



LUND UNIVERSITY

Energibalans för bioetanol - En kunskapsöversikt

Börjesson, Pål

2006

[Link to publication](#)

Citation for published version (APA):

Börjesson, P. (2006). *Energibalans för bioetanol - En kunskapsöversikt*. (IMES/EESS Report; Vol. 59). Department of Environmental and Energy Systems Studies, Lund university.

Total number of authors:

1

General rights

Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

Read more about Creative commons licenses: <https://creativecommons.org/licenses/>

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

LUND UNIVERSITY

PO Box 117
221 00 Lund
+46 46-222 00 00



LUNDS TEKNISKA HÖGSKOLA
Lunds universitet

Institutionen för teknik och samhälle
Avdelningen för miljö- och energisystem

Energibalans för bioetanol

- En kunskapsöversikt

Pål Börjesson

Rapport nr 59

Mars 2006

Dokumentutgivare, Dokumentet kan erhållas från LUNDS TEKNISKA HÖGSKOLA vid Lunds universitet Institutionen för teknik och samhälle Avdelningen för miljö- och energisystem Gerdagatan 13 223 62 Lund Telefon: 046-222 00 00 Telefax: 046-222 86 44	Dokumentnamn
	Rapport Utgivningsdatum Mars 2006
	Författare Pål Börjesson

Dokumenttitel och undertitel Energibalans för bioetanol – en kunskapsöversikt

Sammandrag

Med ett ökat intresse för biodrivmedel som t ex etanol från spannmål diskuteras alltmer deras energieffektivitet. I debatten framförs ibland påståenden om att det åtgår mer energi för att producera bioetanol än vad som finns i drivmedlet, medan andra påståenden gör gällande att ett stort nettoöverskott av energi fås. Denna kunskapsöversikt beskriver hur resultaten från svenska och internationella energibalansstudier av bioetanol skiljer och vad detta beror på. Med energibalans menas drivmedelsutbyte dividerat med all den energi som använts i produktionskedjan, från odling till förädling till bioetanol. Energibalansen för spannmålsbaserad etanol är i genomsnitt 1,6 för de studier som här sammanställts, med en spridning mellan 0,7 till 2,8. Som jämförelse är energibalansen i genomsnitt 1,4, 1,8 samt 3,2 för etanol baserat på majs, sockerbetor respektive lignocellulosa (t ex energiskog). Det finns en mängd olika förklaringar varför energibalanserna varierar, även när samma råvara utnyttjas. Dels finns skillnader i lokala och geografiska förutsättningar, dels skillnader i beräkningsmetodik. Beroende av vad som inkluderas i produktionssystemet samt hur energiåtgången fördelas mellan bioetanol och de biprodukter som uppstår, kan energibalansen variera med en faktor 5. Detta innebär att rättvisande jämförelser är omöjliga att göra om inte de antaganden som gjorts redovisas tydligt. Resultat från andra typer av studier som exergi- och emergianalys visar ofta negativa resultat för bioetanol, men det är inte meningsfullt att jämföra dessa resultat med resultat från energianalys då metoderna har olika utgångspunkt och svarar på olika frågor. Energibalansen för spannmålsbaserad etanol kan förbättras genom energieffektivare odling, men framför allt genom energieffektivare omvandlingsprocesser. En möjlighet är att utnyttja så kallade energikombinat med hög omvandlingseffektivitet, där t ex spannmål kombinerat med energiskog förädlas till etanol, biogas, och el.

Nyckelord Energibalans, etanol, energigrödor		
Omfång 16	Språk Svenska Sammandrag på engelska	ISRN ISRN LUTFD2/TFEM--06/3050--SE + (1-17)
ISSN ISSN 1102-3651		ISBN ISBN 91-88360-82-2
Intern institutionsbeteckning Rapport nr 59		
Organisation, The document can be obtained through LUND UNIVERSITY		Type of document Report

Department of Technology and Society Environmental and Energy Systems Studies Gerdagatan 13, SE-223 62 Lund, Sweden Telephone: int+46 46-222 00 00 Telefax: int+46 46-222 86 44	Date of issue
	March 2006 Authors Pål Börjesson

Title and subtitle

Energy Balance of Bioethanol – A Review

Abstract

This review presents a synthesis of various Swedish and international studies on the bio-ethanol energy balance, and an analysis of how and why their results differ. Other methods, such as exergy- and energy analysis, are discussed and compared with the energy analysis method. Finally, potential improvements of the energy efficiency in bio-ethanol production are discussed. The energy balance is here expressed as the ratio of the energy content of the fuel to the primary energy input for the entire production cycle of the fuel. The energy balance of ethanol from cereals is, on average, 1.6, and varies between 0.7 and 2.8. Corresponding average figures for ethanol from corn, sugar beets and lignocellulosic biomass (e.g. energy forest) are 1.4, 1.8 and 3.2, respectively. There are several reasons why the energy balances differ between the different studies, even where the feedstock is identical. The sources of differences can be divided between those related to differences in local and geographical conditions, and those related to differences in the methodological approach applied. Depending on the definition of the system that is studied (systems boundaries), and how the energy input is divided between the ethanol and the by-products generated in the process (allocation methods), the energy balance may differ by a factor of 5. Thus, it is impossible to make reliable and fair comparisons between different studies unless all assumptions are clearly presented and defined. Results from exergy- and energy analysis of bio-ethanol often show significantly different results from those presented in energy analyses. It is, however, not useful to compare these different results since the various methods have different focuses and are answering different questions. The energy balance of cereal-based ethanol can be improved by more efficient cultivation methods, but mainly by improved conversion processes. One possibility is by using bio-refineries where not only ethanol but also biogas, heat and electricity are produced from cereals and, for example, energy forest.

Keywords

Energy balance, ethanol, energy crops

Number of pages	Language	ISRN
16	Swedish, English abstract	ISRN LUTFD2/TFEM--06/3050--SE + (1-17)
ISSN	ISBN	
ISSN 1102-3651	ISBN 91-88360-82-2	

Department classification

Report No. 59

Förord

Denna studie har genomförts med ekonomiskt stöd från VL-Stiftelsen.

Lund, mars 2006

Pål Börjesson

Innehållsförteckning

1.	Bakgrund.....	2
2.	Syfte.....	2
3.	Metod.....	2
4.	Energibalans – en beskrivning.....	2
5.	Resultat från svenska studier	3
6.	Resultat från internationella studier.....	4
7.	Analys av betydande faktorer	7
8.	Alternativa energianalyser – exergi och energi	10
9.	Slutsatser och diskussion	13
10.	Referenser	15

1. Bakgrund

Med ett ökat intresse för biodrivmedel börjar dessa granskas alltmer utifrån energi-, resurs-, och miljöeffektivitet. I debatten figurerar ofta väldigt olika uppgifter kring enskilda biodrivmedels energieffektivitet när hela bränslekedjan beaktas (från vaggan till graven). En anledning till att så olika uppgifter figurerar kan vara okunskap och/eller att antaganden, systemgränser, allokeringar mm i bränslecykelanalyser skiljer sig åt. För att utföra rättvisande energianalyser av biodrivmedel krävs mycket kunskap, men lika mycket kunskap krävs för att tolka, värdera och använda resultaten på ett objektiva sätt. Det finns med andra ord ett behov att bringa klarhet i varför resultaten från olika studier över biodrivmedels energibalans skiljer sig åt, samt vilka slutsatser som kan dras utifrån detta.

2. Syfte

Målsättningen med denna studie är att sammanställa svenska och internationella energisystemstudier av biomassebaserad etanol som drivmedel samt beskriva hur resultaten skiljer. Dessutom analyseras vilken betydelse antaganden som val av råvara, systemgränser, allokeringar mm har på resultaten. En översiktlig beskrivning av alternativa analysmetoder som exergi- och energianalys ges också. Resultaten från denna studie förväntas bli ett viktigt bidrag för att få en mer nyanserad och objektiv debatt kring bioetanolens energibalans.

3. Metod

Datansamling baseras på litteraturstudier av såväl svenska som internationella publikationer. Analys av olika faktorerens betydelse (systemgränser, allokering mm) sker utifrån ett antal specifika fallstudier som exempel.

4. Energibalans – en beskrivning

Med energibalans menas här kvoten mellan drivmedlets energiinnehåll och den hjälpenergi som förbrukats under framställningen av drivmedlet. Hela bränslekedjan inkluderas, från odling av biomassa till framställning av etanol motsvarande drivmedelskvalitet. Förutom direkta energiinsatser, t ex i form av diesel vid odling och transporter, inkluderas också indirekta energiinsatser som t ex framställning av gödselmedel som används vid odling. Energiinsatser avser normalt primärenergi, d v s inklusive den energi som förbrukats vid framställningen och distribution av respektive energibärare. Om energibalansen för bioetanol är över 1 betyder detta att energiutbytet i form av etanol är större än den hjälpenergi som gått åt för att producera etanolen. Om däremot energibalansen är under 1 har mer hjälpenergi förbrukats än vad som återfinns i etanolen.

5 Resultat från svenska studier

I Tabell 1 och Figur 1 redovisas en sammanställning av resultat från olika svenska studier där energibalansen för olika produktionssystem för bioetanol beräknats. Förutom spannmål som råvara ingår här även lignocellulosa, dvs vedartad biomassa, samt vin som importeras från södra Europa.

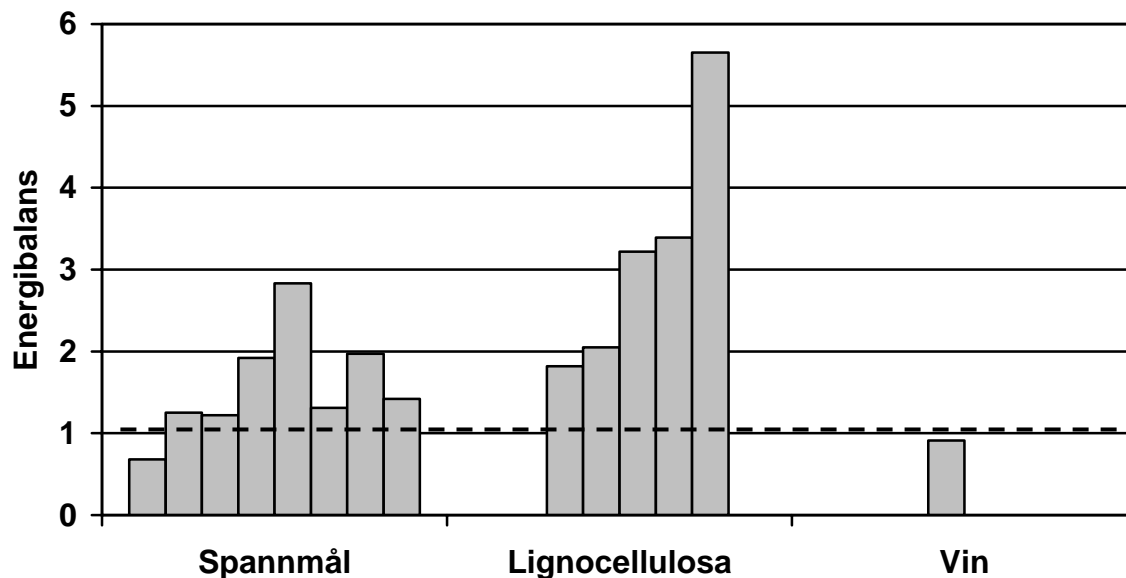
Tabell 1. Sammanställning av energibalans för bioetanol baserat på svenska studier.

Råvara	Energibalans	Referens
Spannmål	0,68	Ecotraffic (1992)
	1,25	Sonesson (1993)
	1,22	Almemark et al. (1996)
	1,92	Almemark et al. (1996)
	2,83	Bernesson et al. (2004)
	1,31	Börjesson (2004)
	1,97	Börjesson (2004)
	1,42	Agroetanol (2005)
Vin	0,91	Ericson & Odéhn (1999)
Lignocellulosa	1,82	Sonesson (1993)
	2,05	Blinge et al. (1997)
	3,22	Blinge et al. (1997)
	3,39	Blinge et al. (1997)
	5,65	Blinge et al. (1997)

Som framgår av Tabell 1 och Figur 1 varierar den beräknade energibalansen för bioetanol stort, dels mellan olika studier, dels mellan olika råvaror. Bioetanol från lignocellulosa beräknas generellt ha högre energibalans än bioetanol från spannmål. Den högsta energibalansen för lignocellulosabaserad etanol (5,65) avser framställning från sulfitlut som är en biprodukt vid framställning av pappersmassa. Övriga studier avser framställning från energiskog (salix) eller hyggesrester.

Energibalansen för vinbaserad etanol avser framställning från överskottsvin från Sydeuropa där energiinsatser för själva vinodlingen är exkluderad då överskottsvinet betraktas som ett "avfall". När också vinodlingen inkluderas blir energibalansen ännu lägre.

Energibalansen för spannmålsbaserad etanol beräknas ofta ligga mellan 1,2 och 2. Den högsta energibalansen som redovisats är 2,8. Två viktiga orsaker till dessa skillnader i energibalans är olika antaganden för systemgränser samt hur allokering sker mellan etanol och biprodukter (drank). Detta diskuteras mer ingående i avsnitt 7.



Figur 1. Sammanfattning av energibalans för bioetanol från olika biomasseråvaror publicerade i olika svenska studier (se Tabell 1).

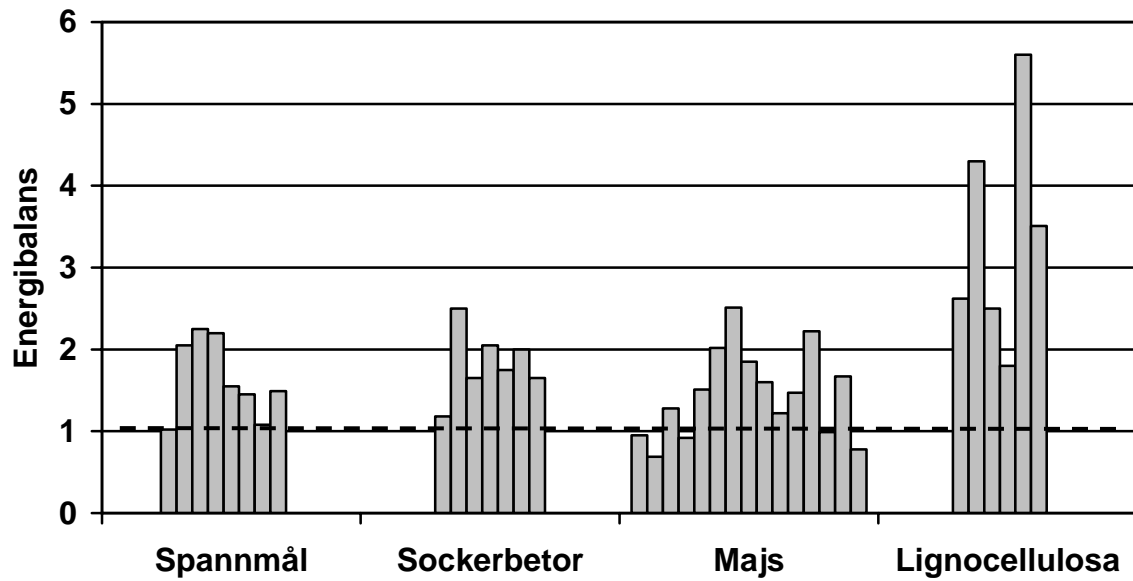
6 Resultat från internationella studier

I Tabell 2 och Figur 2 redovisas en sammanställning av resultat från olika internationella studier där energibalansen för olika produktionssystem för bioetanol beräknats. Förutom spannmål ingår även sockerbeter, majs och lignocellulosa, d v s vedartad biomassa som råvara.

Som framgår av Tabell 2 och Figur 2 finns ett stort antal internationella studier där energibalansen för bioetanol beräknats. Oftast varierar energibalansen mellan 1 och 2 för etanol framställt av spannmål, sockerbeter och majs. I vissa studier beräknas energibalansen överstiga 2 och för majsbaserad etanol också understiga 1. Energibalansen för etanol från sockerbeter synes vara något högre än för etanol från spannmål och majs. Likt resultaten från de svenska studierna beräknas energibalansen från lignocellulosabaserad etanol ligga högre, ofta mellan 2 och 4. Här utgörs råvaran oftast av energiskog i form av poppel och salix.

Tabell 2. Sammanställning av energibalans för bioetanol baserat på internationella studier.

Råvara	Energibalans	Referens	
Spannmål	1,02	Gover et al. (1996)	
	2,05	Ecobilan (2002)	
	2,25	Woods & Bauen (2003)	
	2,20	Elsayed et al. (2003)	
	1,55	EUCAR/CONCAWE (2003)	
	1,45	S&T Consultants (2003)	
	1,08	LASEN (2004)	
	1,49	Lechón et al. (2005)	
	Sockerbetor	1,18	Ecobilan (1996)
		2,50	LASEN (2000)
1,65		L-B-Systemtechnik (2002)	
2,05		Ecobilan (2002)	
1,75		Woods & Bauen (2003)	
2,00		Elsayed et al. (2003)	
1,65		EUCAR/CONCAWE (2003)	
Majs		0,95	Ho (1989)
	0,69	Pimentel (1991)	
	1,28	Marland & Turhollow (1990)	
	0,92	Keeney & DeLuca (1992)	
	1,51	Morris & Ahmed (1992)	
	1,21-2,02	Shapouri et al. (1995)	
	1,38-2,51	Lorentz & Morris (1995)	
	1,42-1,85	Wang et al. (1999)	
	1,60	Levelton Engineering (2000)	
	1,22	Graboski (2002)	
	1,31-1,47	Andres (2002)	
	1,30-2,22	Shapouri et al. (2002)	
	0,99	Patzek (2003)	
	1,67	Shapouri et al. (2004)	
	0,78	Pimentel & Patzek (2005)	
	Lignocellulosa	2,62	Lorentz & Morris (1995)
		4,30	L-B-Systemtechnik (2002)
1,88-2,50		LASEN (2002)	
1,80		Woods & Bauen (2003)	
5,60		Elsayed et al. (2003)	
3,51		EUCAR/CONCAWE (2003)	



Figur 2. Sammanfattning av energibalans för bioetanol från olika biomassråvaror publicerade i olika internationella studier (se Tabell 2).

Som redan nämnts finns det många orsaker till varför energibalansen för bioetanol skiljer mellan olika råvaror och studier. I Tabell 3 sammanställs ett antal källor till dessa skillnader baserat på Gnansounou & Dauriat (2005) som analyserat orsaker till skillnader i internationella energibalansstudier.

Tabell 3. Orsaker till skillnader mellan olika studiers resultat av energibalansen för bioetanol.

Källor	Exempel
Geografisk lokalisering	Klimat
	Tillgängliga råvaror (grödor)
Odlingspraktik	Mekanisering
	Typ av gödsling
Skördeutbyte	Grödor
	Etanol
Råvarans kvalitet	Socket / stärkelse / lignocellulosa
	Biprodukt / energigröda
Transport av råvaror	Avstånd
	Transportslag
Etanolanläggning	Skalstorlek
	Teknikstatus
	Användning av biprodukter (drank)
Energisystemets struktur	Elproduktion
	Övriga energibärare
Datakvalitet	Ålder
	Tillförlitlighet
Systemgränsdragning	Omfattning
	Inkludering av biprodukter
Allokering	Metod
	Värdering av biprodukter

7 Analys av betydande faktorer

En faktor som har stor betydelse för energibalansen för bioetanol är huruvida biprodukterna inkluderas eller ej. Om systemgränserna sätts så att energiinsatsen för hantering och förädling av dranken tas med och belastar etanolproduktionen utan att värdet av dranken inkluderas, fås en lägre energibalans än när värdet av dranken inkluderas. Dessutom påverkar hanteringen av halm energibalansen, beroende på om denna hantering inkluderas eller ej. Ett exempel som illustrerar detta redovisas i Tabell 4, vilket baseras på en studie av Börjesson (2004) där spannmål för kombinerad etanol- och biogasproduktion analyseras. En slutsats från Tabell 4 är att energibalansen kan variera mellan 1,2 och 2,1 beroende på hur systemgränserna sätts avseende de restprodukter som fås vid spannmålsbaserad etanolproduktion.

Tabell 4. Energibalans för spannmålsbaserad bioetanol beroende av antagna systemgränser.^a

Systemgränsdragning	Energiinsats (GJ/ton)	Energiutbyte (GJ/ton)	Energibalans
* Inklusive torkning av drank till foder men exklusive "värdet" av fodret	7,06	8,6	1,22
* Inklusive torkning av drank till foder samt "värdet" av fodret (30% av energiinsatsen vid odling av vete allokeras till fodret) ^b	6,57	8,6	1,31
* Inklusive fermentering av drank till biogas och energiutbytet i form av biogas	6,0	11,8	1,97
* Inklusive fermentering av drank och halm till biogas samt energiutbytet i form av biogas	8,59	17,6	2,05

^a Baserat på Börjesson (2004).

^b Allokering enligt Agroetanol (2003).

Energiinsatsens storlek vid etanolproduktion beror bl a på om beräkningarna baseras på primärenergi eller ej. Energiinsatsen som redovisas i Tabell 4 baseras t ex på antagandet att all el som används är naturgasbaserad där 1 MJ el motsvarar 2,2 MJ primärenergi (inklusive omvandlings och distributionsförluster). Av den totala energiinsatsen om 7,06 MJ per ton vete utgör 1,8 GJ odling, 0,06 GJ transporter samt 5,2 GJ etanolproduktion. Av de 5,2 GJ vid etanolproduktion utgör 0,9 GJ el omräknat till primärenergi. Om denna omräkning inte görs eller om t ex vattenbaserad el antas användas reduceras den totala energiinsatsen från 7,06 per ton vete till 6,57, vilket ökar energibalansen med cirka 10%.

Energiinsatsen för odling av spannmål utgör ofta cirka 25% av den totala energiinsatsen för etanolproduktion (exklusive allokering). Energiinsatsen per ton skördad spannmål kan dock variera utifrån en mängd faktorer. En viktig faktor är skördens storlek då ökad skörd normalt leder till ökad energibalans för spannmålsodling. Till exempel beräknas energibalansen för veteodling vara cirka 20% högre i Skåne än i Mälardalen (Börjesson, 1994). Energibalansen för veteodling beräknas idag variera mellan cirka 6,5 till 8 (Bernesson m fl. 2004; Börjesson 2004). En ökad energieffektivitet om 20% vid odling av vete innebär att energibalansen för spannmålsbaserad etanolproduktion ökar med cirka 5%.

En orsak till varför etanol från sockerbetor och lignocellulosa har en högre energibalans än etanol från vete är att odlingen av sockerbetor och energiskog är mer energieffektiv. Detta beror på en kombination av högre hektarskördar och för energiskog en betydligt lägre energiinsats per hektar. Energibalansen för odling av sockerbetor och energiskog beräknas vara cirka 40-60% respektive 2-4 gånger högre än för odling av spannmål (Börjesson, 1996; L-B-Systemtechnik, 2002). Energibalansen för uttag av skogsrester är ännu högre än för odling av energiskog, vilket medför en något högre energibalans för etanol baserat på skogsflis än på energiskog. I fallet med sulfitlut-baserad etanol betraktas sulfitluten som en ren biprodukt och belastas därför inte med några energiinsatser vid pappersmassa-framställningen, vilket medför en ökad energibalans jämfört med skogsflis- och energiskogsbaserad etanol (Blinge et al, 1997).

En annan anledning varför lignocellulosabaserad etanol har högre energibalans än t ex spannmålsbaserad etanol är att den totala energiverkningsgraden i etanolprocessen beräknas vara högre. Utbytet av etanol är dock lägre från lignocellulosa än från spannmål. Vid spannmålsbaserad etanolproduktion uppskattas 50-60% av vetets energiinnehåll omvandlas till etanol (Agroetanol, 2005; Börjesson, 2004; Lechón m fl, 2005) medan motsvarande omvandlingsgrad för lignocellulosa-baserad etanol beräknas till 30-40% (Zacchi, 2005; L-B-Systemtechnik, 2002; Blinge et al, 1997). Vid lignocellulosa-baserad etanolproduktion fås dock mer energirika biprodukter som lignin vilka inkluderas energibalansberäkningarna. Detta ger en högre totalverkningsgrad för lignocellulosa-baserad etanolproduktion (L-B-Systemtechnik, 2002; Blinge et al, 1997).

Beräkningar av Bernesson m fl. (2004) visar en energibalans för spannmålsbaserad etanol kring 2,8, vilket är den högsta rapporterade energibalansen för både svenska och internationella studier (se Tabell 1 och 2). Dessa beräkningar baseras bl a på en allokering av den totala energiinsatsen mellan etanol och drank utifrån deras respektive energiinnehåll, s.k. fysikalisk allokering. Energiinnehållet i etanol respektive drank från ett ton vete uppskattas till 61 respektive 39%. Detta innebär att endast 61% av den totala energiinsatsen vid etanolproduktion allokeras till etanolen. Om däremot energiinsatsen skulle allokeras 100% till etanolen reduceras energibalansen till 1,7 (Tabell 5). En annan allokeringmetod än fysikalisk allokering är ekonomisk allokering som utgår från det ekonomiska värdet av respektive produkt. Detta ger en lägre energibalans eftersom fördelningen mellan etanol och torkad drank som foder då blir cirka 87 respektive 13% (Bernesson m fl. 2004).

Ett alternativ till allokering mellan etanol och drank som foder är att utvidga systemgränserna så att energiinsatsen för produktion av ett alternativt proteinfoder dras ifrån den totala energiinsatsen för spannmålsbaserad etanolproduktion. Ett alternativt proteinfoder är importerad soja (mjöl och olja) som blandats för att innehålla motsvarande proteinhalt och energihalt som torkad drank (Bernesson m fl. 2004). Som framgår av Tabell 5 är energiåtgången vid produktion och transport av sojaproteinofoder relativt stor eftersom energibalansen för spannmålsbaserad etanol kraftigt förbättras när energiåtgången för detta ersättningsfoder dras ifrån energiinsatsen för etanolproduktionen.

Tabell 5. Energibalans för spannmålsbaserad etanol beroende av allokeringmetod.^a

Allokeringsmetod	Förklaring	Energibalans
Ingen allokering	All energiinsats belastar etanol	1,7
Fysikalisk allokering	Energiinsats fördelas mellan etanol och drank baserat på deras energiinnehåll	2,8
Ekonomisk allokering	Energiinsats fördelas mellan etanol och drank baserat på deras ekonomiska värde	2,3
Systemutvidgning	Energiinsats för produktion och transport av ersättningsfoder baserat på importerad soja dras ifrån den totala energiinsatsen för etanolproduktion	5,3

^a Baserat på Bernesson m fl (2004).

Betydelsen av allokeringmetod vid beräkningar av energibalansen för bioetanol beskrivs även i en studie av LASEN (2004). Energibalansen för spannmålsbaserad etanol redovisas i grundfallet till 1,08 (se Tabell 2), som baseras på ekonomisk allokering mellan etanol och biprodukter. Om däremot allokeringen baseras på energiinnehåll ökar energibalansen till 1,54. Om allokering skulle göras efter viktförhållandet mellan etanol och biprodukter skulle energibalansen bli 5,01. Även Gnansounou & Dauriat (2005) drar slutsatsen i en syntesstudie att val av allokeringmetod har mycket stor påverkan på vilken energibalans man får för bioetanol.

En annan faktor som påverkar energibalansen för bioetanol är produktionsanläggningens storlek. En analys av Bernesson m fl. (2004) visar att energiförbrukningen per producerad enhet etanol minskar ju större anläggningen är, men denna energibesparing motverkas till stor del av ökade transporter. Sammantaget minskar den totala energiinsatsen bara med ett par procent när man går från en liten till en stor etanolanläggning, vilket har en marginell påverkan på energibalansen.

8 Alternativa energianalyser – exergi och emergi

Resultaten som presenterats ovan baseras på energianalyser enligt "energy input-energy output-metoden" som utvecklades i början av 1970-talet (Johansson & Lönnroth, 1975). Denna metod är den dominerande metoden för energianalys idag vilket det stora antal studier som redovisas i denna sammanställning visar. En anledning till detta är att den är praktiskt användbar och relativt enkel att genomföra. Energianalys utgår från primärenergi och uttrycker energiinsatser och energiutbyte i energienheter, t ex Joule.

Parallellt med utvecklingen av energianalys har också två alternativa metoder utvecklats, exergi- och emergianalys. Dessa har dock inte fått samma genomslag då dessa är mer komplexa att genomföra, framför allt när det gäller emergianalys, och deras praktiska användbarhet är begränsad. I exergianalys beräknas inte bara energiförlusterna genom produktionssystemet utan också förluster av energikvalitet. Exergi definieras som "användbar energi", eller den del av energin som kan användas för att utföra ett arbete (Nilsson, 1997). Exempel på energi med högt exergivärde (hög kvalitet) är el medan värme har ett relativt lågt exergivärde. Vid exergianalys beräknas först ingående energiflöden till systemet varefter dessa multipliceras med "energikvalitetsfaktorer" för att få fram

exergiflödet. Vid jämförelser av olika bioenergisystems energieffektivitet tillför exergianalys relativt begränsad "merinformation" jämfört med energianalysmetoden. Anledningen är att energikvalitetsförlusterna är liknande för biobränsleproduktionssystem eftersom sammansättningen av den hjälpenergi i form av fossila bränslen, el mm som används är snarlika.

Emergiansanalys är en betydligt mer omfattande och tidskrävande analys än exergiansanalys. Emergi definieras som den ackumulerade mängd resurser som krävs för att producera en vara, tjänst eller ett bränsle. Den ackumulerade mängden resurser uttrycks vanligen som solekvivalenter, eller solemergijoule (sej). Emergi kan beskrivas som "energiminne", d v s minnet av den sammanlagda tillgängliga energi som använts för att frambringa produkten (Lagerberg, 2000). Emergiansanalys inkluderar dels direkta insatser från naturen, t ex sol, vind och regn, dels insatser från den mänskliga ekonomi, t ex material, bränslen och mänskligt arbete. I emergiansanalys ingår den monetära ekonomin som ett subsystem till det övergripande ekosystemet. Emergiansanalys är således betydligt mer komplex än exergiansanalys, då förutom förlorad energikvalitet också ackumulerad förbrukning av resurser beräknas för varje processteg.

I emergiansanalys är alla system organiserade som vävar där strukturernas komplexitet ökar med varje energiomvandling. Högre komplexitet innebär högre transformationsnivå. Emergivärdet för en produkt beräknas genom att dess innehåll av tillgänglig energi multipliceras med dess transformitet. Transformiteter för olika insatsvaror och tjänster, t ex sol, regn, bränslen, material, mänskligt arbete osv, finns oftast tillgängliga i olika emergiansanalyser (Lagerberg, 2000). Samma produkt, t ex etanol, kan ha olika transformiteter som beror på olikheter i de processer som leder fram till produkten. Resultaten av emergiansanalys kan presenteras i olika kvoter som utgör underlag för utvärdering av de undersökta processerna:

- a) Emergi-insatskvoten, som är kvoten mellan insatserna från det ekonomiska systemet och insatserna från naturen. Kvoten mäter resurseffektivitet samt vissa aspekter av miljöbelastning.
- b) Emergi-avkastningskvoten, som är kvoten mellan utgående emergi och det ekonomiska systemets emergi-insats. Kvoten är ett mått på det ekonomiska systemets "vinst".
- c) Miljöbelastningskvoten, som är kvoten mellan insatsen från det ekonomiska systemet och de icke-förnyelsebara insatserna från naturen ställda mot de förnyelsebara insatserna från naturen.
- d) Uthållighetsindex, som beräknas genom att dividera emergi-avkastningskvoten med miljöbelastningskvoten. Detta index ger ett sammanvägt mått på ekonomisk och ekologisk balans.

Emergiansanalyser av t ex spannmålsbaserad etanol visar via emergi-avkastningskvoten att etanol inte levererar något nettoenergi bidrag till ekonomin utan att resursinsatsen är cirka tio gånger högre än vad spannmålen ger tillbaka i form av etanol (Rydberg och Haden, 2005). Detta beror på att resursanvändningen över kedjan spannmålsjäsning-etanol ökar hela tiden vilket resulterar i att energiinnehållet i etanolen långt underskrider summan av energiinnehållet i spannmålen samt i alla de direkta insatser från naturen och från den mänskliga ekonomin som utnyttjats.

Denna skillnad i resultat jämfört med traditionell energianalys där spannmålsetanol har en positiv energibalans beror således på att "all" resursförbrukning genom hela produktionskedjan tas med vid emergianalys och inte bara den hjälpen energi som inkluderas vid energianalys. Som framgår av beskrivningen ovan inkluderas även insatser i form av sol, regn, vind, mänskligt arbete mm i emergianalys vilket inte inkluderas i energianalys. En studie av Nilsson (1997) visar t ex att energibalansen för halm till färdig värme (varmvatten) är 12, att exergieffektiviteten endast är 15%, samt att energi-avkastningskvoten är 1,1, vilket indikerar att en stor mängd energi har förbrukats historiskt för att framställa halmbränslet.

Emergianalys har intentionen att vara ett "allomfattande" beslutsunderlag för företag, industri och samhälle, som vägvisare för att nå en "hållbar" utveckling ur resurssynpunkt. Hittills har den dock mest använts inom den akademiska världen och enligt Moberg m fl (2000) är risken stor att den kommer att stanna där då emergibegreppet kan kännas svårhanterligt. Nilsson (1997) gör samma bedömning att emergianalysens praktiska användbarhet är begränsad och att dess styrka framför allt ligger i beskrivningar av ekonomiska-ekologiska interaktioner och klargörande av systemstrukturer. Dessutom har emergianalys som metod ett antal begränsningar som gör att metoden i sig kan ifrågasättas. Metoden medför långtgående aggregering av data och information. Dessutom görs en mängd olika antaganden som baseras på olika typer av kriterier vilket tillsammans gör analysernas resultat svåra att utvärdera.

En viktig aspekt vid systemanalys är att analyserna ska vara transparenta och inte ha för långtgående aggregering, så att all information är synlig för användaren som därigenom kan kritiskt granska analysens kvalitet och relevans. Denna utveckling säkras t ex för livscykelanalys via standardisering enligt ISO 14040-43. Emergianalys har svårt att uppfylla dessa krav. En annan aspekt som gör emergianalys diskutabel är att de transformiteter som används inte alltid baseras på naturvetenskapliga grunder. Ett exempel är att emergin av arbetskraft bedöms genom att omvandla löner till energi (Moberg m fl, 2000). Emergianalys har således delvis förlorat sin betydelse i och med utvecklingen av livscykelanalys då resurs- och miljöaspekter för olika produkter och tjänster beskrivs här. Man kan säga att de ursprungliga intentionerna med emergianalys idag till stor del tillgodoses med en kombinerad användning av betydligt mer praktiskt anpassade verktyg som energianalys och livscykelanalys, tillsammans med ekonomiska analyser som t ex cost-benefit-analyser.

En sammanfattning av Nilsson (1997) är att energi-, exergi- och emergianalys svarar på olika frågeställningar och innebörden av "energikvalitet" definieras olika. Det är därför ganska meningslöst att jämföra deras resultat med varandra då dessa måste tolkas var för sig.

9 Slutsatser och diskussion

Resultaten från svenska och internationella studier över bioetanolens energibalans är relativt samstämmiga. Ett genomsnittligt värde av energibalansen för spannmålsbaserad etanol är 1,6 för såväl de svenska som de internationella studier som redovisas här. Spridningen är dock något större bland de svenska studierna (0,7-2,8), jämfört med de internationella (1,0-2,3). Den genomsnittliga energibalansen för etanol från sockerbetor och majs är 1,8 respektive 1,4, baserat på de internationella studierna. Energibalansen för lignocellulosabaserad etanol är i genomsnitt 3,2 för såväl de svenska som de internationella studierna. Dessutom är spridningen samma (1,8-5,6).

Spridningen i rapporterade energibalanser för bioetanol är således stor, även när en och samma råvara används. Det finns en mängd olika faktorer till detta, dels de som beror på skillnader i faktiska lokala förutsättningar, dels de som beror på skillnader i beräkningsmetod. Det är oftast den senare typen av skillnader som ger upphov till den största spridningen i resultat. Två av de mest betydelsefulla faktorerna är här systemgränsdragning och val av allokeringmetod. Beroende av hur dessa definieras kan energibalansen för spannmålsbaserad etanol variera mellan cirka 1 till 5. Detta innebär i sin tur att rättvisande jämförelser endast kan göras när de bakomliggande metodantaganden är lika, vilket de sällan är i olika studier.

Hur kan man då hantera denna problematik? Eftersom olika systemgränsdragningar respektive allokeringmetoder kan vara motiverade utifrån gällande specifika och geografiska förutsättningar för en studie, är det svårt att definiera ett enhetligt tillvägagångssätt som alltid bör gälla. Däremot bör man i energibalansstudier presentera flera "energibalansvärden", som baseras på olika gränsdragningar och allokeringmetoder, jämfört med det grundalternativet man valt. På detta sätt kan läsaren 1) få en uppfattning om hur känsligt resultatet är utifrån ändrade förutsättningar, 2) välja det eller de värden som är mest relevanta ur läsarens perspektiv, samt 3) göra mer rättvisa jämförelser med andra studier genom att de energibalansvärden som baseras på liknande metodförutsättningar jämförs.

Förutom att resultat av bioetanolens energibalans från olika energianalyser förekommer i debatten, förekommer också resultat av bioetanolens energi- och resurseffektivitet baserade på exergi- och emergianalyser. Detta kan upplevas som förvirrande då resultaten från dessa olika typer av studier ofta leder till helt olika slutsatser och rekommendationer. Dessa olika metoder svarar dock på olika frågor och har olika utgångspunkt. Det är därför inte meningsfullt att jämföra resultaten från dessa olika analysmetoder.

Livscykelanalys är en utveckling av energianalys där förutom energiflöden också materialflöden och utsläpp till luft, vatten och mark inkluderas. Utsläppen grupperas sedan i miljöeffektkategorier som bidrag till växthuseffekt, försurning, övergödning, bildandet av marknära ozon osv. Resultat av livscykelanalys av bioetanol visar oftast snarlika resultat, när samma råvara används. I vissa fall kan dock relativt stora skillnader uppstå, t ex avseende utsläpp av växthusgaser när olika bränslen används vid etanolframställningen (biobränslen eller fossila bränslen),

eller när emissioner av t ex lustgas (N_2O) från gödselmedelstillverkning och från åkermark inkluderas eller ej. Ett exempel som visar detta är att utsläppen av växthusgaser från spannmålsetanol beräknas av Agroetanol (2005) motsvara cirka 13% av bränslecykelutsläppen från bensin. Bernesson et al. (2004), å sin sida, beräknar motsvarande utsläpp till nästan 40%. En viktig anledning till denna stora skillnad är att Agroetanol (2005) endast inkluderar koldioxid i beräkningarna medan Bernesson et al. (2004) dessutom inkluderar andra växthusgaser som lustgas. Eftersom lustgas är en drygt 300 gånger mer aggressiv växthusgas än koldioxid får dessa utsläpp mycket stort genomslag i livscykelanalyser av t ex åkerbränslen som odlats med en relativt stor insats av kvävegödselmedel.

När olika råvaror används vid produktion av bioetanol kan skillnader i bränslecykelemissioner uppstå som till stor del beror på skillnader i utsläpp vid odling. Förutom skillnader i utsläpp av lustgas kan också skillnader i t ex kväveläckage få relativt stor genomslag i livscykelanalyserna, i detta fall avseende övergödning och försurning. Dessa skillnader kan också bero på olika lokala förutsättningar som jordart, nederbörd osv. Livscykelanalys är således, likt energianalys, behäftad med osäkerhet som dels beror på skillnader i faktiska lokala förutsättningar, dels på metodologiska skillnader som systemgränsdragning, allokeringsmetoder osv. Det krävs med andra ord också för livscykelanalys mycket kunskap för att utföra rättvisande analyser av t ex biodrivmedel, men lika mycket kunskap krävs för att tolka, värdera och använda resultaten från dessa studier på ett objektivt sätt.

Avslutningsvis kan man ställa sig frågan hur energibalansen för bioetanol kan förbättras i framtiden genom olika praktiska åtgärder? Som diskuterats i kapitel 7 står själva etanolframställningen för den dominerande energiinsatsen, cirka tre fjärdedelar, medan odlingen av spannmål står för cirka en fjärdedel. Energiåtgången för transporter är relativt liten (Börjesson, 2004). Mer effektiv odling av spannmål, d v s lägre energiinsats per hektar samt ökade hektarskördar, ger således en viss förbättring av bioetanolens energibalans. Men en effektivare odling med lägre förluster av t ex kväve (nitrat, lustgas mm) får sannolikt en mycket större positiv effekt på bränslecykelemissionerna.

Ett sätt att förbättra energieffektiviteten i etanolframställningen är att röta dranken till biogas i stället för att torka denna till djurfoder (se kapitel 7). Torkning av drank till djurfoder utgör nästan 40% av den totala energiförbrukningen vid etanolframställning idag, d v s här finns en mycket stor effektiviseringspotential (Börjesson, 2004). Drank innehåller cirka 7% torrs substans och 93% vatten vilket gör den mycket lämplig för rötning i konventionella röttningsreaktorer baserat på pumpning. Däremot är drank inte lämpligt för förbränning. Den energiåtgång som krävs för att driva röttningsprocessen av drank utgör endast cirka 10-15% av den energiåtgång som krävs för att torka dranken. Genom en kombinerad jäsning av spannmål och rötning av drank ökar också energiutbytet med 35-40%, jämfört med enbart jäsning till etanol. Detta innebär att i det närmaste 75% av spannmålens energiinnehåll omvandlas till biodrivmedel, jämfört med cirka 55% när enbart etanol produceras.

En utveckling av olika energikombinatlösningar med hög totalverkningsgrad är således en effektiv strategi för att nå högre energibalans för bioetanol. Detta kan också innefatta samlokalisering med industrier med värmeöverskott där spillvärme utnyttjas i etanolprocessen. En annan möjlighet är samlokalisering med biobränslebaserade fjärrvärmeverk som också producerar el (s k kraftvärmeverk) som vill öka sin värmesänka och bättre fördela denna över året för att maximera sin elproduktion. Här spelar dagens elcertifikat en viktig roll som ekonomisk drivkraft för ökad produktion av biobränslebaserad el. Om etanolframställning baseras på i stort sett enbart biobränslebaserad värme och el leder detta också till förbättrade bränslecykelemissioner för bioetanol.

En ny typ av energikombinatlösning skulle också kunna skräddarsys för att maximera utbytet av högkvalitativa energibärare från en kombination av olika åkerbränslen. Ett exempel är en kombination av kraftvärmeproduktion baserad på en bränslemix av högavkastande energiskog (salix) och halm och etanol-biogasproduktion baserat på spannmål. Värmeproduktionen från de mer läggkvalitativa och billigare bränslena salix och halm utnyttjas här enbart för att driva etanol- och biogasprocesserna och dimensioneras därefter. Samtidigt genereras el som användas internt till processerna men där överskottet säljs externt. På detta sätt förädlas spannmål och salix till tre högkvalitativa energibärare: etanol, biogas och el, med en mycket hög totalverkningsgrad. Utifrån dagens ekonomiska förutsättningar, inklusive olika politiska styrmedel inom jordbruks- och energipolitiken, bör denna energikombinatlösning också kunna bli attraktiv ur ekonomisk synpunkt, men här krävs fördjupade analyser. Ur jordbruksnäringens perspektiv bör denna lösning vara tilltalande då involverade jordbruksföretag kontrollerar hela förädlingskedjan, från råvaruproduktion av olika energigrödor till försäljning av tre efterfrågade och högkvalitativa energibärare.

10 Referenser

Agroetanol (2005). Etanol ur energisynpunkt? www.Agroetanol.se (december 2005).

Almemark M. & Lindfors L-G (1996). LCA-analys av spannmålsbaserad produktion av etanol för bussdrift i jämförelse med dieseldrift. Institutet för vatten- och luftvårdsforskning (IVL), Stockholm.

Andres D. (2002). Ethanol energy balances. David Andres & Associates, Inc.

Bernesson S. et al. (2004). A limited LCA comparing large- and small-scale production of ethanol for heavy engines under Swedish conditions. Submitted to Biomass and Bioenergy.

Blinge M. et al. (1997). Livscykelanalys av drivmedel. KFB-Meddelande 1997:5, Kommunikationsforskningsberedningen, Stockholm.

Börjesson P. (1994). Energianalys av biobränsleproduktion i svenskt jord- och skogsbruk. Rapport 17, Miljö- och energisystem, Lunds Universitet, Lund.

Börjesson P. (1996). Energy analysis of biomass production and transportation. Biomass and Bioenergy, Vol. 11, pp 305-318.

- Börjesson P. (2004). Energianalys av drivmedel från spannmål och vall. Rapport 54, Miljö- och energisystem, Lunds Universitet, Lund.
- Ecobilan (1996). Ecobilan de l'ETBE de betterave. Prepared for ADEME, CGB and SNPAA, France.
- Ecobilan (2002). Energy balances and GHG of motor biofuels production pathways in France. Prepared for ADEME and DIREM, by Ecobilan PWC, France.
- Ecotraffic (1992). The Life of Fuels – Motor Fuels from Source to End Use. Ecotraffic AB, Stockholm.
- Elsayed M.A. et al. (2003). Carbon and energy balances for a range of biofuel options. Prepared for the Department of Trade & Industry. Sheffield Hallam University, UK.
- EUCAR/CONCAWE (2003). Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context. EUCAR, CONCAWE & JRC of the European Commission.
- Gnansounou E. & Dauriat A. (2005). Energy balance of bioethanol: A synthesis. Paper presented at the 14th European Biomass Conference and Exhibition, 17-21 October, Paris, France.
- Gover M.P. (1996). Alternative road transport fuels- A preliminary life-cycle study for the UK. Vol. 2, Dept. of Trade and Industry, Dept. of Transport, U.K.
- Graboski M. & McClelland J. (2002). A rebuttal to “Ethanol Fuels: Energy, Economics and Environmental Impacts by David Pimentel”. In International Sugar Journal, 104: (1240), pp. 162-163.
- Ho S. P. (1989). Global warming impact of ethanol versus gasoline. Presented at the 1989 National Conference “Clean air issues and America’s motor fuel business”, Washington DC, US.
- Johansson T.B. & Lönnroth M. (1975). Energianalys – en introduktion. Energi och Samhälle, Sekretariatet för Framtidsstudier, Stockholm.
- Keeney D.R. & DeLuca T.H. (1992). Biomass as an energy source for the mid-western US. In Amer. J. Alternative Agric., Vol. 7, pp. 137-143.
- Lagerberg C. (2000). Emergiansalys – Hur gör man? Inst. för Växtvetenskap, Sveriges Lantbruksuniversitet, Alnarp (www.cul.slu.se/emergi)
- LASEN (2000). Caractérisation de filières de production de bioéthanol dans le contexte helvétique. Swiss Federal Office of Energy, Switzerland.
- LASEN (2002). Etude comparative de carburants par analyse de leur cycle de vie. Alcosuisse, Switzerland.
- LASEN (2004). Etude comparative de carburants par analyse de leur cycle de vie. Alcosuisse, Switzerland.
- L-B-Systemtechnik (2002). Well-to-wheel analysis of energy use and greenhouse gas emissions of advanced fuel/vehicle systems: A European study.
- Lechón Y. et al. (2005). Análisis del ciclo de vida de combustibles alternativas para el transporte. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, Spain.
- Levelton Engineering Ltd. (2000). Assessment of net emissions of greenhouse gases from ethanol-gasoline blends in Canada: Lignocellulosic feedstocks. Canada.
- Lorentz D. & Morris D. (1995). How much energy does it take to make a gallon of ethanol? Updated and revised. Institute for Local Self-Reliance, US.

- Marland G. & Turhollow A.F. (1990). CO₂ emissions from the production and combustion of fuel ethanol from corn. Oak Ridge National Laboratory. Report No. 3301, US.
- Moberg, Å., Finnveden, G., Johansson, J. & Steen, P (2000). Miljösystemanalytiska verktyg - en introduktion med koppling till beslutssituationer. AFR-Report 251, Naturvårdsverket, Stockholm.
- Morris D. & Ahmed I. (1992). How much energy does it take to make a gallon of ethanol? Updated and revised. Institute for Local Self-Reliance, US.
- Nilsson D. (1997). Energy, exergy and emergy analysis of using straw as fuel in district heating plants. Biomass and Bioenergy, Vol. 13, pp. 63-73.
- Pimentel D. (1991). Ethanol fuels: energy security, economics, and the environment. In Jour. Agri. Environ. Ethics, Vol. 4, pp. 1-13.
- Pimentel D. & Patzek T. (2005). Ethanol production using corn, switchgrass, and wood; Biodiesel production using soybean and sunflower. In Nat. Resources Res., Vol. 14, No. 1, pp. 65-76.
- Rydberg T. & Haden A. (2005). Energikvalitet och nettoenergi – hur värderar vi olika former av energi? Konferensbidrag till Ekologiskt Lantbruk Konferens, 22-23 november 2005, SLU; Uppsala.
- Shapouri H. et al. (2004). The 2001 net energy balance of corn-ethanol (preliminary). US Department of Agriculture (USDA).
- Wang et al. M. (1999). Effects of fuel ethanol use on fuel-cycle energy and greenhouse gas emissions. USDOE Argonne National laboratory, Centre for Transportation Research, Argonne, IL.
- Woods J. & Bauen A. (2003). Technology status and review and carbon abatement potential of renewable transport fuels in the UK. Center for Energy Policy and Technology, Imperial College, London, UK.
- Zacchi, G. (2005). Personlig kommunikation, Lunds Universitet, Lund.

ISSN 1102-3651
ISRN LUTFD2/TFEM--06/3050--SE + (1-17)
ISBN 91-88360-82-2