

Effektivitet og CO₂-fortrængning for syntese af flydende brændsler fra biomasse

I. De mulige synteseveje

En mere udbredt brug af biobrændsler vil kunne nedbringe transportsektorens miljøbelastning og olieafhængighed. I to artikler i Dansk Kemi sammenlignes mulige biobrændsler. Denne første del beskriver grundlaget for sammenligningen

Af Jakob Munkholt Christensen, Peter Arendt Jensen og Anker Degn Jensen, Institut for Kemiteknik, DTU

Omdannelsen af biomasse til flydende transportbrændsler oplever en stigende interesse i takt med det forøgede fokus på den menneskeskabte udledning af CO₂. Det estimeres, at det potentielle energiudbytte fra biomasse på verdensplan udgør ca. 100 EJ/år, hvilket til sammenligning er ca. 30% af verdens nu-

ligere en metode til fremstilling af transportbrændsel ud fra biomasse er en såkaldt esterificering af planteolier som f.eks. produktionen af rapsolietmethylester (RME) fra rapsolie.

I to artikler i Dansk Kemi vil vi præsentere en sammenligning af energiudnyttelsen ved fremstilling og brug af de

Tabel 1. Udbytte af forskellige afgrøder i Danmark.

Afgrøde	Tørstofudbytte [ton/(ha&år)]	Nedre brændværdi (LHV) ^a [GJ/ton]	Energiudbytte [GJ/(ha&år)]
Vinterhvede [3-8]	Kerner ^b : 7,19 Strå: 3	Kerner: 17,0 Strå: 17,3	Kerner: 122,2 Strå: 52
Vinterraps [6-10]	Frø: 3,16 ^c Strå: 3,56 ^d	Frø: 23,9 Strå: 17,3	Frø: 75,5 Strå: 61,6
Pil [8,11,12]	10-15	16,3	163-245
Poppel [4,8]	10-15	17,7	177-266
Elefantgræs[11,13]	8-15	17,9	143-269

^a Betragtelige variationer kan forekomme som følge af biomassens beskaffenhed og vandindhold.

^b Gennemsnit for DK i perioden 2001-2006 [6,7].

^c Gennemsnit for DK i perioden 2001-2006 [6,7].

^d Baseret på frøudbyttet og et forhold mellem frø og strå opgivet af Faaij [9].

Tabel 1. Udbytte af forskellige afgrøder i Danmark.

værende energiforbrug [1]. En øget brug af biobrændsler kunne være en vej til at reducere transportsektorens miljøbelastning. I den forbindelse er det interessant at huske Thomas Edisons ord om, at *“opportunity is missed by most people, because it is dressed in overalls and looks like work”*. Thomas Edison var for øvrigt sammen med folk som Henry Ford og Alexander Graham Bell i begyndelsen af det forrige århundrede ivrige fortalere for brugen af ethanol som bilbrændstof [2]. Biobrændsler er altså ikke en ny foreteelse.

En mulig rute fra biomasse til flydende brændsler er en forgasning af biomassen til såkaldt syntesegas eller syngas. Den dannede syngas kan i en bred vifte af katalytiske reaktioner omdannes til flydende transportbrændsler som f.eks. methanol, dimethylæter (DME), syntetisk diesel (såkaldt Fischer Tropsch eller FT diesel) eller blandede højere alkoholer (her forkortet HA og primært bestående af ethanol). Methanol/DME kan endvidere omdannes til syntetisk benzin. Alternativt kan biomassen via fermentering omdannes til såkaldt bioethanol. Bioethanol kan fremstilles fra kerner (1. generationsteknologi) eller fra lignocellulose som halm og strå (2. generationsteknologi). Yder-

ovennævnte flydende brændsler. Målsætningen er at bibringe læseren et overblik over de aktuelle muligheder ved de forskellige teknologier. I denne første del præsenteres grundlaget for sammenligningen – dvs. typiske markudbytter, synteseeffektiviteter og brændstofegenskaber. I anden del, som kommer i næste nummer, benyttes de i denne artikel præsenterede parametre til at sammenligne den transportkapacitet og miljøaflastning, der kan opnås med de forskellige synteseløsninger.

Udbytte af afgrøder

Den første væsentlige parameter i en evaluering af effektiviteten i produktionen af biobrændsler er markudbyttet. Tabel 1 illustrerer hvilket udbytte, der kan forventes for forskellige typer af afgrøder i Danmark.

I denne analyse tages der ikke højde for energiforbruget til dyrkning, høst og transport af biomassen. Det bør dog nævnes, at dyrkningen af såkaldte energiafgrøder som pil, poppel og elefantgræs generelt er mindre energiintensiv end dyrkningen af vinterhvede og raps [11,14]. For skovbrug inden for en radius af 40 km fra forarbejdningsanlægget ligger energiforbruget til

Tabel 2. Energieffektivitet for syntese af flydende brændsler og samtidig fremstilling af el fra biomasse.

Brændsel	Energieffektivitet [%LHV] ^a	
	Brændstof	El
Bioethanol fra hvedekerner [17,18]	37-40	(-5)
Bioethanol fra lignocellulose(halm, træ etc.) [18-20]	26-52(typisk omkring 35)	0-4
Methanol [9,17,21-23]	55-58	0-12
Højere alkoholer (HA) [24] ^b	37-38	8
DME [21,25-27]	55-58	0-12
Syntetisk benzin [28,29] ^c	49	6
Fischer Tropsch diesel [30]	40	4-11
Biodiesel (RME) [10] ^d	27	17
Komprimeret brint [22]	33 ^e	19
Afbrænding i konventionelt kraftværk [31]	0	40-50 ^f

^a Energi i væskeprodukt eller elproduktion relativt til den tilførte biomasse baseret på den nedre brændværdi (LHV).

^b Værdier for syntesen fra kul. Dette kan være et lettere konservativt estimat for syntesen fra biomasse.

^c Fremstillet ud fra methanol/DME. Effektivitet estimeret for Haldor Topsøe A/S' TIGAS proces [29] med et estimat om 85% energieffektivitet for forgasningen [23]. Det samme niveau kan estimeres for Mobils Methanol-to-Gasoline proces [28].

^d Effektivitet relativt til frø+strå. Energieffektiviteten for produktion af RME fra rapsfrø er 48%_{LHV} [10], mens effektiviteten for produktionen af el fra strå er 40%_{LHV} (se evt. note f).

^e Denne værdi er beregnet ud fra Hamelinck og Faaij [22] og antages at beskrive teknologiens aktuelle niveau. Nuværende anlæg, som producerer brint fra biomasse, rapporteres at operere med en energieffektivitet på 26% [32]. Det bør dog nævnes, at visse studier estimerer højere energieffektiviteter for hydrogenproduktion.

^f Disse værdier er for kul. Samforbrænding af kul og biomasse medfører et mindre effektivitetstab, og hvis dette tab udelukkende tilskrives biomassen, er dens energieffektivitet 0-10% mindre [33]. I de videre beregninger er der benyttet en energieffektivitet på 40%_{LHV} for biomasse og en værdi på 45%_{LHV} for kul.

Tabel 2. Energieffektivitet for syntese af flydende brændsler og samtidig fremstilling af el fra biomasse.

produktion og transport på 2-4% af biomassens energiindhold [15,16]. Nedbrydning af biomassen under eventuel lagring er heller ikke inkluderet i denne analyse.

Effektivitet for brændselssyntese

Biomassen kan som nævnt omdannes til transportbrændsler ad flere ruter. For de fleste af synteserne er der endvidere mulighed for en biproduktion af el. Tabel 2 viser energieffektiviteten for syntesen af diverse flydende brændsler fra biomasse. Tabellen viser den samlede energieffektivitet for omdannelsen af biomassen til transportbrændslet (f.eks. forgasning + syntese). Elproduktion kan eksempelvis ske gennem forbrænding af biproduktet fra brændselssyntesen.

Energieffektiviteter fundet i de systemstudier, der er opsummeret i tabel 2, udviser generelt en stor spredning – især mht. bioethanol fra lignocellulose. I efterfølgende beregninger er der benyttet middelværdier for intervallerne opgivet i tabel 2.

En undtagelse er ethanol fremstillet fra lignocellulose, hvor en typisk rapporteret værdi på 35%_{LHV} er benyttet. Bortset fra produktionen af biodiesel fra raps, hvor kun frøene udnyttes, er det antaget, at hele afgrøden omdannes til biobrændsel. For fremstillingen af bioethanol fra hvede er det f.eks. antaget, at der benyttes 1. generationsteknologi til at fremstille ethanol fra kernerne og 2. generationsteknologi til at fremstille ethanol fra stråudbyttet. Elproduktion antages at ske ved samforbrænding med kul i et konventionelt kraftværk.

For syntesen af højere alkoholer fra syngas har det kun været muligt at finde et realistisk estimat af energieffektiviteten for syntese ud fra kul, som dog antages at afspejle niveauet for biomasse. Den primære begrænsning for udnyttelsen af denne syntese er katalysatorens forholdsvis lave selektivitet. I et nyere systemstudie fra US National Renewable Energy Laboratory benyttes forventede forbedringer i katalysatorens produktivitet og selektivitet, og her anslås energieffektiviteten for alkohol-

Tabel 3. Sammenligning af effektiviteten for udnyttelsen af konventionelle og alternative drivmidler i biler.

Olieafledt benzin og alternativerne	Relativ effektivitet
Alm. benzin/Syntetisk benzin	100%
Methanol/Ethanol/Brint [36-38]	110%
Elbil [39,40]	400%
Brint i brændselscellebil [17,39]	200%
Olieafledt diesel og alternativerne	Relativ effektivitet
Alm. diesel/DME/FT diesel/RME [25,39,41]	100%

Tabel 3. Sammenligning af effektiviteten for udnyttelsen af konventionelle og alternative drivmidler i biler.

produktion fra biomasse til 55%_{LHV}. Dette afspejler dog ikke processens aktuelle niveau [34].

Brændstoføkonomi for danske biler

Den sidste fase af biobrændslets livscyklus er udnyttelsen som drivmiddel i transportsektoren. I dette studium fokuseres der på udnyttelse i forbrændingsmotorer, men mere "futuristiske" teknologier som elbiler og brintdrevne brændselsceller er også behandlet. Nye benzindrevne biler købt i Danmark i 2006 kører i gennemsnit 14,8 km/L, mens nye dieseldrevne biler i gennemsnit kører 18,6 km/L [35]. Flere af de alternative drivmidler giver en højere effektivitet i udnyttelsen af energien, hvilket bør indgå i analysen. Tabel 3 opsummerer de relative energieffektiviteter for de undersøgte teknologier.

Alkoholer, DME og især komprimeret brint har lavere energitætheder end benzin og diesel, hvilket kræver en større brændstoftank for at tilbagelægge samme distance. En begrænset batterikapacitet for elbiler er årsag til, at disse køretøjer typisk har en mindre aktionsradius end almindelige biler. Disse effekter er ikke inkluderet i analyserne. Man må forvente en større usikkerhed på de opgivne effektiviteter for de mere "futuristiske" teknologier.

Konklusion

Et typisk dansk markudbytte ligger på 150-250 GJ/(ha&år). Den høstede biomasse kan omdannes til biobrændsel i en bred vifte af brændselssynteser som f.eks. esterificering af planteolie, fermentering til ethanol eller forgasning til syntesegas med efterfølgende katalytisk omdannelse af syntesegassen. Hidtil har det overvejende fokus været på bioethanol og biodiesel, idet disse brændsler i nogen grad umiddelbart kan blandes i olieafledt benzin eller diesel. Visse brændsler (højere alkoholer samt syntetisk benzin og diesel) produceret via forgasning af biomassen har også denne fordel og kan ydermere give højere energieffektiviteter end bioethanol/biodiesel. Endnu højere energieffektivitet kan opnås i syntesen af methanol eller DME, men disse drivmidler kræver modificerede køretøjer. Endelig synes elbiler at have et betragteligt potentiale. Den anden del af denne artikelserie sammenligner den transportdistance, der kan tilbagelægges med biobrændsel udvundet fra et markudbytte med forskellige kombinationer af afgrøder og synteseveje.

E-mail-adresse:

Anker Jensen, aj@kt.dtu.dk

Referencer

- [1] Parikka, M. (2004) Global biomass fuel resources, *Biomass Bioenergy*, 27, 613.
- [2] Kovarik, B. (1998) Henry Ford, Charles Kettering and the "fuel of the future", *Automot. Hist. Rev.*, 32, 7.
- [3] Personlig kommunikation med Poul Olesen, LandboNord planterådgivning. Forår 2008.
- [4] Dornburg, V., Termeer, G., Faaij, A. P. C. (2005) Economic and greenhouse gas emission analysis of bioenergy production using multi-product crops-case studies for the Netherlands and Poland, *Biomass Bioenergy*, 28, 454.
- [5] Jørgensen, J. R., Deleuran, L. C., Wollenweber B. (2007) Prospects of whole grain crops of wheat, rye and triticale under different fertilizer regimes for energy production, *Biomass Bioenergy*, 31, 308.
- [6] Danmarks Statistik (19/11-2003) Nyt fra Danmarks Statistik, 478.
- [7] Danmarks Statistik (17/11-2006) Nyt fra Danmarks Statistik, 495.
- [8] McKendry P. (2002) Energy production from biomass (part 1): Overview of biomass, *Biores. Technol.*, 83, 37.
- [9] Faaij, A. P. C. (2006) Bio-energy in Europe: Changing technology choices, *Energy Policy*, 34, 322.
- [10] Bernesson, S., Nielsson, D., Hansson, P.-A. (2004) A limited LCA comparing large- and small-scale production of rape methyl ester (RME) under Swedish conditions, *Biomass Bioenergy*, 26, 545.
- [11] Larsen, H., Kossmann, J., Petersen, L. S. (2003) Risø energy report 2. Kan downloades fra:

- http://www.risoe.dk/Knowledge_base/publications/Risoe_Energy_Report_series.aspx?sc_lang=da:
- [12] Dansk Landbrugsrådgivning (2007) Kalkulationer for pil. Kan downloades fra: <http://lr.dk/planteavl/informationsserier/info-planter/bioenergi-Kal-pil-helskud.xls>
- [13] Dansk Landbrugsrådgivning (2007) Elefantgræs dyrkningsvejledning. Kan ses på: <http://www.lr.dk/planteavl/informationsserier/dyrkningsvejledning/elefantgraesdv.htm>.
- [14] IEA (2004) Biofuels for transport an international perspective. Kan downloades fra: <http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2004/biofuels2004.pdf>.
- [15] Wihersaari, M. (1996) Energy consumption and greenhouse gas emissions from biomass production chains, *Energy Convers. Mgmt.*, 37, 1217.
- [16] Hamelinck, C. N., Suurs, R. A. A., Faaij, A. P. C. (2005) International bioenergy transport costs and energy balance, *Biomass Bioenergy*, 29, 114.
- [17] Hamelinck, C. N., Faaij, A. P. C. (2006) Outlook for advanced biofuels, *Energy Policy*, 34, 3268.
- [18] Towler, G. P., Oroskar, A. R., Smith, S. E. (2004) Development of a sustainable liquid fuels infrastructure based on biomass, *Env. Prog.*, 23, 334.
- [19] MacLean, H. L., Lave, L. B. (2003) Evaluating automobile fuel/propulsion system technologies, *Prog. Energy Combust. Sci.*, 29, 1.
- [20] Hamelinck, C. N., van Hooijdonk, G., Faaij, A. P. C. (2005) Ethanol from lignocellulosic biomass: Techno-economic performance in short-, middle- and long-term, *Biomass Bioenergy*, 28, 384.
- [21] Wahlund, B., Yan, J., Westermarck, M. (2004) Increasing biomass utilization in energy systems: A comparative study of CO₂ reduction and cost for different bioenergy processing options, *Biomass Bioenergy*, 26, 531.
- [22] Hamelinck, C. N., Faaij, A. P. C. (2002) Future prospects for production of methanol and hydrogen from biomass, *J. Power Sources*, 111, 1.
- [23] Williams, R. H., Larson, E. D., Katofsky R. E., Chen J. (1995) Methanol and hydrogen from biomass for transportation, *Energy Sust. Dev.*, 1, 18.
- [24] Shaeiwitz, J. A., Whiting, W. B., Turton, R. et al. (1998) The Economical Production of Alcoholic Fuels from Coal-Derived Synthesis Gas, Chapters 7-14. Kan downloades fra: www.fischer-tropsch.org/DOE/DOE_reports/91034/91034_25/91034_25_toc.htm
- [25] Elam, N. (2002) The bio-DME project phase 1 (non-confidential version). Kan downloades fra: www.atrax.se/pdf/Final_report_DME.pdf
- [26] Ahlvik, P., Brandberg, Å (2001) Well-to-wheel efficiency for alternative fuels from natural gas or biomass. Report for the Swedish National Road Administration.
- [27] Larson, E. D., Tingjin, R. (2003) Synthetic fuel production by indirect coal liquefaction, *Energy Sust. Dev.*, 7, 79.
- [28] Kam, A.Y., Schreiner, M., Yurchak, S. (1984) Mobil Methanol-to-Gasoline (MTG) Process, i: Meyers, R. A. (Ed), *Handbook of synfuels technology*, 1st ed., McGraw-Hill.
- [29] Rostrup-Nielsen, J. R., Højlund Nielsen, P. E., Joensen, F., Madsen, J. (2007) Polygeneration. Risø International Energy Conference.
- [30] Tijmensens, M. J. A., Faaij, A. P. C., Hamelinck, C. N., van Hardeveld, M. R. M. (2002) Exploration of the possibilities for production of Fischer Tropsch liquids and power via biomass gasification, *Biomass Bioenergy*, 23, 129.
- [31] Bugge, J., Kjær, S., Blum, R. (2006) High power coal fired power plants developments and perspectives, *Energy*, 31, 1437.
- [32] Olah, G. A., Goepfert, A., Prakash, G. K. S. (2006) Beyond oil and gas: The methanol economy, 1st ed., Wiley-VCH.
- [33] Baxter, L. (2005) Biomass-coal co-combustion: Opportunity for affordable renewable energy, *Fuel*, 84, 1295.
- [34] Phillips, S. D. (2007) Technoeconomic analysis of a lignocellulosic biomass indirect gasification process to make ethanol via mixed alcohol synthesis, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 46, 8887.
- [35] Danmarks Statistik (22/9-2006) Nyt fra Danmarks Statistik, 418.
- [36] Lave, L., MacLean, H., Hendrickson, C., Lankey, R. (2000) Life-cycle analysis of alternative automotive Fuel/Propulsion technologies, *Env. Sci. Technol.*, 34, 3498.
- [37] Larsen, G., Glejtrup, E. (2006) Morgendagens transportbrændsler Danske perspektiver, Kan downloades fra: http://www.tekno.dk/pdf/projekter/morgendagens-transport/p07_rapport_morgendagens-transportbraendstoffer.pdf
- [38] Personlig kommunikation med Spencer Sorenson, MEK-DTU. Forår 2008.
- [39] L-B Systemtechnik GmbH (2002) GM well-to-wheel analysis of energy use and greenhouse gas emissions of advanced Fuel/Vehicle systems – A European study. Kan downloades fra: http://www.lbst.de/publications/studies_d/2002/TheReport_Euro-WTW_27092002.pdf
- [40] Delucchi, M. A. (2003) A lifecycle emissions model (LEM): Lifecycle emissions from transportation fuels, motor vehicles, transportation modes, electricity use, heating and cooking fuels, and materials. Kan downloades fra: <http://repositories.cdlib.org/cgi/viewcontent.cgi?article=1064&context=itsda> vis
- [41] Agarwal, A. K. (2007) Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines, *Prog. Energy Combust. Sci.*, 33, 233.