedel (biogas) samtidigt som energiförbrukningen minskar. Den mindre volymen rötrest kan sedan avsättas som gödningsmedel eller i ett energikombinat förbrännas för kraftvärmeproduktion. Detta planeras i flera energikombinat med etanolproduktion från spannmål, bland annat i Karlskoga. Även vid utvecklingsarbetena för etanol från skogsråvara som bedrivs av bland annat SEKAB i Örnsköldsvik ses rötning av dranken numer som ett huvudalternativ. Förbränning av drank och rötrest kan antagligen innebära vissa svårigheter och är föremål för forskning. Rötning av drank från en etanolanläggning innebär röt-kammarvolymerna många gånger större än i de biogasanläggningar som finns i Sverige idag. Rötning av drank har ännu inte prövats i kommersiell skala och transporterna vid spridning av rötrest kan bli omfattande (om den inte förbränns).

## 8.2 SYSTEMANALYS

Systemanalysen visar att en etanolanläggning utgör ett extra värmeunderlag för en kraftvärmeanläggning vid integrering vilket ger förlängd drifttid och bättre utnyttjande av kraftvärmeverkets kapacitet under sommarhalvåret då fjärrvärmebehovet (värmeunderlaget) annars är lågt. I systemanalysen har en kraftvärmeanläggning (Jämtkrafts KVV i Östersund) som producerar ca 530 GWh värme och ca 200 GWh el per år (totalverkningsgrad ca 107 %) integrerats med två olika etanolanläggningar (spannmålsanläggning med rötning av draken och en skogsråvaraanläggning där biprodukterna torkas till biobränsle) med ett nettovärmebehov på 30 MW. Biprodukterna förbränns i kraftvärmeanläggningen.

Systemanalysen visar att med bibehållen fjärrvärmeproduktion minskar nettoproduktionen av el något vid integreringen för båda anläggningarna. Känslighetsanalysen visar dock att då etanolanläggningens storlek minskas i förhållande till kraftvärmeanläggningen och tillhörande fjärrvärmenät så ökar istället årsproduktionen av el. En liknande systemanalys som gjorts i en studie av Hagberg m fl (2007, kommande) där en spannmålsanläggning i samma storleksordning integrerats med en kraftvärmeanläggning som är betydligt större än den som används i denna studie, visar att elproduktionen ökar vid integrering.

Systemanalysen visar också att totalverkningsgraden blir större för båda etanolanläggningarna om de integreras med kraftvärmeanläggningen jämfört med en fristående etanolanläggning. Utnyttjandet av biomassa blir således bättre om etanolproduktionen sker i energikombinat med samtidig produktion av kraftvärme. Fortfarande är dock totalverkningsgraden för enbart kraftvärmeproduktion betydligt högre än då biomassan ska användas för etanolproduktion.

## 9 DISKUSSION

### 9.1 DISKUSSION OM METOD OCH DATAUNDERLAG

Utgångspunkten för teknikbeskrivningarna har varit befintliga etanolanläggningar (utvecklingsanläggning eller i fullskala) eller planerade/simulerade anläggningar som finns i litteraturen eller genom personlig kontakt med processutvecklare och representanter för anläggningen. Då teknikerna är under snabb utveckling och information om energi- och materialbalanser är kommersiellt känsligt, är det svårt att få fullständig och verifierad data. Tekniken för jäsning av lignocellulosa är fortfarande på utvecklingsstadiet och de teknikbeskrivningar och energibalanser som presenterats i studien är inte verifierade i kommersiell skala och kommer med stor säkerhet att förändras med vidare utveckling. Tekniken för jäsning av stärkelse (och socker) är väl etablerad i kommersiell skala men nya processlösningar utvecklas med mer fokus på energieffektivitet och energikombinatslösningar. Jämförelse av data från befintliga anläggningar och data från forskning och utveckling eller från simuleringar/beräkningar inför planerade anläggningar ska därför göras med stor försiktighet.

I systemanalysen har en modell byggts upp i Excel över en kraftvärmeanläggning som integreras med två olika etanolanläggningar. Eftersom modellen är en förenkling och bygger på data från simulerade anläggningar ska resultaten tolkas som möjligt utfall under gjorda antaganden snarare än ”sanning”. Kraftvärmeanläggningen bygger på data över Jämtkrafts kraftvärmeverk och fjärrvärmenät i Östersund, men gäller bara för ett idealiserat driftsfall och ett antal förenklingar. I själva verket varierar förhållandet mellan el och värmeproduktion från dag till dag och rökgaskondenseringen är inte alltid i drift. Trycknivåerna och entalpierna som används i modellen är antagna från ett verkligt driftsfall av kraftvärmeverket som antas gälla året runt och vara opåverkade av de stora ångavtappningar som görs till etanolanläggningen.

En etanolanläggning utgör ett extra värmeunderlag för ett KVV vilket innebär ökad potentiell årsproduktion av el. Är etanolanläggningen stor i förhållande till kraftvärmeanläggningen (vilket är fallet i systemanalysen) kan dock elkonsumtionen i etanolanläggningen vara större än elproduktionsökningen. Med en större kraftvärmeanläggning/fjärrvärmenät blir integreringen mer gynnsam ur el-synpunkt. Vidare borde ett driftsfall där rökgaskondensering används mer sparsamt eller inte alls gynna elproduktion i ett kombinat ytterligare, dock med lägre totalverkningsgrad som följd eftersom energin i rökgaserna inte utnyttjas fullt ut. Det är osäkert vilka möjligheter som finns att bygga om kraftvärmeverket för de ångavtappningar som anges i modellen. Bäst resultat i ett energikombinat fås antagligen vid byggande av nytt kraftvärmeverk som optimeras för en etanolanläggning som får utgöra baslast året runt.

### 9.2 PROCESSUTFORMNING KONTRA ENERGIEFFEKTIVITET

Det finns självklart flera möjliga utformningar av etanolprocessen vilket påverkar etanolutbyte, energi- och materialbalans och investeringskostnad. Själva biodrivmedelsprocessen kan



energieffektiviseras på olika sätt, men ställs mot ekonomisk optimering eller praktiska problem. Genom att använda flera steg i serie vid exempelvis destillation och indunstning där efterföljande steg drivs av sekundärånga från det första, kan energiförbrukningen minskas markant. Men samtidigt ökar investeringskostnaden. Det innebär också en större temperaturdifferens mellan ånga in och kondensat ut. För kraftvärmeverket innebär det då en minskad potential för elproduktion eftersom ånga måste levereras till biodrivmedelsanläggningen vid högre tryck och temperatur. Det blir från fall till fall en ekonomisk optimering. Att använda sig av ånga vid lägre tryck för att driva processen ger ökad elproduktion i kraftvärmeverket, men kräver ofta större dimensioner på rör och värmeväxlare i biodrivmedelsanläggningen.

### **9.3 HELA PRODUKTIONSKEDJAN ÄR VIKTIG**

Lokala och regionala förutsättningar såsom befintlig kraftvärmekapacitet och fjärrvärmenät, tillgång på råvara, logistik och avsättningsmöjligheter för biprodukter är viktiga faktorer som påverkar möjligheterna och lämpligheten för olika energikombinatslösningar. För bedömning av miljönytta och energieffektivitet vid val av biodrivmedel och omvandlingsteknik måste dessutom hela produktionskedjan betraktas ur ett livscykelperspektiv. Detta projekt har fokuserat på hur omvandling av biomassa till etanol kan göras effektivt genom integrering med el- och värmeproduktion, men övriga delar av produktionskedjan har bara behandlats mycket översiktligt. Olika stor energiinsats och utsläpp av växthusgaser är förknippad med framställning och transport bioråvaran. Här har träråvara vanligtvis en fördel gentemot odlade grödor. Transport och användning av produkter och biprodukter medför också en miljöbelastning som också måste beaktas.

### **9.4 ENERGIKOMBINAT OCH KLIMAT**

Risken för att påverka klimatet genom utsläpp av växthusgaser, exempelvis fossil koldioxid ger drivkrafter att minska energianvändningen. Energieffektivisering samtidigt som klimatförändringarna ger ett varmare klimat innebär att värmeefterfrågan i fjärrvärmenäten i framtiden troligen sjunker. Då är det viktigt för fjärrvärmeföretagen att hitta nya avsättningsmöjligheter för värmen. Denna studie visar att etanolproduktion kan vara ett nytt område för avsättning för värme och dessutom produceras biodrivmedel som kan ersätta fossila bränslen och därmed än mer minska utsläppen av fossil koldioxid. Hagberg m fl (2007, kommande) visar att också produktion av andra biodrivmedel i energikombinat på samma sätt kan utgöra en avsättning för värme vid kraftvärmeverken och att totalverkningsgraden kan öka i energikombinat jämfört med fristående biodrivmedelsproduktion.

## 10 SLUTSATSER

Kraft- och fjärrvärmeproducenter kan spela en viktig roll för en effektiv produktion av etanol. I ett energikombinat med samtidig produktion av etanol, el, värme och eventuellt andra energibärare som pellets och biogas kan innebära nya affärsmöjligheter för fjärrvärmebranschen och möjliggöra för resurseffektiva produktionssystem. Genom att integrera etanolproduktionen i ett energikombinat med kraftvärmeproduktion kan högre verkningsgrad erhållas och ett effektivt utnyttjande av material- och energiflöden kan uppnås.

Vid integrering av ång- och kondensatsystem kan processånga för etanolanläggningen produceras effektivt och samtidigt möjliggöra för ökad elproduktion och förlängd drifttid för kraftvärmeverket. Dessutom kan spillvärme tillvaratas i fjärrvärmenätet. I ett energikombinat kan biprodukterna förbrännas för el- och värmeproduktion vilket räcker för att täcka etanolanläggningens energibehov. Intressanta lösningar i ett energikombinat är också att röta dranken till biogas och /eller utnyttja ligninrest och ev. drank, som fås vid etanoltillverkning från skogsråvara, till pellets i en integrerad pelletsfabrik.

Utformning av ett energikombinat med etanoltillverkning kan göras på många sätt och vad som är bästa lösningen beror på många faktorer. Lokala och regionala förutsättningar såsom tillgång på råvara, avsättningsmöjligheter för biprodukter, befintlig kapacitet på kraftvärmeanläggning och fjärrvärmenät liksom investeringskapital och inte minst vad som är det huvudsakliga målet med kombinatet (t.ex. höga totalverkningsgrader eller högt etanolutbyte). För att bedöma produktionssystemets effektivitet ur klimat- och energisynpunkt måste dock hela produktionskedjan analyseras ur ett livscykelperspektiv, vilket inte varit fokus i denna studie.

## 11 REFERENSER

Alriksson, B., 2006. Ethanol from lignocellulose. Alkali detoxification of dilute-acid spruce hydrolysate. Lic. th. 2006:30, Karlstad Universitet.

Andersson L. (särskild utredare), 2007. *Bioenergi från jordbruket – en växande resurs*, Utredningen om jordbruket som bioenergiproducent, SOU 2007:36, Stockholm.

Assarsson, A. och Blomqvist, P., 2005. *Utvecklingsmöjligheter inom Biokombinatet i Alfredshem*, Rapportnr 1, Processum.

Atterhem, L., 2001. Integrerad bränslefabrik med kraftvärmeanläggning – en utvärdering, Värmeforsk, Rapport T9-606, ISSN 0282-3772.

Berglund, M. och Börjesson, P., 2003a. *Energianalys av biogassystem*, Avdelningen för Miljö- och Energisystem, Institutionen för Teknik och Samhälle, Lunds Tekniska Högskola.

Berglund, M. och Börjesson, P., 2003b. *Miljöanalys av biogassystem*, Avdelningen för Miljö- och Energisystem, Institutionen för Teknik och Samhälle, Lunds Tekniska Högskola.

Bernesson, S., 2004. Life cycle assessment of rapeseed oil, rape methyl ester and ethanol as fuels – a comparison between large- and smallscale production, Rapport 2004:01, Sveriges Lantbruksuniversitet, Uppsala.

Bioenergiportalen, 2007. [www.bioenergiportalen.se](http://www.bioenergiportalen.se). Hämtad den 20 september 2007.

Bioenergi, 2007. *Bioenergihandboken*, [www.novator.se/bioenergy/facts/fuelinvest.pdf](http://www.novator.se/bioenergy/facts/fuelinvest.pdf). Hämtad den 5 oktober 2007.

Börjesson, P., 2007. *Förädling och avsättning av jordbruksbaserade biobränslen*, Rapport nr 62, Lunds Tekniska Högskola, ISSN 1102-3651.

Börjesson, P., 2006. *Energibalans för bioetanol – en kunskapsöversikt*. Rapport nr 59, Lunds Tekniska Högskola.

Börjesson, P., 2004. *Energianalys av drivmedel från spannmål och vall*. Rapport nr 54, Lunds Tekniska Högskola.

Chematur Engineering AB, 2007a. *BIOSTIL 2000 – High Performance ethanol production*, [www.chematur.se](http://www.chematur.se). Hämtad den 12 april 2007.

Chematur Engineering AB, 2007b. *BIOSTIL 2000 – The New Recycling Concept*, [www.chematur.se](http://www.chematur.se). Hämtad den 12 april 2007.

Concawe, EUCAR & EC Joint Research Centre, 2007, Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context, Version 2c, March 2007.

*DDGS User Handbook*, 2007. U.S. Grains Council, [www.grains.org](http://www.grains.org). Hämtad den 13 april 2007.

Energiläget, 2006. ET 2006:43, Energimyndigheten. [www.energimyndigheten.se](http://www.energimyndigheten.se).

Forsling, L., 2006. *Produktion av kraftvärme med restavfall från en fullskalig etanolfabrik*. Examensarbete 2006:295 CIV, Luleå tekniska universitet.

Fransson, G., Lindgren, T., Lindstedt, J., 2006. *Verifiering och utveckling av produktionsteknik för bioetanol med svagsyraprocessen. Slutrapport*, Stiftelsen Lantbruksforskning, Projektnr 0459001, Etek Etanolteknik AB.

Franzén, J., 2006. Synergieffekter vid uppkoppling av kraftvärmeverket Dåva 1 mot en etanolanläggning, Examensarbete, Umeå Universitet.

Gode, J., IVL Svenska Miljöinstitutet, 2007. Personlig kontakt.

Gode, J., Hagberg, L., Holmgren, K., Stripple, H., 2007. *Bioenergikombinat – tekniktrender, system och styrmedel*, Värmeforsk, Rapport T06-614, ISSN 1653-1248.

Goldschmidt, B., 2005. *Biobränslebaserade energikombinat med tillverkning av drivmedel*, Värmeforsk, Rapport 904, ISSN 0282-3772.

Granstedt, J., Lantmännen Energi, 2007. Personlig kontakt.

Hagberg, L., Särnholm, E., Rådberg, H., Rydberg, T., 2007 (kommande). *Fjärrvärmens roll för effektiv produktion av biodrivmedel*, Svensk Fjärrvärme.

Hamelinck, C.N., van Hooijdonk, G., Faaij, A.P.C., 2004. Ethanol from lignocellulosic biomass: techno-economic performance in short-, middle- and long-term. Utrecht University, Nederländerna.

Herland, E., 2005. *LRFs energiscenario till år 2020*, LRF. [www.lrf.se](http://www.lrf.se).

Ibsen, K., McAloon, A., Wallace, R., Yee, W., 2005. Feasibility study for Co-Locating and Integrating Ethanol Production Plants from Corn Starch and Lignocellulosic Feedstocks, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, USA.

Johansson, I., Larsson, L., Wennberg, O., 2004. *Torkning av biobränslen med spillvärme*, Värmeforsk, Rapport A4-312, ISSN 0282-3772.

Jämtkraft, 2007. [www.jamtkraft.se](http://www.jamtkraft.se). Hämtad den 18 april 2007.

Jönsson, M., 2007. *Handelsaspekter på biodrivmedelsområdet*, PM 2007-01-30 rev. 2007-05-09, Handel och Hållbar Utveckling, Kommerskollegium.

Kindblom, Ö., Agroetanol, 2007. Personlig kontakt.

Kommissionen mot oljeberoende, 2006. *Påväg mot ett oljefritt Sverige*. <http://www.sweden.gov.se>.

Lindstedt, J., SEKAB, 2007. Personlig kontakt.

NE, 2007. Nationalecyklopedin. [www.ne.se](http://www.ne.se). Hämtad den 10 april 2007.

Nilsson, D., 2006. Etanol från sockerbetor. Förstudie om möjligheterna till storskalig produktion i Blekinge, Rapport 2006:7, Länsstyrelsen i Blekinge Län, Karlskrona.

Nilsson, H., Sala Heby Energi, 2007. Personlig kontakt.

Nordiska industriprojekt, 2006. [www.medact.se/t\\_projekt](http://www.medact.se/t_projekt). Hämtad den 23 april 2007.

Nyström, N., Jämtkraft, 2007. Personlig kontakt.

Nykomb Synergetics, 2007. [www.nykomb.se](http://www.nykomb.se). Hämtad den 14 augusti 2007.

Ny Teknik, *Kinesisk energijätte vill storsatsa i Sveg*, publicerad 2006-06-07. [www.nyteknik.se](http://www.nyteknik.se). Hämtad den 23 april 2007.

Parikka, M., Institutionen för bioenergi, SLU, 2007. Personlig kontakt.

Regeringskansliet, 2007. <http://www.regeringen.se/sb/d/6784/a/78526>. Hämtad den 3 oktober 2007.

SCB (Statistiska Centralbyrån), 2007. [www.scb.se](http://www.scb.se). Hämtad den 20 september 2007.

SEKAB, 2007, [www.sekab.se](http://www.sekab.se), Hämtad den 26 april 2007.

Selander, K., Jämtkraft, 2007. Skriftligt material och personlig kontakt.

SJV, 2006. Marknadsöversikt. Etanol, en jordbruks- och industriprodukt, Rapport 2006:11, Jordbruksverket, Jönköping.

Stavklint, H., Agroetanol, 2007. Personlig kontakt.

Stenmark, L., Chematur Engineering, 2007. Skriftligt material och personlig kontakt.

Strömberg, B., 2004. *Bränslehandboken*, Värmeforsk, Rapport F4-324, ISSN 0282-3772.

Svensson, J., E.ON, 2007. Personlig kontakt.

Söderström, J., 2004. Optimisation of Two-Step Steam Pretreatment of Softwood for Bioethanol. Lunds Universitet.

Taflin, R., Härjedalens Miljöbränsle AB, 2007. Personlig kontakt.

Vallander, L., Wimmerstedt, R., Östman, A., 2006. *Programmet etanol från skogsråvara. Slutrapport*. ER 2006:23. Statens energimyndighet.

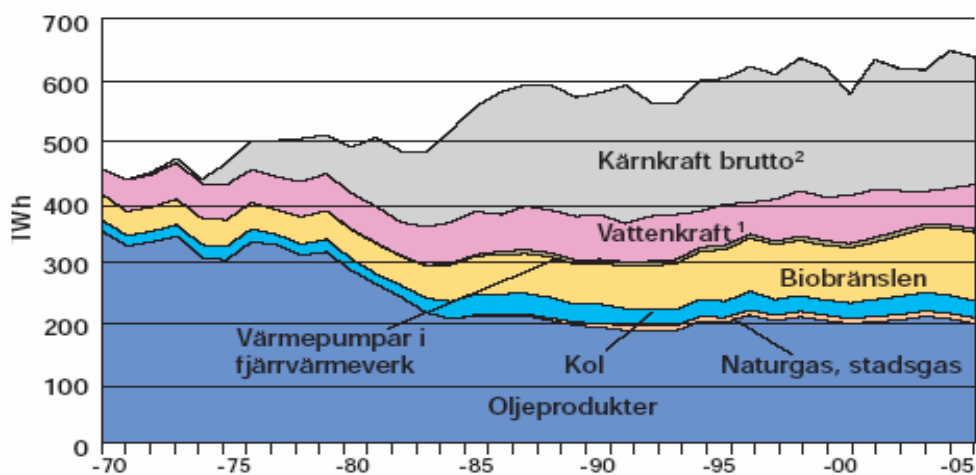
Wingren, A., 2005. *Ethanol from softwood. Techno-Economic Evaluation For Development of the Enzymatic Process*, Lunds Universitet, ISSN 1100-277.

## 12 BILAGOR

### 12.1 ENERGIANVÄNDNINGEN I SVERIGE

Sveriges energitillförsel<sup>14</sup> år 2005 var 630 TWh inklusive en nettoexport av el om ca 8 TWh. Olja och kärnkraft stod för de största andelarna, följt av biobränsle och vattenkraft (se Figur 17). Andelen förnybara energikällor i den totala energitillförseln uppgick till 29 % år 2005 vilket är en relativt hög andel internationellt sett. Till de förnybara energikällorna räknas bl.a. biobränslen, vattenkraft och vindkraft. (Energiläget, 2006).

Bioenergianvändningen har ökat över tiden i det svenska energisystemet, från drygt 10 % av den totala energianvändningen under 1980-talet till 18 % år 2005, se Figur 17. I en internationell jämförelse är biobränslenas andel av energitillförseln i Sverige hög. Sedan år 1970 har tillförseln av biobränslen mer än fördubblats. Under år 2005 uppgick den totala användningen av biobränslen, torv och avfall till 112 TWh. Industrisektorn använde närmare 51 TWh. Bostads- och servicesektorn använde drygt 13 TWh och transportsektorn 1,7 TWh. Cirka 36 TWh användes till fjärrvärmeproduktion. Kraftvärmeanläggningar i fjärrvärmenäten använde 5,7 TWh till elproduktion och industriella mottrycksanläggningar använde 4,4 TWh till elproduktion. (Energiläget, 2006).



KALLA: SCB, ENERGI MYNDIGHETENS BEARBETNING

Anm. 1) Inklusive vindkraft t.o.m. 1996, 2) Enligt den metod som används av FNECE för att beräkna tillförseln från kärnkraften.

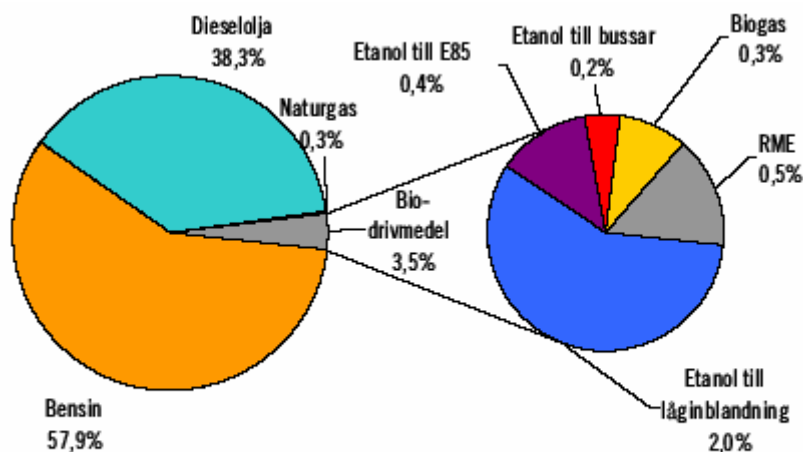
Figur 17 Sveriges totala energitillförsel<sup>15</sup> 1970-2005 (Energiläget, 2007).

<sup>14</sup> Tillförd energi som används för energiproduktion. Förluster som uppstår vid energiproduktionen är alltså inkluderade.

<sup>15</sup> Tillförd energi som används för energiproduktion. Förluster som uppstår vid energiproduktionen är alltså inkluderade.

### 12.1.1 Transportsektorns användning av biodrivmedel

Inom transportsektorn står bioenergi fortfarande för en liten del av energianvändningen. De biodrivmedel som används i någon större utsträckning i Sverige är bioetanol (från sockerrör, spannmål mm.), rapsmetylester (RME) och biogas. Som framgår av Figur 18 uppgick år 2006 biodrivmedel till cirka 3,5 procent av vägtrafikens totala användning av drivmedel, varav 2,6 procent etanol (2,3 TWh), 0,3 procent biogas (0,3 TWh) och 0,5 procent RME (0,4 TWh). (Andersson, 2007).



Källa: Vägverket.

Figur 18 Vägtrafikens användning av drivmedel (Andersson, 2007).

## 12.2 EL- OCH VÄRMEPRODUKTION

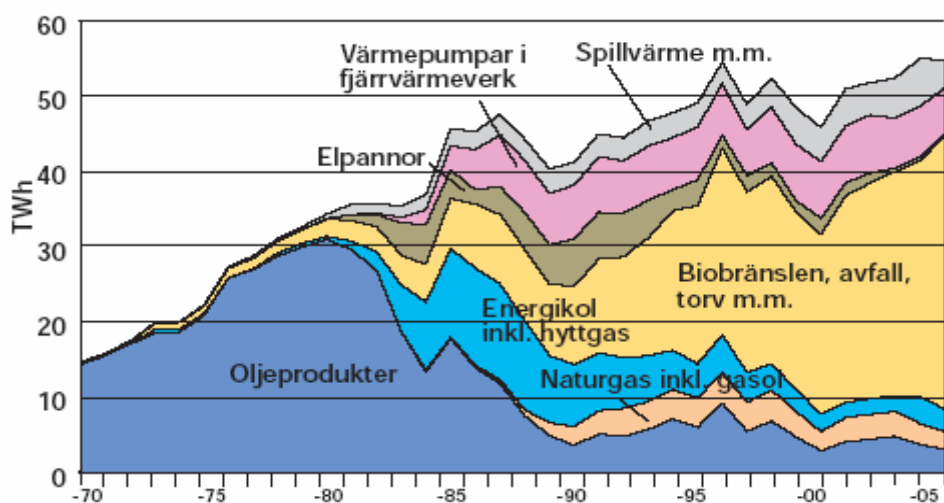
### 12.2.1 Fjärrvärme i Sverige

Fjärrvärmen i Sverige har expanderat kraftigt sedan 1970-talet, i synnerhet under perioden 1975–1985. Fjärrvärmen står idag för cirka 48 % av det totala uppvärmningsbehovet för bostäder och lokaler i Sverige. I flerbostadshus är fjärrvärme den vanligaste uppvärmningsformen, med omkring 78 % av den uppvärmda ytan, medan 56 % av landets lokaler värms med fjärrvärme. I småhus är andelen med fjärrvärme omkring 9 %. Under år 2005 levererades drygt 47 TWh fjärrvärme. (Energiläget, 2006).

Fjärrvärmenäten byggs kontinuerligt ut till nya orter och till villaområden etc. Enligt Svensk Fjärrvärme väntas fjärrvärmeleveranserna öka med ca 10 TWh fram till år 2010, men har potential att på längre sikt svara för 75 % av värmemarknaden (Svensk Fjärrvärme, 2004). Det motsvarar en fjärrvärmepotential på omkring 80 TWh per år. I framtiden kommer dock antagligen efterfrågan på fjärrvärme att minska till följd av kraftiga energieffektiviseringar och ett varmare klimat (Gode, 2007).

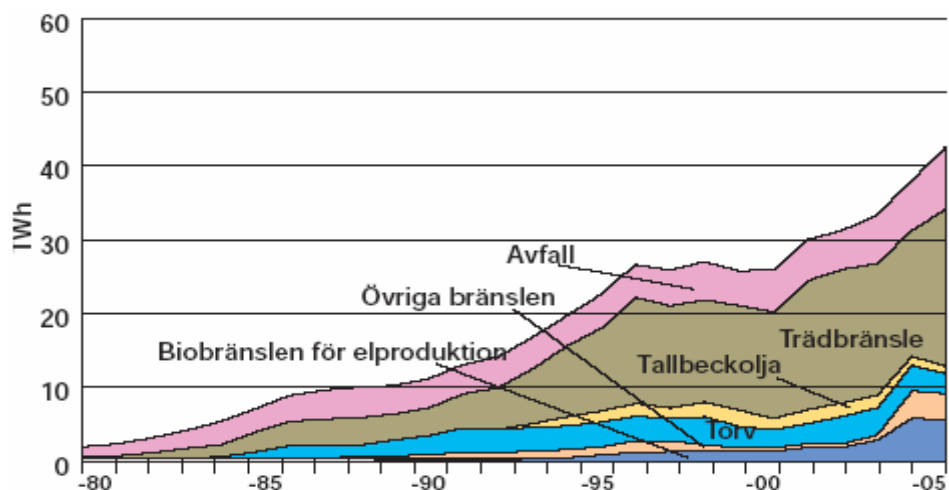


År 1970 stod olja för 98 procent av den tillförda energin i fjärrvärmeverken och biobränslen för resten. Numera är oljans andel bara 8 procent och biobränslen svarar för drygt 57 % av tillförseln, se Figur 19. Under år 2005 användes drygt 36 TWh biobränslen, torv mm. för värmeproduktion i fjärrvärmeverken (exklusive elproduktion). Trädbränslen svarade för drygt 21 TWh, returlutar och tallbeckolja för drygt 1 TWh, avfall för drygt 8 TWh, torv för knappt 3 TWh och övriga bränslen för cirka 3 TWh, se Figur 20. Trädbränsleanvändningen inom fjärrvärmesektorn har mer än femdubblats sedan år 1990. (Energiläget, 2006).



KALLA: SCB, ENERGIMYNDIGHETENS BEARBETNING

Figur 19 Tillförd energi i fjärrvärme 1970-2005 (Energiläget, 2006).



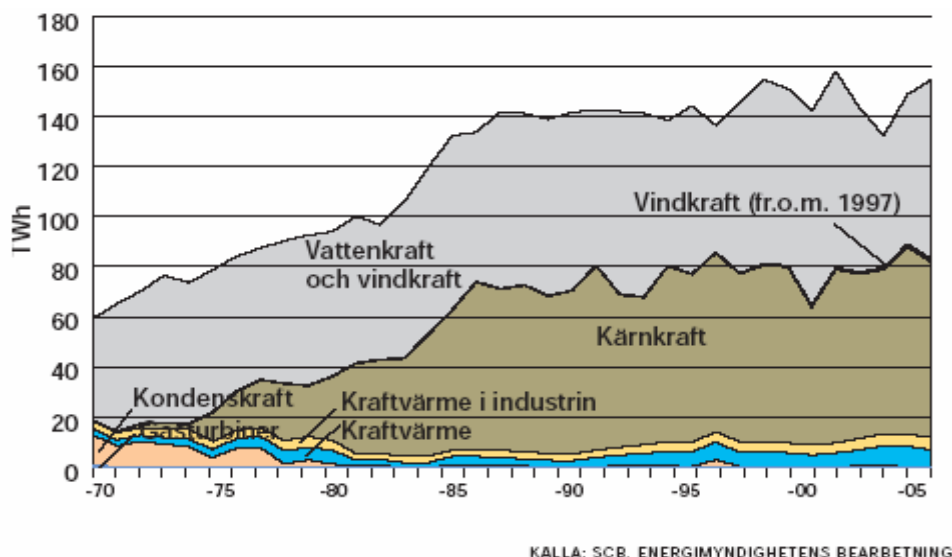
KALLA: SCB, ENERGIMYNDIGHETENS BEARBETNING

Figur 20 Användning av biobränslen (inkl. avfall och torv mm.) i fjärrvärmeverk 1980-2005 (Energiläget, 2006).

### 12.2.2 El i Sverige

År 2005 uppgick den totala elproduktionen i Sverige till ca 155 TWh (inkl. export ca 8 TWh). Kärnkraften svarade för 45 % och vattenkraften för 47 % av produktionen. Resterande 8 % (ca 12 TWh) utgjordes av förbränningsbaserad produktion (kraftvärme och industriella mottrycksanläggningar) samt vindkraft, se Figur 21. Av den förbränningsbaserade elproduktionen utgjorde det insatta bränslet till ca 60 % av biobränslen. (Energiläget, 2006).

I fjärrvärmenäten pågår en konvertering till alltmer kraftvärme. Elproduktionen från kraftvärmeverk väntas öka från ca 5 TWh år 2004 till 11 TWh år 2010 enligt Svensk Fjärrvärme. Med den förväntade utbyggnaden av fjärrvärmen till ca 60 TWh, skulle kraftvärmen kunna byggas ut till ca 27 TWh el eller med större inslag av gas till 41 TWh. Det senare motsvarar en tredjedel av den nuvarande svenska vattenkrafts- och kärnkraftsproduktionen. (Svensk Fjärrvärme, 2004).



Figur 21 Sveriges elproduktion per kraftslag 1970-2005 (Energiläget, 2006).

### 12.3 TILLGÅNG OCH POTENTIAL AV BIOBRÄNSLE

I Sverige har biobränslen kommit att bli ett attraktivt alternativ till fossila bränslen bl.a. på grund av goda inhemska resurser och på biobränslenas goda egenskaper beträffande klimateffekter. Intresset för biomassa för olika ändamål har också ökat och förutses fortsätta att öka framöver. Försörjningstrygghet, höga oljepriser, miljö och klimat är exempel på drivkrafter, som också drivit fram en rad politiska beslut och styrmedel som syftar till att öka användningen av biobränslen. Ett allt högre utnyttjande av biobränslen leder dock till konkurrens mellan olika sektorer och en tendens till detta har redan kunnat påvisas i Sverige (Gode m fl, 2007).

Biobränslemarknaden (inklusive avfall och torv) har kraftigt expanderat från 40 TWh på 1970-talet till ca 112 TWh i dag (Energiläget, 2006). Av detta kommer ca 94 TWh från skogen och skogsindustrin och ca 1,5 TWh från jordbruket (Kommissionen mot oljeberoende, 2006; Andersson, 2007). Den årliga tillväxten av biobränslemarknaden har de senaste åren varit 4-5 TWh. Tillväxten har tidigare varit störst inom fjärrvärmesektorn men är nu betydande även inom övriga sektorer, t.ex. pelletsproduktion. Importen av biobränsle utgör mellan 5 och 9 TWh av biobränslemarknaden (Energiläget, 2006).

### 12.3.1 Biobränsle från skogen

Av de 94 TWh biobränsle som används från skogen idag, används nära hälften inom skogsindustrin för produktion av lutar och annan internanvändning. Exklusive skogsindustrin är användningen av trädbränslen för energiändamål ca 55 TWh (Herland, 2005, Parikka, 2007). Det finns ett antal bedömningar av den svenska potentialen för produktion av trädbränslen för energiändamål i Sverige, varav ett fåtal sammanställts i Tabell 10.

Tabell 10 Sammanställning av potentialbedömningar för möjlig ökning av trädbränsleuttag för energiändamål ur svenska skogar. Källa: Herland (2005) och Kommissionen mot oljeberoende (2006).

Användning idag	SLU (år 2020)	Svebio (år 2025+)	Oljekommissionen (år 2050)
94 TWh	+ 40 TWh	+ 80 TWh	+ 30-57 TWh

Enligt en bedömning av SLU från 2004 är det tekniskt och ekonomiskt möjligt att öka tillgången på trädbränsle för energiändamål med ca 40 TWh (Herland, 2005). Ökningen kommer huvudsakligen från gallringar, avverkningsrester och rena bränsleavverkningar. Enligt Svebios bedömning är det på 20-30 års möjligt att öka tillgången med hela 80 TWh (Herland, 2005). De räknar då med ännu större utnyttjande av avverkningsrester, men också utnyttjande av döda träd och stubbar, vilket kan kräva näringstillförsel från annat håll. Kommissionen mot oljeberoende (2006) bedömer att det till år 2050 kan vara möjligt att öka tillgången på biobränsle från skogen med ca 30 TWh genom effektivare skogsbruk och förbättrad skogsvård. Om intensivodling sker på 5 % av skogsarealen bedöms produktionen kunna öka med ytterligare ca 27 TWh, dvs. en potentiell ökning av tillgången av trädbränsle på närmare 60 TWh.

Om skogsindustrins användning antas vara oförändrad framöver finns enligt ovan nämnda bedömningar alltså potential att öka uttaget av trädbränslen för energiändamål från nuvarande 55 TWh med ytterligare minst 30 TWh på sikt. Det är dock osäkert hur stor del av denna potential som kan utnyttjas praktiskt och ekonomiskt.

### 12.3.2 Biobränsle från jordbruket

Av Sveriges totala åkermark om ca 2,7 miljoner hektar används idag ca 3 % för odling av energigrödor. Bioenergiproduktionen från jordbruket uppgår idag till ca 1,5 TWh som framförallt utgörs av halm, spannmålsetanol, energiskog och spannmål som fastbränsle (Andersson, 2007).

Om biobränslepriserna ökar och livsmedelspriserna fortsätter att stagnera kan många jordbrukare övergå till odling av energigrödor och det kan bli mer lönsamt att ta till vara på halmen för energiändamål. Enligt LRF:s energiscenario till år 2020, som visas i

Tabell 11, finns inom jordbruket potential att öka produktionen av biobränslen till 23 TWh år 2020 (Herland, 2005). När det gäller etanolproduktion från spannmål har man gjort följande räkneexempel. Om 80 % av spannmålsexporten istället används för etanolproduktion skulle 600 000 m<sup>3</sup> etanol per år kunna produceras år 2020, om man räknar med en genomsnittlig avkastningsökning med 1 % per år (Herland, 2005). Detta motsvarar 6-10 % av dagens bensinförbrukning beroende på om etanolen används för låginblandning eller för ren etanoldrift.

Tabell 11 Potential för jordbruket som bioenergiproducent år 2020 enligt LRF:s energiscenario till år 2020 (Herland, 2005).

Råvara	TWh/år
Halm	7
Biogasråvaror inkl. livsmedelsindustri	4
Salix	4
Bränslekärna, rörflen, hampa mm.	2
Etanol från spannmål och sockerbetor	5
Raps till RME	1
<b>Summa</b>	<b>23</b>

Utredningen om jordbruket som bioenergiproducent från 2007 bedömer i sin tur att svenskt jordbruk har en ekonomiskt realiserbar potential att producera ca 30 TWh bioenergi år 2020 (Andersson, 2007).

### 12.3.3 Tillgång på biobränsle för etanolproduktion

Den svenska tillgången på biobränsle skulle sammantaget potentiellt kunna ökas med 30-80 TWh från skogen och 20-30 TWh från jordbruket enligt ovan studerade potentialbedömningar. Med klimatförändringarna väntas också tillväxten i skogen och i jordbruket öka i Sverige och därmed tillgången på biobränslen. Det är dock många faktorer som påverkar hur stor del av denna potential som kommer att realiseras. En del av denna potential skulle kunna användas för produktion av etanol. Efterfrågan på biomassa ökar samtidigt från flera aktörer. Det är således viktigt att biomassan används effektivt, vilket talar för kraftvärmeproduktion eller samproduktion av biodrivmedel och kraftvärme i energikombinat. Hur mycket etanol som skulle kunna produceras i Sverige beror på många olika faktorer. Konkurrensen om biomassa och dess prisutveckling är viktig men också om

produktionskostnaden för etanol blir konkurrenskraftig. Detta beror i sin tur på ekonomiska styrmedel, tullar och prisutvecklingen på olja.

## 12.4 DATA FÖR SYSTEMANALYSEN

Tabell 12 Tryck, temperatur och entalpier för beräkning av elproduktionsbortfall vid avtappning av ånga för etanolanläggning. Värdena är antagna utifrån det ångflödesdiagram över KVV som ligger till grund för Figur 8 (Selander, 2007).

Tryck (bar)	Temperatur (°C)	Entalpi (kJ/kg)
0,6	90	2440
28	332	3079
17	269	2962
7,5	185	2807
3	97	2660

Tabell 13 Elproduktion i KVV vid integrering av etanolanläggning med olika nettovärmebehov.

Produktion [GWh/år]	<i>Anläggningsstorlek (nettovärmebehov från KVV) [MW]</i>						
	47,4	30	20	14	10	7	5
<b>Spannmålsanläggning</b>							
Etanolproduktion	1411,5	893,5	595,6	416,9	297,8	208,5	148,9
El totalt	244,5	236,5	228,1	222,4	219,0	216,5	211,4
El för extern försäljning	159,8	182,8	192,4	197,4	201,2	204,0	202,5
<b>Svagsyraanläggning</b>							
Etanolproduktion	408,1	258,4	172,2	120,6	86,1	60,3	43,1
El totalt	243,1	235,6	227,6	222,1	218,8	216,3	211,3
El för extern försäljning	172,6	190,9	197,8	201,2	203,9	205,9	203,9

Tabell 14 Beräkning av verkningsgrad för separat etanolanläggning i systemanalysen.

	Enhet	Endast spannmålsanl.	Endast svagsyraanl.
<b>Inflöden</b>			
Flis/Vete	GWh/år	1632,1	1130,0
Ånga	GWh/år	309,7	292,8
El	GWh/år	53,6	44,7
Inflöden totalt:	GWh/år	1995,4	1467,5
<b>Utföden</b>			
Etanol	GWh/år	893,5	258,4
Metan	GWh/år	405,0	0,0
Biprodukter	GWh/år	238,3	713,1
Utföden totalt:	GWh/år	1536,8	971,5
<b>Verkningsgrad</b>	%	77	66

