

Från Värmeteknik	Rapportdatum 1991-07-05	Rapport nr
Författare Clas Ekström, Vattenfall Utveckling AB Eya Ström, Annika Bengtsson, Vattenfall Energisystem AB Åke Brandberg, Ecotraffic AB	Rapportens tillgänglighet Teknisk granskning	Projektnr US 57109 (98386)
Beställare Vattenfall US	Godkänd	
Sökord	Antal textblad	Antal bilagsblad

Rubrik:

**METANOL OCH ETANOL SOM BRÄNSLE
- ÖVERSIKTLIG STUDIE**

Sammanfattning:

Omfattande försöks- och utvecklingsprogram med metanol och etanol som drivmedel för fordon har genomförts under 70- och 80-talen. Andra användningsområden som studerats och provats är elproduktion i gasturbiner, stationära motorer och bränsleceller. Möjlighet till säsongslagring av naturgas har också diskuterats.

Föreliggande studie har genomförts i avsikt att beskriva framtida möjligheter för metanol och etanol som bränsle baserat på i första hand tidigare genomförda svenska studier, kompletterat med utländska källor.

Metanol och etanol är (högförädlade) rena bränslen bestående av enkla kemiska föreningar. De är enkla att distribuera och lagra samt ger mycket god och miljövänlig förbränning i motorer, gasturbiner och pannor.

Den billigaste alkoholen och som går att producera i stora mängder är metanol framställd ur naturgas, med ett pris som varierar med bensinpriset. Den billigaste alkoholen från biobränslen och med störst tillverkningspotential i Sverige är etanol framställd av träbränslen.

Den höga förädlingsgraden gör metanol och etanol dyrare än t ex naturgas, oljor och fasta bränslen. De kan tänkas bli konkurrenskraftiga framförallt för fordonsdrift, eftersom sådan ställer mycket höga krav på bränslets egenskaper samtidigt som miljökraven tenderar att skäppas alltmer.

Även andra småskaliga tillämpningar där miljökraven och bränskekraven är högt ställda kan bli intressanta.

22 p. 65, 66

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1. INLEDNING
2. BRÄNSLE FÖR KOLVMOTORER OCH ANDRA ENERGIOMVANDLARE
 - 2.1 Egenskaper som motordrivmedel
 - 2.2 Miljö- och hälsopåverkan
3. TILLVERKNING AV METANOL
 - 3.1 Råvaror, teknikstatus, utbyten
 - 3.1.1 Metanol ur naturgas
 - 3.1.2 Metanol ur biomassa och torv
 - 3.2 Emissioner
 - 3.2.1 Emissioner för metanoltillverkning av naturgas
 - 3.2.2 Emissioner för metanoltillverkning av biomassa
 - 3.3 Kostnader, marknadspriser
 - 3.3.1 Kostnader för metanol från naturgas
 - 3.3.2 Kostnader för metanol ur biomassa och torv
 - 3.4 Kombinationer - metanol-/el-/värmeproduktion
4. TILLVERKNING AV ETANOL
 - 4.1 Råvaror
 - 4.2 Produktionsprocesser
 - 4.2.1 Förbehandling - sockerrika råvaror
 - 4.2.2 Förbehandling och hydrolys - stärkelserika råvaror
 - 4.2.3 Förbehandling och hydrolys - lignocellulosahaltiga råvaror
 - 4.2.4 Jäsning av glykos
 - 4.2.5 Jäsning av pentoser
 - 4.2.6 Upparbetning av mäsken
 - 4.2.7 Biproduktanvändning
 - 4.2.8 Processexempel
 - 4.3 Emissioner
 - 4.4 Potential
 - 4.5 Kostnader, marknadspriser
5. DISTRIBUTION OCH LAGRING AV ALKOHOLBRÄNSLEN
6. FORDON MED ALKOHOLMOTORER
7. ELPRODUKTION - GASTURBINER
 - 7.1 Metanol som gasturbinbränsle
 - 7.1.1 Teknikstatus, verkningsgrader
 - 7.1.2 Emissioner
 - 7.1.3 Kostnader
 - 7.2 Reformerad/ångreformerad metanol som gasturbinbränsle
 - 7.2.1 Teknikstatus, verkningsgrader
 - 7.2.2 Emissioner
 - 7.2.3 Kostnader

8. ELPRODUKTION - STATIONÄRA KOLVMOTORER

- 8.1 Teknikstatus, verkningsgrader
- 8.2 Emissioner
- 8.3 Kostnader

9. ELPRODUKTION - BRÄNSLECELLER

- 9.1 Bränslecellens funktionssätt
- 9.2 Vätgasdrivna bränsleceller
- 9.3 Direkt användning av metanol i bränslecellen
- 9.4 Miljö
- 9.5 Kostnader
- 9.6 Potential

10. VÄRMEPRODUKTION

- 10.1 Övergång från olja till alkoholbränsle
- 10.2 Miljö
- 10.3 Potential

11. LAGRING AV NATURGAS SOM METANOL

- 11.1 Potential

12. RÅVARA TILL ANVÄNDNING - SAMMANSTÄLLNINGAR

- 12.1 Drivmedel för fordon
- 12.2 Elproduktion - gasturbiner
- 12.3 Elproduktion - stationära kolvmotorer
- 12.4 Elproduktion - bränsleceller
- 12.5 Värmeproduktion

**13. ALKOHOLER SOM DRIVMEDEL I FORDON
- INFÖRANDESCENARIER - STYRMEDEL****14. SLUTSATSER****BILAGOR**

- BILAGA A: DRIVMEDEL FÖR KOLVMOTORER OCH ANDRA ENERGIOMVANDLARE
- BILAGA B: FORDON MED ALKOHOLMOTORER
- BILAGA C: DISTRIBUTION AV ALKOHOLDRIVMEDEL

1. INLEDNING

Alkoholer har tillfälligt använts som drivmedel för kolvmotorer alltsedan otto-motorns tillkomst men har först under 70- och 80-talen börjat ses som ett möjligt storskaligt, alternativt drivmedel. Under denna tid genomförde flera fordonsindustrier omfattande försöks- och utvecklingsprogram med metanol och etanol som motorbränsle. Etanol används som fordonsbränsle i Brasilien och det pågår försök med etanoldrivna bussar i Stockholm och flera andra städer. Bensin med etanoltillsats används i vissa stater i USA och har även provats i Mälardalen.

Som bränsle för annat ändamål har alkoholerna småskalig användning för spritlampor och spritkök. På senare tid har också användning som pannbränsle och gasturbinbränsle studerats och provats för användning i större skala.

Orsaken till att alkoholerna, främst metanol, kommit i fokus som alternativa drivmedel är att metanol är det minst kostsamma alternativet att införa som alternativ till råoljebaserad bensin och dieselolja och att det kan ske i stor skala. Råvarubasen är större än för bensin och dieselolja. För etanol gäller att framställning varit möjlig med känd teknik ur (socker- och stärkelsehaltiga) biomassor och således erbjudit ett alternativ till fossila råvaror. För metanol har detta först på senaste tid blivit möjligt. För båda gäller emellertid att kostnaden är hög främst på grund av hög råvarukostnad i jämförelse med vad råolja normalt kostar.

Till möjligheten som alternativa drivmedel kommer deras potential att som rena (kemiskt sett enkla) föreningar bidra till att minska skadligheten av utsläpp vid hantering och användning som drivmedel. Denna aspekt har framför allt i USA blivit den andra anledningen till intresset för alternativa drivmedel med metanol volymmässigt störst. Lagstiftning om användning av alternativa drivmedel och komponenter i områden med dålig luftkvalitet ingår i den hösten 1990 reviderade Clean Air Act i USA och kan komma att ingå den nya National Energy Strategy, som nu behandlas i Kongressen.

Alkoholerna kan användas dels som komponent (direkt eller som etrar) i bensin eller dieselolja för befintliga fordon, dels som självständigt drivmedel i fordon som byggts för detta. För befintliga fordon måste inblandningen vara begränsad med hänsyn till alkoholernas lägre energiinnehåll och materialproblem. Högsta inblandning, som befunnits vara acceptabel i de flesta fall, motsvarar en syrehalt i blandningen på cirka 3,5 mass-%.

Skall större volymer drivmedel med annan råvarubas än råolja införas kommer det troligen att ske i form av drivmedel innehållande minst 85-90 vol-% alkohol (vid sidan av nischanvändning av metangas, propan och elektricitet).

Metanol framställs idag huvudsakligen ur naturgas och etanol huvudsakligen ur jordbruksgrödor. Framställning av drivmedel ur inhemska råvaror, t. ex. biomassa och jordbruksgrödor, skapar sysselsättning och ger ökad försörjningsberedskap inför eventuella krislägen/avspärningar.

Föreliggande studie avser att:

- översiktligt beskriva framtida möjligheter för metanol och etanol som bränsle
- föreslå fortsatta studier av för Vattenfall särskilt intressanta aspekter och delområden

Framställningen bygger i första hand på information som finns tillgänglig genom svenska studier, kompletterat med utländska källor.

De avsnitt som berör tillverkning av metanol, distribution och lagring av alkoholer samt fordonsdrift bygger i huvudsak på en statusrapport (utförd av dåvarande SDAB, Svensk Drivmedelsteknik AB) i ett samarbetsprojekt inom International Energy Agency (IEA 1986), och följdrapporter till denna. Även andra sammanfattande rapporter, som utarbetats för svenska myndigheter, samt rapporter från specialinriktade konferenser ingår i detta underlag. De återges som allmänna referenser.

2. BRÄNSLE FÖR KOLVMOTORER OCH ANDRA ENERGI-OMVANDLARE

Olika motorkoncept har olika krav på drivmedlets egenskaper. Motorer med intern, intermittent förbränning i ett slutet rum (kolvmotorer i olika former) ställer helt andra krav än motorer med extern brännkammare för kontinuerlig förbränning (gasturbin, Stirling-motor, ångmotor). Den tredje typen av energiomvandlare för kemiskt bunden energi, den elektrokemiska bränslecellen, har ren vätgas som idealbränsle. Gemensamt för alla är att bränslets sammansättning och renhet har avgörande betydelse för vad som släpps ut. Innehåller bränslet svavel, klor, metall- eller metallorganiska föreningar, högmolekylära föreningar, etc kommer dessa helt eller delvis också ut i någon, mestadels oönskad form. Vid sidan av vätgas består det ideala drivmedlet av enbart kol, väte och ev. syre i kemiskt enklaste form.

Alkoholerna kommer detta ideal nära. Medan de aktuella alkoholerna bara består av 1 eller 2 kolatomer (metanol resp. etanol) har de konventionella drivmedlen för fordon, bensin och dieselolja, 4-12 resp. 12-24 kolatomer per molekyl i olika konfigurationer (raka och grenade kedjor och ringar). I stora stationära motorer, fartygsmotorer och pannor användes oftast tjocka oljor med upp till 40-50 kolatomer per molekyl.

I tabell 2.1 har ett antal för drivmedel relevanta data sammanställts för metanol och etanol i jämförelse med konventionell bensin och dieselolja. De är vägledande vid hantering och för bedömning av prestanda i motorer. Sammanfattande aspekter på alkoholerna som drivmedel ges nedan. Mer utförligt underlag är sammanställt i bilaga A.

2.1 Egenskaper som motordrivmedel

Kvalitetskraven för alkholer som drivmedel är både lätta att ställa upp och att uppfylla, eftersom framställningen mycket selektivt ger metanol resp. etanol. Den viktigaste parametern att kontrollera är vattenhalten, då de är helt blandbara med vatten.

Alkoholernas största nackdel är deras lägre energiinnehåll, knappt 50 % resp. ca 65 % i jämförelse med bensin.

Metanol och etanol är båda lätthanterliga, flytande drivmedel och kan hanteras på samma sätt som bensin. De är mindre flyktiga än bensin och ger lägre förluster genom avdunstning vid distribution och användning i fordon. De är flyktigare än dieselolja och ger upphov till större förluster vid ersättning av denna.

Alkoholhantering medför mindre risker för brand och explosion vid spill i det fria i jämförelse med bensin men potentiellt större risk vid lagring i slutna tankar, vilket kräver förebyggande åtgärder. Alkoholhanteringen är dock väl etablerad teknik vid den industriella användningen inom kemisk industri.

Metanol och etanol är utmärkta drivmedel för ottomotorer genom deras goda förmåga att motstå knockning (= höga oktantal) vartill deras höga avdunstningsvärme ytterligare bidrar. Motorerna kan ges hög kompression (12-14:1) och får därigenom högre verkningsgrad än med bensin och högre effekt kan tas ut. Genom alkoholernas relativt låga flyktighet måste särskilda åtgärder vidtas för att underlätta kallstart vid låga temperaturer. Det finns ett flertal möjligheter för detta.

Tabell 2.1. Kemiska och fysikaliska egenskaper

	Bensin Eurograde	Dieselloolja	IPG (motorgas)	CNG	Metanol	Etanol
Sammansättning	C ₄ -C ₁₂ -kolväten max 2,5 (-3,7)	C ₁₂ -C ₂₄ -kolväten --	Propan (95%) --	Metan(etan)	CH ₃ OH 49,9	C ₂ H ₅ OH 34,7
Syrehalt, vikt %	0,02-0,03	< 0,3	> 0,0003	> 0,0003	--	--
Svavelhalt, vikt %	~ 0,75	~ 0,84	0,51	0,128 (165 bar 25°C)	0,795	0,789
Kvävehalt, vikt %				-162		
Densitet, g/ml						
Kokpunkt, °C	30-200	150-350	-42		65	78
Frys punkt (grumlings-, stelnings-) °C	< -40	-9 -- -45	-190	--	-94	-115
Angtryck vid 0°C, kPa	25		460		4	
20	45		810		12	
38	80	0,07	1350	--	31	
60	130		2080		77	
80	220		3100		165	
Angdensitet relativt luft	3-4	--	1,57	0,55	1,11	1,59
Flampunkt °C	-15 -- -40	> 40	-100	-185	11	13
Brännbarhetsgränser i luft, vol %	1,4-7,6	0,7-5,0	2,4-9,6	5,3-14,0	6,7-3 6	3,3-19
Flamhastighet, m/s	0,50		0,47	0,43	0,55	0,52
Självantändningstemp i luft, °C	240-480	~ 230	460	735	470	425
D:o på het yta: gjutjärn °C	< 700	< 700	--	--	> 700	--
rostfritt °C	> 700	> 700	--	--	620	--
Angbildningsvärme vid 20°C (vid kp) MJ/kg	0,35 (0,30)	0,25	(0,47)	(0,43)	1,18	0,79
Förbränningsvärme, MJ/lit (lägre)	~ 32,5	~ 35,5	23,6	~ 6,35	15,8(M100)	21,1(E100)
Stökiometriskt luftbehov, kg/kg	~ 14,6	~ 14,8	15,7	17,2	6,45	9,0
CO ₂ /MJ bränsle, g	~ 75	~ 75	64,6 (propan)	54,8(metan)	68,9	71,6
Oktantal RON	≥ 95	--	112	130	109	109
MON	≥ 85	--	97	120	89	90
Cetantal	< 25	> 45			3	8

Alkoholernas höga självantändningstemperaturer (= låga cetantal) skulle göra dem till olämpliga drivmedel för dieselmotorer om inte viss tändhjälp användes. Detta kan ske på flera sätt, vilka alla praktiseras. Dieselmotorns höga verkningsgrad kan därigenom bibehållas. Någon begränsning av effektuttaget på grund av hög sotbildning (svartrök) finns inte, då alkoholerna brinner utan sotbildning. Alkoholernas höga avdunstningsvärme och relativt låga flamtemperatur ger potential till lägre NOx-bildning, vilket verifierats i både otto- och dieselmotorer.

I motorer med extern brännkammare och kontinuerlig förbränning är den viktigaste egenskapen en stabil flamma med goda magerbrinnegenspaper. Friheten från sotbildning är en stor fördel i dessa motorer, som kan innehålla stora värmeytor för indirekt värmeöverföring, vartill kommer att drivmedlet är helt fritt från svavel och kväve. Alkoholerna är därför idealiska drivmedel för denna typ av motorer.

Alkoholerna kan relativt lätt katalytiskt spaltas till väte och koloxider och kan ses som flytande vätebärare och därmed som potentiellt bränsle för bränsleceller. Då spaltningen kan ske vid låg temperatur, $\approx 300^\circ\text{C}$ (mot cirka 900°C för kolväten) och måttlig värmeförlust, kan den ske med hjälp av motoravgaser. Den innebär då en återvinning av avgasvärme till kemiskt bunden energi vid motordrift.

Alkoholerna har kraftigare polära egenskaper än kolväten och är mer korrosiva gentemot lättmetaller som aluminium, magnesium och zink liksom den i bensintankar (på fordon) vanliga terne-legeringen (bly-tenn). Stålkorrosion är däremot inte något problem för vattenfria alkoholer. De polära egenskaperna ger också en annan angreppsbild på gummi- och plastmaterial än kolväten och andra material måste delvis väljas för alkoholerna.

2.2 Miljö- och hälsopåverkan

Alkoholerna, särskilt metanol, har låg reaktivitet i atmosfären och ger tillsammans med den låga flyktigheten en ozonbildningspotential som uppskattas till bara en tiondel av vad bensin ger.

Frihet från svavel och potentialen till låg NOx-bildning vid förbränning ger mindre förorening än vid användning av bensin och dieselolja.

Hälsorisker är främst förknippade med drivmedlens halt av bensen och aromater (bensin) samt polycykliska aromatiska föreningar (PAC; i dieselolja), av avgasernas halter av gasformiga olefiner (eten/propen), bensen, aldehyder, PAC och derivat av dessa, t.ex. nitro-PAC. Cancerrisken genom lång tids exponering för mycket låga halter av dessa tilldrar sig särskilt stort intresse.

Alkoholerna har i sig inga cancerogena egenskaper. Hälsorisken med alkoholer, framför allt metanol, är att de kan missbrukas genom förtäring i tron att det är dricksprit. Dödlig metanoldos är mycket låg, ca 1 g/kg kroppsvikt för människa men med stora individuella olikheter.

Avgasutsläppen från alkoholmotorer är främst oförbrända alkoholer men är nästan fria från bränslerelaterade aromater eller PAC även om katalytisk avgasrening inte används. Typiska utsläppskomponenter är aldehyder, formaldehyd med metanol, även acetaldehyd med etanol.

3. TILLVERKNING AV METANOL

Metanoltillverkning är etablerad teknik med ett flertal råvaror som bas. Det mesta av de cirka 20 Mt/år metanol som tillverkas idag har naturgas som råvara men det finns också anläggningar baserade på restoljor, stenkol och brunkol. Teknik med torv och biomassa finns färdigutvecklad men har hittills bara använts för ammoniaktillverkning (Kemira i Uleåborg med HTW-teknik).

3.1 Råvaror, teknikstatus, utbyten

Metanol produceras genom att s.k. syntesgas (koloxider och vätgas) reagerar till metanol över en katalysator (kopparbaserad i moderna processer). Syntesgasen kan framställas ur ett flertal råvaror såsom:

- naturgas, LPG
- nafta
- restoljor
- stenkol, brunkol
- torv
- biomassa

Lättare råvaror, såsom naturgas, LPG och nafta processas oftast med vattenånga i indirekt värmda katalysatortuber, s.k. ångreformering, till huvudsakligen kolmonoxid, koldioxid och vätgas. Värmning sker genom eldning av t. ex. naturgas.

Tyngre råvaror, såsom restoljor, processas med syrgas genom (katalytisk eller icke-katalytisk) s. k. partiell oxidation till huvudsakligen kolmonoxid och vätgas.

Fasta bränslen, såsom kol, torv och biomassa förgasas med syrgas och vattenånga varefter gasen vidareförädlas och renas till syntesgas.

Exempel på flödesscheman visas i figur 3.1.

Den moderna metanolsyntesen är mycket selektiv till metanol och detta ger också det högsta termiska utbytet av syntesen. Biprodukter i form av lättflyktiga aldehyder, ketoner, etrar, organiska syror, estrar och högre alkoholer uppkommer i halter av hundra eller några hundra ppm. Med metanol för kemisk råvara avlägsnas dessa genom destillationer. Syror neutraliseras och avlägsnas med vattenfasen vid destillationen. För drivmedelsmetanol kan de förstnämnda kvarlämnas i produkten och en mindre förenkling av reningsprocessen vinnes. Det är däremot utan mening att söka förändra syntesen för att tillverka mer av högre alkoholer, vilket är möjligt genom modifiering av katalysator och processbetingelser, då det leder till lägre termiskt utbyte och komplicerar och fördyrar reningssteget. Detta gäller även syntesen till kolväten som slutprodukt.

Drivmedelsmetanol bör därför specificeras till att bestå av minst 99,5 % metanol och högst 0,1 eller 0,15 % vatten och ha låg aciditet.

3.1.1. Metanol ur naturgas

Den naturgasbaserade tillverkningen av metanol för kemisk råvara sker i anläggningar med linjestorlekar på upp till 2.500 t/d. Det ökade intresset för metanol som drivmedel har lett till studier över hur större anläggningar för 10-15.000 t/d skall kunna utföras med ny kostnadssänkande teknik. Vidare studeras om kvaliteten för drivmedelsmetanol kan förändras för att sänka kostnaderna.

Flera olika vägar följs i teknikutvecklingen för att minska investeringskostnaden och förbättra energieffektiviteten. Som exempel kan nämnas:

* användning av syrgas för partialoxidation av metan vid framställning av syntesgas, ev. i kombination med mindre reaktor för ångreformer, för att få billigare reaktorer och gynnsammare sammansättning på syntesgasen (lägre restmetanhalt och korrekt väte/kolmonoxid-kvot med lägre cirkulerad gasmängd som följd), (jfr första och andra flödesschemat i figur 1).

* ICI's GHR (gas heated reformer), som eliminerar gasbrännarna i konventionell reformer och den efterföljande ångpannan med stora kostnadsbesparingar som följd,

* för metanolsyntesen större reaktorer och reaktorer för ökad omsättning per passage (fluid-bädd eller trefas-reaktor med mineralolja som värmeupptagande buffert) med minskat behov av recirkulering och rekompresion av ej omsatt gas som följd,

* större anläggningar för minskad sido- och overhead-kostnad per produktenhet (i nyligen gjorda studier för metanol till Kalifornien har storlekar på 10.000 t/d beräknats),

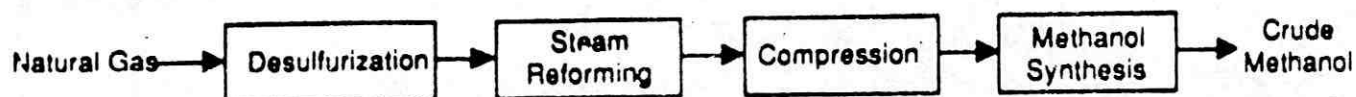
* flytande anläggningar för produktion vid off-shore gasfält, som annars inte kan utnyttjas på grund av för hög kostnad för gasledning till land.

Den termiska verkningsgraden i naturgasbaserade anläggningar är en fråga om optimering mellan gasförbrukning och -pris samt utrustning för värmeåtervinning. Det teoretiska utbytet av metanol i energitermer (figur 3.2) är 85 % med en pseudo-praktisk gräns på cirka 80 % (baserat på lägre värmevärden). Moderna anläggningar projekteras för cirka 65 % medan äldre anläggningar ofta visar utbyten långt under 60%. För framtida anläggningar är det sannolikt riktigt att räkna med utformning för höga utbyten då framtida kostnader för gasutvinning ökar och fossila råvaror belastas med koldioxid-skatter. Import av vatten- eller kärnkraftbaserad el för drift av motorer och kompressorer kan vara riktig för att hålla gasåtgången nere, och det kan då vara optimalt att räkna med utbyten på cirka 75 % eller högre.

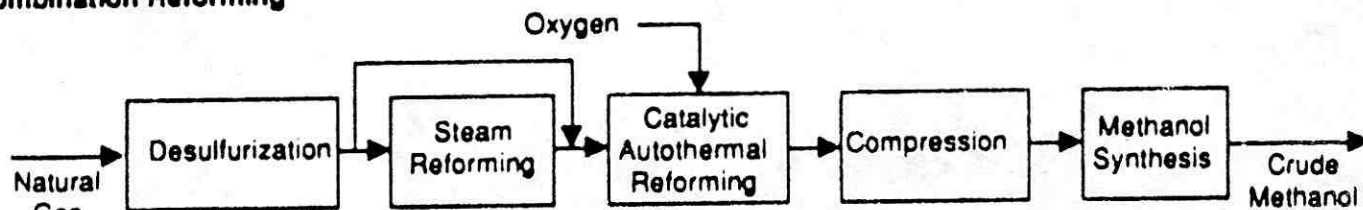
Utveckling av direkt katalytisk oxidation med syrgas av metan till metanol eller via annan mellanprodukt än syntesgas bedrivs på några håll (Norge och Canada) men synes inte ha kommit förbi laboratoriestadiet. Svårigheten synes vara att få den selektivitet, som den nuvarande metanolsyntesen har.

Förläggning av ny naturgasbaserad produktion av metanol synes naturligen komma att vara vid eller nära gasfälten, där gaskostnaden är lägst och transport av metanol kan ske billigast med tankfartyg eller pipeline. Förläggning vid pipeline i konsumtionsområden för gas eller metanol synes endast berättigad om synergieffekter kan erhållas med annan tillverkning som t.ex. elkraftproduktion ev. i kombination med utnyttjande av spillvärme för uppvärmning i fjärrvärmenät. Detta kan medföra ökat totalt energikutnyttjande och lägre utsläpp av koldioxid samt förbättrat utnyttjande av dyrbar utrustning (inkl. pipelines) genom att utjämna säsongvariationer för olika produkter.

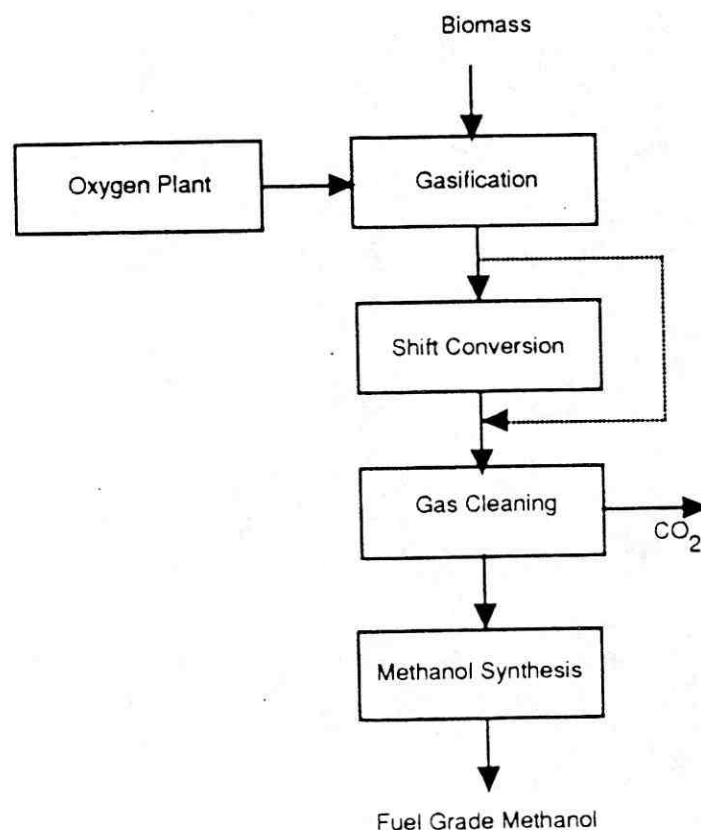
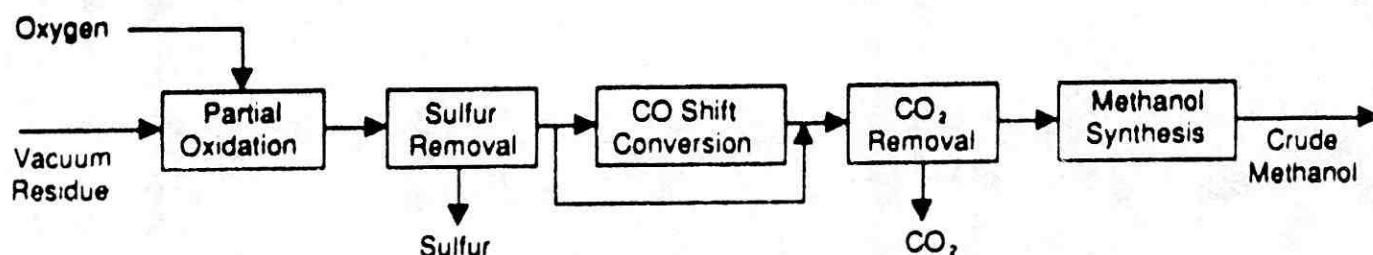
Conventional Steam Methane Reforming



Combination Reforming

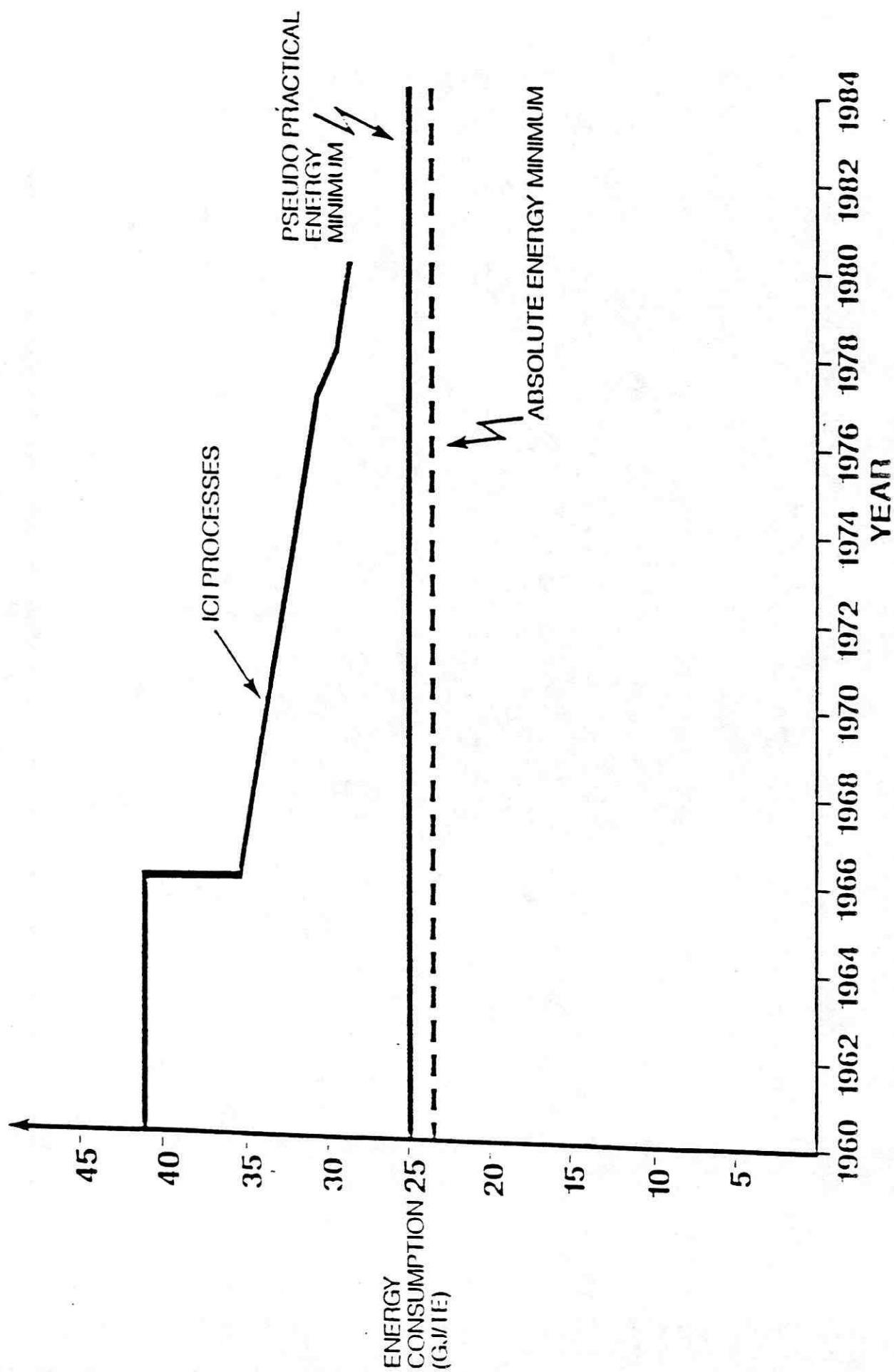


Partial Oxidation of Vacuum Residue



Figur 3.1 Tillverkning av metanol ur naturgas, restolja och biomassa.
Källor: Philips, Applied Energy 1990 (biomassa) U.S. DoE 1989

FIGURE 32. THE THERMAL EFFICIENCY OF ICI'S METHANOL PROCESSES



3.1.2. Metanol ur biomassa och torv

Fasta bränslen såsom biomassa, torv (och även kol) processas genom förgasning med syrgas och ånga. Därefter justeras förhållandet vätgas/kolmonoxid genom att en del kolmonoxid får reagera med vattenånga till vätgas och koldioxid över en katalysator (vattengasreaktion även kallad "shiftreaktion"). Därefter kyls gasen och renas från vätesulfid (torv, även kol) samt koldioxid genom absorption. Svavel (torv, kol) samt koldioxid utvinns därefter ur lösningsmedlet. Jfr fjärde flödesschemat i figur 1 för biomassa.

Användning av biomassa (och torv) som syntesgasråvara är av intresse med anledning av diskussionen om fossil koldioxids klimateffekt och har varit föremål för utvecklingsinsatser i Finland, Sverige, Canada och USA. Den finsk-svenska utvecklingen av den tyska HTW-förgasaren, som nu kommersiellt används för metanol ur brunskol i Tyskland, ledde till att en kommersiell förgasare för torv (och biomassa) byggdes hos Kemira i Uleåborg. Den svenska utvecklingen av MINO-processen vid KTH/Studsvik ledde till en pilotanläggning men ej vidareutveckling i större skala. MINO-tekniken bygger på katalytisk omsättning av tjäror och kolväten i rå, filtrerad syntesgas från pyrolys/förgasning vid relativt låg temperatur och ger en gynnsammare gassammansättning än HTW-processen, som förlitar sig på termisk reduktion av tjär- och kolvätehalten genom förgasning vid högre temperatur.

I tidigare svenska förprojekteringsstudier anges metanolutbyten i energitermer i självförsörjande anläggningar till omkring eller något under 50 % (räknat på lägre värmevärde).

I USA studeras biomassebaserad metanolproduktion med Gas Research Institute's U-Gas förgasare som bas (U.S.DOE 1991) och användning av liknande katalytiska teknik som i MINO-processen. Processen användes i projekt att göra Hawaii (Phillips) självförsörjande med drivmedel på biomassabas. Med nu tillgänglig teknik synes en termisk verkningsgrad på cirka 43 % ha använts och för framtida teknik drygt 50%.

3.2. Emissioner

3.2.1. Emissioner för metanoltillverkning ur naturgas

Vid metanolframställning ur naturgas är SO_x-utsläpp nära noll eftersom gasen tidigare gjorts nära svavelfri och ev. utsläpp är förknippade med gasutvinningen. NO_x-utsläpp kan förekomma från gaseldad reformer men uppgifter härom saknas. I anläggning med autoterm metankonvertering med syrgas borde NO_x-utsläpp vara noll.

CO₂-utsläpp är beroende av hur anläggningen är utformad. Bränslegasbehovet i konventionella anläggningar täcks med avledd väteanrikad gas från synteskretsen med tillskott av naturgas, som i olika projekteringar varierar från några få till över 30 % av hela naturgasåtgången. För anläggningar med utbyten under 60 % emitteras cirka 500 kg CO₂ per ton metanol. För anläggningar med cirka 75 % utbyten reduceras detta tal drastiskt men inga uppgifter från projekteringar föreligger. Försiktiga bedömningar indikerar utsläpp av cirka 250 kg per ton metanol men lägre värden kan troligen nås. Utsläpp av växthusgaser som metan, dikväveoxid och ozonbildande gaser kan på goda grunder bedömas vara försumbart små i samband med själva metanolframställningen. Störst osäkerhet gäller diffusa läckage av metan.

Utsläpp i samband med naturgasutvinningen sker av koldioxid i förbränningsgaser. Uppgifter om egengasförbrukningen varierar mellan 1 och 5 % av utvunnen gas och beror av dess halt av högre kolväten och svavelvätehalt. Metanutsläppen uppskattas i en norsk studie (IKU, Sintef 1990) till 3 %, räknade som CO₂-ekvivalenter som växthusgas, av totala utsläppen vid produktion av olja och gas. Summan av alla utsläpp av växthusgaser utom CO₂ anges till 15 % av de totala.

3.2.2. Emissioner för metanoltillverkning ur biomassa

Biomassebaserad tillverkning av metanol ger ytterst små SO_x-utsläpp tack vare träbränslets låga svavelhalt samt den gasrening och svavelutvinning (torv) som sker. Utsläpp från direkteldning av råvara i hjälpanläggningar kan undvikas om renad gas får utgöra ev. behövligt bränsle i dessa. Inga uppgifter om NO_x-utsläpp föreligger. CO₂-utsläpp ger i långa loppet inga bidrag till atmosfärens koldioxid då de ingår i kretsloppet (utöver användningen av fossila drivmedel o.a. i skogs- och jordbruket) förutsatt att biomassan också utgör bränsle i anläggningen. Utsläpp av ozonbildande gaser bedöms vara försumbara.

3.3 Kostnader, marknadspriser

Metanols pris har historiskt legat på cirka 60 % eller något därunder av bensinpriset (på viktsbas) på världsmarknaden (figur 3.3) med endast kortvariga avvikelser. Metanolpriset bestäms av dess värde som kemisk råvara men under senare år kan ett visst inflytande från drivmedelsmarknaden tänkas på grund av den ökande användningen som bensinkomponent, huvudsakligen som etern MTBE. Det kan komma att finnas ett starkare samband mellan metanol och bensin vid ökande användning genom att kostnaden för respektive råvaror, d.v.s. naturgas och råolja, beror av varandra, då de konkurrerar om samma tillämpningar. Det kan då visas att metanol, som produceras vid källor utanför konsumtionsområdena för gas, borde få relationen cirka 0,6 i förhållande till (liter/liter eller kg/kg), om gaspriset sätts till alternativvärdet för annan användning i konsumtionsområdet efter frakt till detta i stor skala i ny ledning.

Nuvarande metanolproduktion är blygsam i förhållande till drivmedelsmarknaden. Ökad användning av metanol som drivmedel måste därför baseras på produktion i nya stora anläggningar främst i områden med naturgasöverskott. För Europas del är i första hand ett sådant område Norska havet.

3.3.1 Kostnader för metanol från naturgas

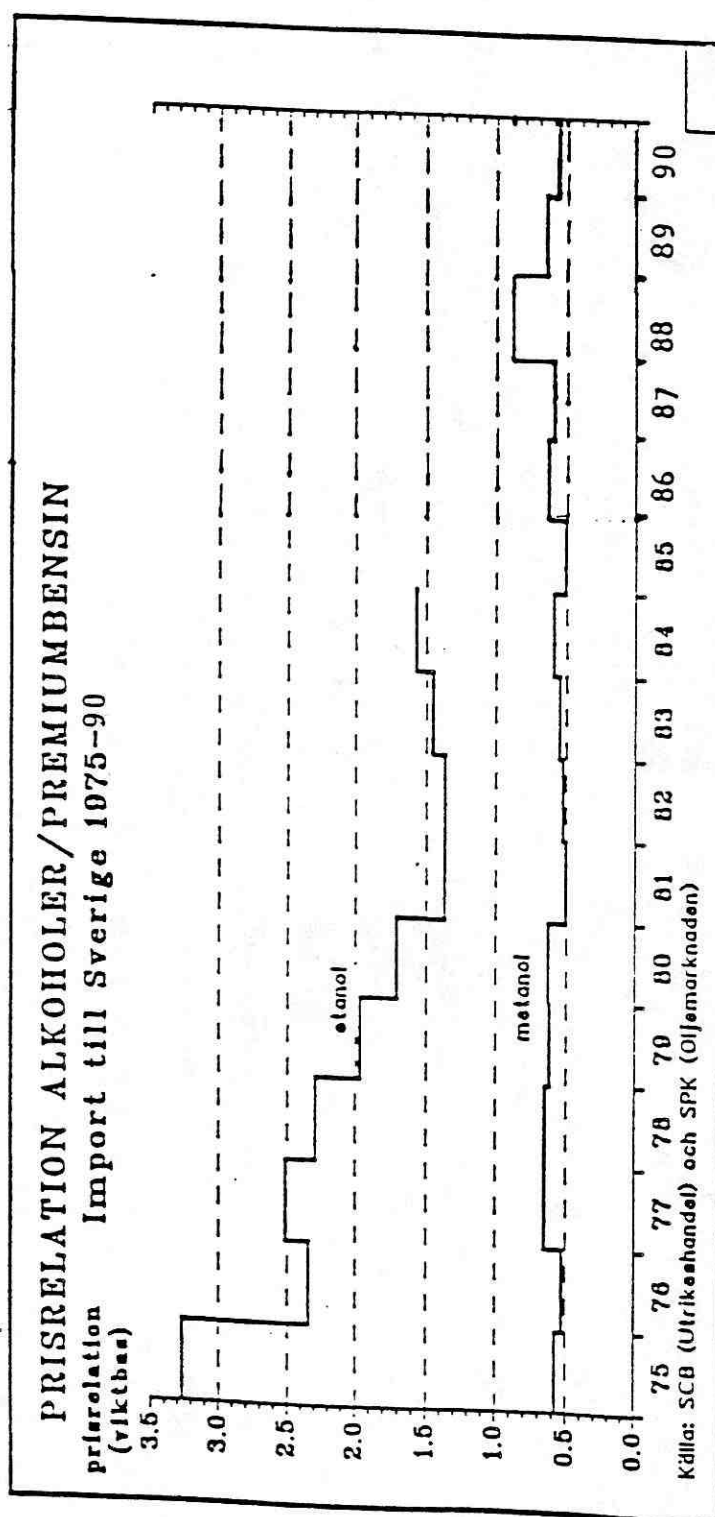
I samband med planerna på introduktion av metanol som alternativt drivmedel i USA har kalkyler över kostnader för metanol senast presenterats av California Energy Commission (CEC) och U.S. Department of Energy (U.S.DOE 1989) för gasbaserad produktion nära källan och frakt till USA i stora tankfartyg. Figur 3.4 och 3.5 illustrerar utfallet. CEC har gjort den sammanfattande bedömningen att metanol i kalifornisk hamn kostar 37-51 cents per gallon, (USD 122-170/ton) genom att utnyttja de gynnsammaste av ett antal fall först. På längre sikt och vid ökande behov förutses en kostnadsnivå på cirka 185 USD/ton. Siffrorna avser 1986- 1987 års dollar och behövlig kapitalavkastning före skatt är 20 % av investeringen. Metanolkostnader i kalifornisk hamn på 40-45 cents per gallon skulle kunna konkurrera med bensin till konsument på USD 1,30-1,40 per gallon, vilket är nära priset för oblyad premiumbensin. Dessutom kommer bensin att få högre krav på sig beträffande flyktighet, olefin- och aromathalt, vilket betyder 10-20 % högre kostnad.

Utgår man från ett pris på naturgas, som landad på europeisk kontinent motsvarar lågsavlig tjockolja (≤ 90 % av råoljepris på USD 20 per fat) blir det cirka USD 1,75 per GJ efter frändrag av USD 1,25 per GJ för rörtransport. Enligt DOE's kalkyl (figur 5) erhålles då metanol från stor anläggning till en kostnad av ca 35 cents/gallon vilket är cirka 20 % högre per energienhet än för bensin, som beräknats till 1,35 gånger råoljepriset per ton d.v.s. ca USD 200/ton. Vid råoljepris på USD 30 per fat sjunker merkostnaden till cirka 15 %. Denna enkla överslagskalkyl syftar endast till att visa de kostnadsrelationer, som kan vara typiska för metanol ur naturgas vid jämförelse med bensin på likvärdiga villkor.

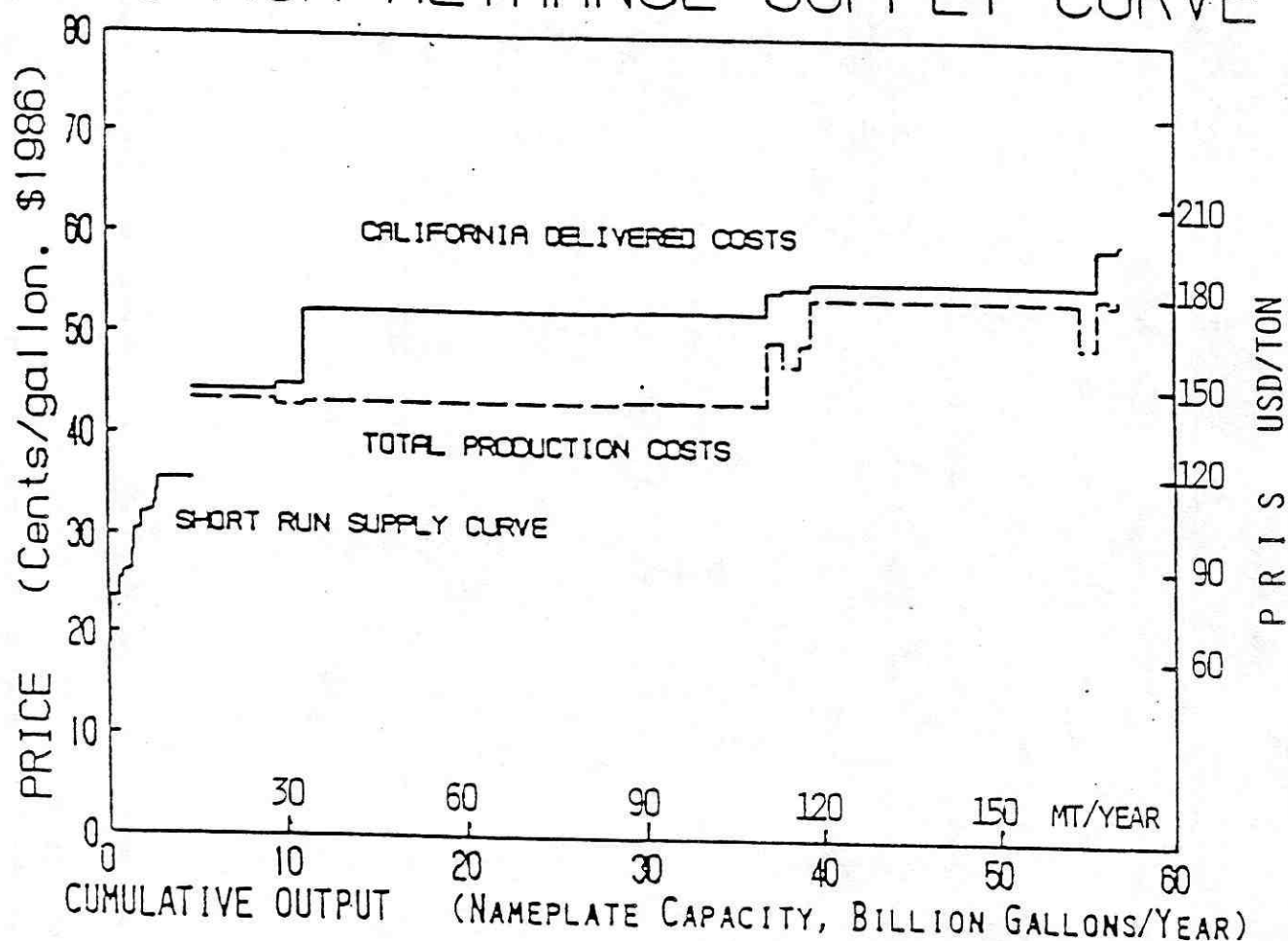
Ovanstående kan sammanfattas i nedanstående tabell:

	cents/gallon	cents/liter	USD/MWh
<u>Metanol till Kalifornisk hamn</u> (fig. 4&5)			
-gynnsamma fall först	37-51	10-13	22-31
-längre sikt, ökande behov, 185 USD/ton (fig. 4)	56	15	34
<u>Konkurrenskraft med bensin</u>			
-metanol till kalifornisk hamn	40-45	11-12	24-27
-distributionskostnad (enligt kap. 5, USD/SEK=6)	ca 29	ca 8	ca 18
Metanol till konsument	ca 69-74	ca 19-21	ca 42-45
Bensin till konsument	130-140	34-37	38-41
<u>Jämförelse råolja-naturgas-metanol</u>			
-råoljepris, USD/fat: 20 (30)	48	13	12 (19)
-råoljepris, USD/ton: 145 (220)		USD/GJ: 3,45 (5,2)	
-naturgaspris, $\leq 0,9$ (råoljepris) d.v.s. USD/GJ: 3 (4,65)			10,8 (17)
-naturgas vid gasfält USD/GJ: 1,75 (3,4)			6,3 (12)
-metanol från stor anläggning (fig. 5)	ca 35 (48)	ca 9 (13)	ca 21 (29)
-bensinpris 1,35 ggr råoljepris $\approx$ 200 USD/ton (300 USD/ton)	ca 57 (85)	ca 15 (22)	ca 17 (25)

FIGUR 3, 3.



LONG RUN METHANOL SUPPLY CURVE

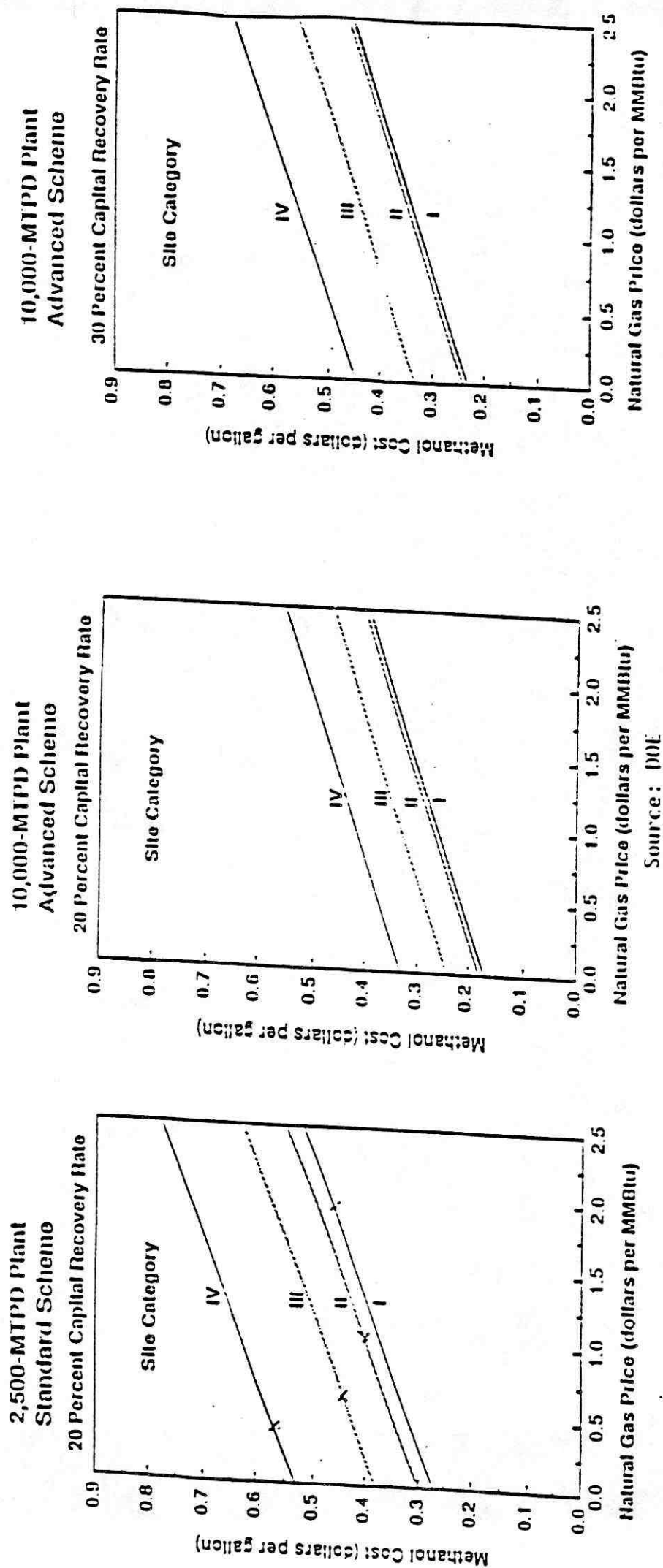


KÄLLA: CALIFORNIA ENERGY COMMISSION

COUNTRY	CAPACITY (MIL. GAL./YR)	CUMULATIVE CAPACITY (MIL. GAL./YR)	PRODUCTION COST (CENTS/GAL.)	DELIVERED PRICE
* CURRENT CAPACITY	- -	4,840	- -	- -
1 CANADA	4,600	9,440	43.4	44.4
2 MEXICO	1,500	10,940	43.0	45.0
3 ALGERIA	17,600	28,540	43.3	52.3
5 ARAB EMIRATES	2,000	30,540	43.5	52.5
4 BAHRAIN	400	30,940	43.5	52.5
6 SAUDI ARABIA	6,000	36,940	43.5	52.5
7 TRINIDAD	800	37,740	49.7	54.7
8 ARGENTINA	1,000	38,740	47.4	55.0
9 BRAZIL	600	39,340	49.5	55.0
10 U.S.	15,200	54,540	54.0	55.5
11 CHILE	1,000	55,540	49.5	55.5
12 CHINA	500	56,040	54.4	59.4
13 BURMA	100	56,140	54.4	59.4
14 MALAYSIA	600	56,740	53.7	59.4
15 INDIA	200	56,940	54.4	59.9

Multiplikation med 3
ger Mton/år.Multiplikation med 3,32
ger USD/ton.

Figure 3.5. — Costs of Fuel-Grade Methanol From Natural Gas



Det bör sägas att alla kostnadskalkyler påverkas betydligt genom annat val av kostnadsfaktorer som t.ex. sätt för finansiering och avkastningskrav, avskrivningstid, storlek, råvarukostnad, etc. Mycket olika resultat från olika studier har därför presenterats i litteraturen. För projekt som syftar till införande av alternativa drivmedel i stor omfattning är det nödvändigt att se det långsiktigt och göra jämförelser ur samhällsekonomisk synvinkel utan hänsyn till befintliga skatter. Det är också tveksamt att göra jämförelser med dagens priser på drivmedel utan med vad dessa skulle kosta i nyuppförda raffinaderier. Med den senare grunden skulle enligt en konsult (Stokes) jämförelsen utfalla till metanols fördel redan vid dagens råoljepriser.

3.3.2 Kostnader för metanol ur biomassa och torv

Metanol, som tillverkas av andra råvaror (kol, torv, biomassa) än naturgas, kommer under överskådlig tid att vara dyrare dels på grund av mer komplexa och dyrare anläggningar, dels på grund av dyrare råvara (torv, biomassa). Dock har dessa råvarors pris ett svagt samband med olje- och naturgaspriser och läget kan bli ett annat vid kraftigt stegrade oljepriser.

Några nya svenska studier av kostnad för metanol från biomassa har inte gjorts sedan mitten på 80-talet, då de resulterade i kostnad på 1,5-2 kr per liter. U.S.DOE har nyligen publicerat (U.S.DOE 1991) kalkyler över metanolproduktion med resultat som visas i figur 3.6 som funktion av råvarukostnad och två anläggningsstorlekar (cirka 350.000 och 2 milj. m³ per år metanol). För den mindre storleken blir kostnaden USD 0,93 resp. 1,29 per gallon eller 1,5 och 2 kr per liter (USD/SEK=6) vid råvarukostnad på USD 2,4/GJ eller ca 50 kr/MWh för framtida resp. nuvarande teknologi. Antagen råvarukostnad är dock för låg för svenska förhållanden, som i bästa fall är 80-110 kr/MWh 20 kr/GJ (72 kr/MWh) men troligen betydligt högre för t.ex. odlad energiskog (Naturvårdsverket 1990/01).

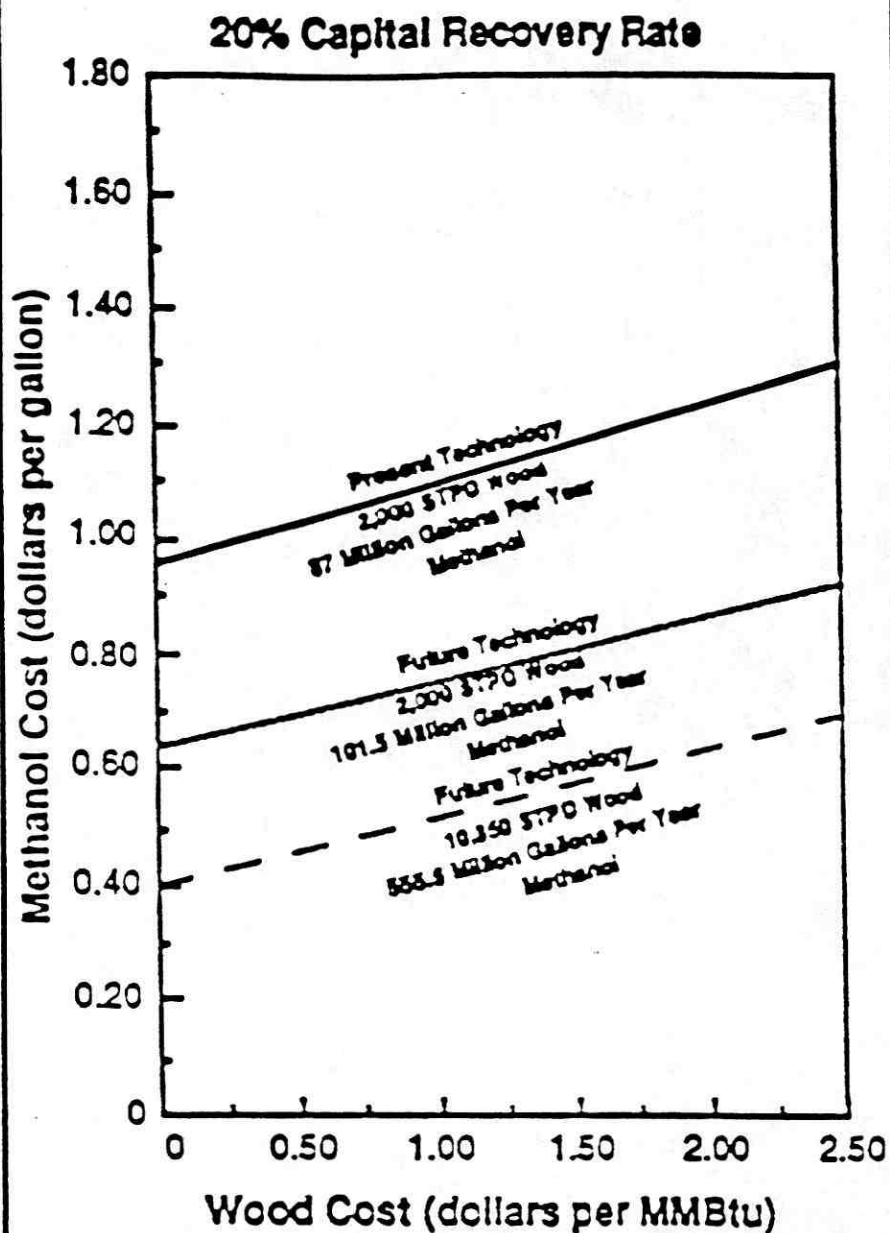
Extrapolering till högre råvarukostnad i figur 6 ger en metanolkostnad på ca 2 resp. 2,5 kr/liter.

Ovanstående kan sammanfattas i nedanstående tabell:

	cents/gallon öre/kWh	cents/liter	USD/MWh	1 USD=6 SEK kr/liter	ö/kWh
SVENSKA STUDIER					
mitten 80-talet					
Metanolkostnad				1,5-2	34-45
U.S. DOE 1991					
Biomassa					
2,4 USD/GJ			8,7		5
Metanolkostnad					
ca 350.000 m ³ /år (fig. 6)					
-nuvarande teknik	129	34	78	2,0	47
-framtida teknik	93	25	56	1,5	34
SVENSKA FÖRHÅLLANDEN					
Biomassa, 80-110 kr/MWh			13-18 (3,7-5,1 USD/GJ)		8-11
Metanolkostnad ca 350.000 m ³ /år (extrapolering ur fig. 6)					
-nuvarande teknik	ca 160	ca 40	ca 95	ca 2,5	ca 60
-framtida teknik	ca 120	ca 30	ca 70	ca 2	ca 45

FIGURE 36.

COSTS OF METHANOL FROM WOOD



SOURCE: DOE

3.4 Kombinationer - metanol-el-/värmeproduktion

Transportsektorn och energianvändningen i andra sektorer är i dag nästan helt separerade från varandra. Andå finns det troligen många kombinationseffekter, som vore till fördel för alla och för samhället om isoleringen dem emellan kunde brytas. Ett enkelt exempel, som finns i dag, är utnyttjande av spillvärme från raffinaderier (och andra industrier) för uppvärmning av fastigheter. Elgenerering i kombination med fjärrvärme är givetvis ett annat exempel.

Vid upparbetning av råvaror till drivmedel, vilken grundar sig på förgasning av denna till syntesgas, kan förutom spillvärmeutnyttjande, gasen användas för elgenerering i kombi-cykel eller för användning som rent bränsle i pannor inom regionen. Olika säsongvariationer i efterfrågan på drivmedel och el ger möjlighet till högt utnyttjande av den gemensamma och dyraste delen i anläggningen, förgasningssektionen. Förgasningstekniken har en ur utsläppssynpunkt stor fördel i det att den kan möta mycket högt ställda krav på låga utsläpp i fråga om stoft, metaller, svaveloxider och cancerogena ämnen, som i grunden är oacceptabelt höga vid direkt förbränning. Konverteringsanläggningen har praktiskt taget inga utsläpp alls av dessa ämnen och kan förläggas nära tätorter även vid användning av mycket rena råvaror. Slutprodukterna är ask-, svavel-, kväve- och PAH-fria och ger därigenom de bästa förutsättningar för låga utsläpp, även NOx- kontroll, vid slutanvändningen som drivmedel eller bränsle.

Det tidigare projekterade s.k. Nynäshamn-kombinatet med kol eller extratunga oljor som råvara (Nynäs Petroleum) är exempel på många studerade kombinationer. En förstudie av ett torv-/biomassabaserat kombinat för metanol, el och fjärrvärme är annat exempel (SDAB 1983) med gynnsamma kombinationseffekter. Upparbetning av vakuumrestoljor i raffinaderier skulle kunna vara ett annat exempel.

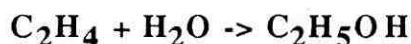
En kombination som särskilt studerats i USA är elgenerering från kol via förgasning-kombi-cykel kombinerad med en förenklad metanolanläggning. Denna är utrustad med endast en syntesreaktor för enkel genomströmning utan återföring av ej omsatt gas (därav visst intresse för att utveckla reaktorer för högre omsättning per passage). Kostnaden för metanolprodukten reduceras då till drygt 190 USD/ton (drygt 20 öre/kWh) vid en kreditering för elkraftproduktion på 36 öre/kWh el jämfört med ca 250-310 USD/ton då enbart metanol produceras (U.S.DOE 1989). Metanolen kan användas för avsalu eller som lagringsbar energibärare för insats för att möta effekttoppar i elnätet med gasturbiner (eller bränsleceller i framtiden).

4. TILLVERKNING AV ETANOL

Etanol kan framställas genom fermentering (jäsning) och på syntetisk väg från eten eller syntesgas. Världsproduktionen av etanol är idag cirka 15 Mton/år. Huvuddelen produceras genom fermentering av sockerrika eller stärkelserika råvaror.

Jäsning av enkla sockerarter framställda ur sockerrika, stärkelserika eller lignocellulosahaltiga råvaror är alltså den vanligast förekommande metoden och den metod som diskuteras för en svensk inhemsk etanolproduktion. Jäsning kommer därför att behandlas utförligare i kommande avsnitt.

Hydratisering av eten är en kommersiellt använd process för framställning av etanol. Eten, som produceras genom krackning av råolja eller från naturgas, får reagera med vatten till etanol vid hög temperatur och under närvaro av en katalysator. Totalreaktionen är:



Syntes från syntesgas ($\text{CO} + \text{H}_2$). Etanol kan också framställas från en blandning av kolmonoxid och vätgas, syntesgas. Syntesgasen kan produceras från naturgas eller olja eller genom förgasning av kol och biobränslen. Direktsyntes av etanol ger ett totalutbyte på 40-50%. Som biprodukt erhålls en rad andra syrenehållande kolföreningar som t ex högre alkoholer, acetater och estrar. Etanol kan också syntetiseras från metanol som i sin tur tillverkas från syntesgas. Metodens konkurrenskraft förutsätter dock billig naturgas och att etanol kan anses ha ett avsevärt högre värde än metanol vilket oftast inte är fallet. Någon kommersiell anläggning baserad på denna teknik finns inte i drift.

4.1 Råvaror

Framställning av etanol genom jäsning kan ske från en rad olika råvaror. Dessa kan delas in i sockerrika, stärkelserika och lignocellulosahaltiga. Processutformningen skiljer sig på en rad punkter mellan de olika råvarutyperna.

Sockerrika råvaror tex sockerbeter, melass, sockerrör samt frukter och bär innehåller glukos, dvs vanligt socker, som direkt kan jäsas till etanol. Nackdelen med sockerhaltiga råvaror är ett högt pris, en dålig lagringsbeständighet och en begränsad tillgång.

Stärkelserika råvaror, dvs säd och potatis, kan också användas som utgångspunkt för etanolproduktion. Stärkelse är uppbyggt av polymera molekyler som består av glukosenheter. Säd har betydligt bättre lagringsegenskaper än de sockerhaltiga råvarorna och ett något lägre pris. I gengäld krävs ett processteg för att bryta ner stärkelsen till jäsbart socker, glukos.

Lignocellulosahaltiga råvaror är tex ved, halm och tidningspapper. Dessa består av tre huvudkomponenter; cellulosa, hemicellulosa och lignin. Cellulosa är en polymer molekyl som består av glukosenheter i en kristallin struktur. Den skiljer sig stort från stärkelse trots att byggstenarna i båda fallen är glukos. Hemicellulosa är en grenad polymer uppbyggd av pentoser och hexsoser (socker med fem respektive sex kolatomer). Lignin är en komplex aromatisk molekyl som inte kan jäsas till etanol.

Fördelningen mellan de olika komponenterna i en rad råvaror tänkbara för etanolproduktion visas i tabell 4.1.

	Cellulosa	Hemicellulosa	Lignin
Halm	30	25	20
Lövträ	42	38	15-20
Barrträ	42	28	25-35
Tidningspapper	60	20	15

Tabell 4.1 Sammansättning (i vikts-%) hos några cellulosaråvaror.

Lignocellulosa har ett förhållandevis lågt pris och tillgången är så stor att en bredare introduktion av etanol som energibärare är möjligt med utgångspunkt från cellulosabaserad etanol. Lagring av lignocellulosa möter heller inte några problem. På grund av råvarans mer komplexa uppbyggnad är dock processutformningen mycket mer komplex än för stärkelse- och sockerrika råvaror. Det indikerar att större anläggningsstorlekar är att föredra med lignocellulosarika råvaror.

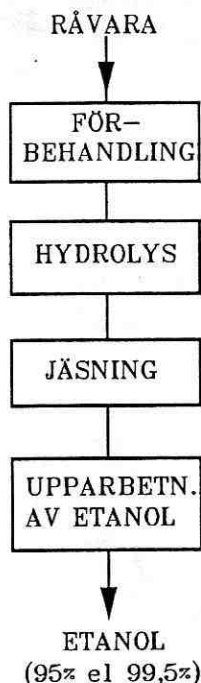
4.2 Produktionsprocesser

Generellt kan en process för etanolproduktion genom jäsning sägas bestå av fyra steg som illustreras i figur 4.1.

I de två första stegen, förbehandling och hydrolys, överförs råvaran till ett jäsbart socker, dvs i första hand till glukos. Det är utformningen av dessa steg som i huvudsak särskiljer processer avsedda för olika råvaror. De två sista stegen, jäsning och uppkoncentrering av etanol, är i princip lika oavsett vilket råvara processen utgår ifrån. Undantaget är jäsning av pentoser som endast är aktuellt med lignocellulosa som råvara.

4.2.1 Förbehandling - sockerrika råvaror

De sockerrika råvarorna innehåller ursprungligen socker i en form som kan jäsas direkt. För att utvinna sockret hackas och/eller mals råvaran och glukosinnehållet tvättas ut med vatten. Som resultat fås en vattenlöning av glukos. Processen är kommersiell sedan lång tid.



Figur 4.1 Produktion av etanol genom jäsnings.

4.2.2 Förbehandling och hydrolys - stärkelserika råvaror

Stärkelsepolymererna måste sönderdelas, hydrolyseras, till fermenterbart socker innan jäsningsen. Hydrolysen kan ske med syrabehandling eller med hjälp av enzymer. Enzymatisk hydrolys är den dominerande metoden i alla kommersiella och föreslagna processutformningar. Före hydrolysen måste säden malas för att öka enzymets kontaktyta med stärkelsen och på så sätt göra nedbrytningsprocessen effektivare. Kommersiella processer finns i drift på många håll baserade på majs, korn, vete och potatis.

4.2.3 Förbehandling och hydrolys - lignocellulosahaltiga råvaror

När lignocellulosa ska användas som råvara för etanolframställning måste ligninet avskiljas och de övriga ingående polymera molekyler hydrolyseras till enkla sockerarter som kan jäsas till etanol. I konventionella processer utförs hydrolysen genom behandling med syra. Utveckling av enzymatisk hydrolys, där hydrolysen utförs av enzymer på liknande sätt som vid stärkelsehydrolys, utvecklas även på många håll och anses kunna ha en framtida potential. Utvecklingen av enzymatiska processer befinner sig ännu på laboriestediet.

Huvudkomponenten i lignocellulosa är, som ses i tabell 4.1, cellulosa. Cellulosans kristallina struktur gör den relativt svår att hydrolysera till enkla socker. När hydrolysen väl är genomförd resulterar den dock i glukos som är enkelt att jäsa. Hemicellulosa är betydligt lättare att hydrolysera men resulterar i en stor andel pentoser som inte kan fermenteras till etanol av vanlig industriell jäst. Speciella svampar och bakterier som har förmågan att jäsa pentoser studeras på många håll i världen. Resultaten är lovande men utbytet är fortfarande lågt och ännu finns ingen kommersiell process som baseras på pentosjäsnings i drift.

Syrahydrolys

Syrahydrolysisprocesser kan baseras på koncentrerad eller utspädd syra (starksyra-respektive svagsyrahydrolys). Svagsyraprocesserna kräver en behandling under längre tid och högre temperatur vilket ger större förluster i och med att delar av det bildade sockret sönderdelas vidare. Starksyraprocesser ger i sin tur lägre förluster. De kan ge materialproblem samt har höga kostnader för syrakonsumtion eller syraåtervinning.

Syrahydrolys genomförs vanligen i två steg. I det första steget bryts den lätthydrolyserade hemicellulosan ner. I ett andra steget sker nedbrytning av den mer svårhydrolyserade cellulosan.

En rad syrahydrolysprozesser baserade på olika syror, temperaturnivåer och reaktorutformningar är under utveckling. En av de mest lovande, CASH-processen, har utvecklats i samarbete mellan Stiftelsen Svensk Etanolutveckling (SSEU), Biohol (Kanada) och TVA (USA).

Enzymatisk hydrolys

Vid enzymatisk hydrolys utnyttjas enzymer som är specialiserade på nedbrytning av cellulosa- och hemicellulosapolymerer till enkla sockerarter. Nedbrytning kan därför teoretiskt ge ett mycket högt utbyte utan nämnvärda förluster. För att nå höga utbyten är det viktigt att skapa en stor angreppsyta för enzymerna. I lignocellulosa skyddas vanligen cellulosaytan av ett lager lignin som alltså hindrar enzymet från att nå cellulosaytan. En rad förbehandlingsmetoder har studerats med syfte att öka angreppsytan för enzymet och på så sätt minska enzymåtgången för hydrolysen. Metoderna baseras på olika kemiska, fysikaliska, termiska och biologiska behandlingar av materialet.

Trots lovande resultat med olika förbehandlingsmetoder krävs det idag cirka 100 gånger mer enzym för hydrolysera cellulosa till glukos än för ett motsvarande system för stärkelsehydrolys (Floody).

Kostnaden för enzymet är en betydande kostnadspost vid enzymatisk hydrolys och en stor utvecklingspotential finns i förbättrade metoder för enzymproduktion liksom i att få fram enzymer med bättre egenskaper dvs som ger högre koncentrationer av socker, mindre produktinhibering eller bättre stabilitet. Utveckling av hydrolysprozessen med tex enzymrecirkulering eller samtidig hydrolys och jäsning (SSF) är vägar att istället minska enzymbehovet och därmed kostnaden. Enzymrecirkulering uppges ha potential att minska enzymåtgången med nära 90% och SSF med cirka 70% jämfört med konventionella satsvisa processer. (Floody)

Med enzymatisk hydrolys kan uppskattningsvis 90% av hexosinnehållet överföras till enkla socker (Hahn-Hägerdahl).

4.2.4 Jäsning av glukos

Oberoende av vilken råvara som används, sockerrika, stärkelserika eller lignocellulosa, så bildas etanolen slutligen genom jäsning av glukos. För detta utnyttjas jästen Saccharomyces cerevisiae, dvs vanlig bagerijäst. Processen är väl känd och tillämpas brett inom många områden.

Jäsningen av glukos till etanol sker enligt följande summaformel:



Den optimala reaktionstemperaturen är 35°C och reaktionen avstannar helt vid 45°C. Eftersom reaktionen producerar värme är en kylning av jästankarna nödvändig. Omsättningen av glukos till etanol är cirka 95%.

Saccharomyces cerevisiae kan jäsa hexosor upp till mellan 16 och 22% sockerkoncentration. Resultatet blir en etanolhalt på mellan 8 och 11%. Högre etanolhalter inhiberar jäsningen. För att minska energibehovet i det efterföljande destillationssteget är det viktigt att hålla en så hög halt som möjligt av etanol i mäsken.

Traditionella jäsningsprocesser baseras på satsvis jäsning. Jäsningstiden är 1-3 dagar beroende på substrat. Systemet kan effektiviseras genom att jäst recirkuleras mellan olika satser. Det minskar jästiden till 12-16 timmar. Kontinuerliga processer med både jäst- och substratrecirkulering förbättrar effektiviteten ytterligare. Kontinuerliga processer kan också kombineras med kontinuerlig avskiljning av bildad etanol vilket gör att konstanta förhållanden kan bibehållas under hela processen med påtagligt höjd effektivitet. Ett exempel på en sådan process är Biostilprocessen som utvecklats av Alfa Laval.

För att ytterligare höja produktiviteten kan avancerade system baserade på immobilisering av jästen utnyttjas. Dessa system möjliggör en hög jästkonzentration samtidigt med ett stort flöde genom reaktorn.

4.2.5 Jäsning av pentoser

Hydrolys av hemicellulosa ger huvudsakligen pentoser (xylos) som produkt. Dessa kan, som tidigare sagts, inte jäsas av den jäst som används för jäsning av glukos. En jäsning av pentosfraktionen till etanol skulle påtagligt förbättra utbytet av etanol och förbättra de ekonomiska förutsättningarna för etanolproduktion från lignocellulosa. Området är föremål för omfattande forsknings- och utvecklingsarbete. Man har funnit ett flertal bakterier och svampar som kan producera etanol från xylos. De mest lovande har i laboratorieskala visats ge acceptabla utbyten och koncentrationer. Det återstår dock att visa tekniken i större skala med industriellt producerade lösningar.

En annan väg som undersökts av svenska forskare är att på enzymatisk väg överföra xylos till xylulos. Xylulos kan nämligen jäsas av den vanliga jästen. (Hahn-Hägerdahl)

4.2.6 Upparbetning av mäskan

Etanolkoncentrationen i mäskan ligger intervallet 6-15%. Före användningen av etanol för bränsleändamål måste koncentrationen höjas. Två olika etanolkvaliteter förekommer på marknaden med etanolhalt på 95% respektive 99,5%.

Destillation är den uppberedningsmetod som används kommersiellt. Den består i huvudsak av två steg; uppkoncentrering i en förstärkarkolonn till en koncentration strax under den azeotropa sammansättningen ($< 95,5\%$) och därefter avvattnings av den uppkoncentrerade etanolen, sk absolutering, om 99,5%-ig etanol önskas. Absoluteringen genomförs vanligtvis genom azeotropdestillation med ett lågkokande lösningsmedel. Normalt används cyklohexan.

Destillationen är ett mycket energikrävande steg. Det totala energibehovet kan reduceras genom värmeintegrering av uppkoncentrerings- och absoluteringssteget. Betydande energivinster kan göras om etanolanläggningen kan läggas i anslutning till annan verksamhet med överskott av tex lågvärdig energi, t ex lågtemperaturånga, som kan utnyttjas för etanoluppberedning. Av stor betydelse för energibehovet är också mäskans ursprungliga etanolkoncentration.

Andra metoder för uppberedning av etanol har också studerats och kan i framtiden minska kostnaderna för uppberedningssteget. Exempel på tänkbara framtida uppberedningsmetoder är membrantechnik och vätskeextraktion.

4.2.7 Biproduktanvändning

Vid etanolframställning bildas en rad biprodukter, dels som rester när de jäsbara fraktionerna separerats bort dels i form av koldioxid som bildas vid fermenteringen. Avsättningen av biprodukterna är avgörande för etanolproduktionens ekonomi.

Diskussionerna som gäller etanolframställning från både stärkelserika råvaror och från lignocellulosa har allt mer kommit att kretsa kring processer där flera produkter produceras från råvaran varav etanol är en. Etanol är inte självklart den mest betydelsefulla produkten varför det för dessa processer egentligen inte är relevant att tala om biprodukter. Exempel på sådana kombinatprocesser är Biostilprocessen, där en foderprodukt samt koldioxid produceras förutom etanol, och CASH-processen där ett bränslepulver produceras.

Lignin kan inte jäsas till etanol och kommer därför att vara den dominerande biprodukten vid en storskalig produktion av etanol från lignocellulosa. Det primära användningsområdet för lignin torde vara som bränsle. Forskning och utveckling pågår för att genom pyrolys eller förvätskningsteknik överföra lignin till ett flytande bränsle. Man har kunnat producera en vätskeformig produkt men den kräver

omfattande raffinering och behandling för att bli användbar som ett kommersiellt drivmedel. Utveckling av en process pågår vid SERI (Solar Energy Research Institute i USA) för att överföra lignin till en blandning av fenoliska föreningar och sedan låta dessa reagera till metyl-aryletrar (Wright). Metyl-aryletrar kan användas som oktanhöjare i bensin.

Xylos som bildas vid hydrolys av hemicellulosa kan omvandlas till furfural, en kemikalie med ett förhållandevis högt värde. Marknaden bedöms dock vara så liten att furfural endast kan få en mycket begränsad ekonomisk betydelse.

4.2.8 Processexempel

Stärkelseråvara

Biostilprocessen är ett exempel på en modern energiekonomisk process för framställning av etanol ur stärkelseråvara. Processen har utvecklats av Alfa Laval och marknadsförs nu av Nobel Chematur AB. Den finns bla demonstrerad i en pilotanläggning i Lidköping. Biostilprocessen har varit föremål för studier i samband med planer på att bygga en större svensk etanolanläggning baserad på spannmål.

Biostilprocessen bygger på en kontinuerlig jäsning med jäst- och substratrecirkulering. Processen har en långtgående energiintegrering vilket ger ett mycket lågt energibehov. Från processen produceras förutom etanol också koldioxid och en foderprodukt i de proportioner som visas i tabell 4.2.

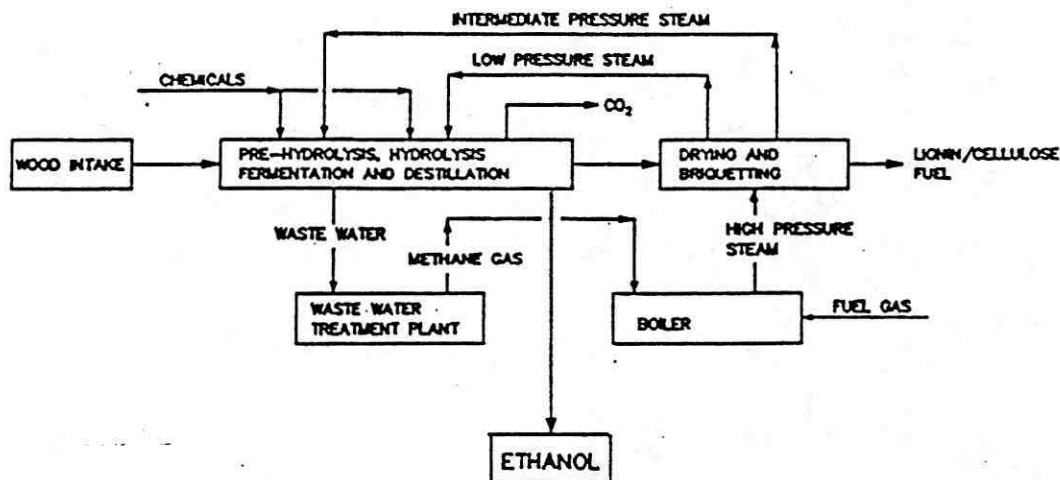
Produkt	Årsproduktion (ton/år)
etanol	66 000
proteinfoder	66 000
koldioxid	25 000

Tabell 4.2 Produktmängder från en fullskaleanläggning enligt Biostilkonceptet.

Energiverkningsgraden (förhållandet mellan energiinnehållet i den producerade etanolen och tillförd energi dels i form av råvara dels som processenergi) för processen kan uppskattas till 0,31 (Dahlgren). Av den insatta energin är cirka 2% el, 9% processvärme och resten energivärdet i råvaran.

Cellulosaråvara

CASH-processen är exempel på ett processkoncept för etanolproduktion från lignocellulosa. Ett förenklat processschema visas i figur 4.2. Processen är snarast att se som ett energikombinat som producerar flera olika bränslen. CASH-processen baseras på sur hydrolys i två steg. I det första steget hydrolyseras hemicellulosan med SO₂ under 30 min. Därefter hydrolyseras cellulosafraktionen med saltsyra vid hög temperatur i 10-30 sekunder. I det första steget överförs cirka 90 % av hexoserna i hemicellulosan till jäsbar form medan endast 50% av cellulosan överförs till jäsbart socker i det andra steget. Av resterande cellulosa samt råvarans ligninfraktion produceras ett högvärdigt pulverbränsle.



Figur 4.2 Principschema för CASH-processen.

Avloppsvattnet från processen innehåller betydande mängder organiskt material huvudsakligen härrörande från hemicellulosans pentosdel. Vattnet renas genom en anaerob reningsprocess som ger en metanrik biogas som produkt. Biogasen används för att täcka en del av energibehovet i processen.

Energiverkningsgraden för CASH-processen är omkring 0,25. Då är energiverkningsgraden räknad endast till etanol. Om även ligninbränslet räknas som produkt fås en energiverkningsgrad på omkring 0,6.

Ett mycket intressant variant på processen är att endast utrusta anläggningen med det första hydrolyssteg. På så sätt hydrolyseras hemicellulosan och alkohol kan produceras från hemicellulosans hexosfraktion. Hela cellulosafraktionen tillsammans med ligninet används sedan för att producera ett fast bränsle. Ekonomiska beräkningar visar att med en sådan processutformning kan etanol produceras till mycket låg kostnad. Processekonomi förutsätter dock att pulverbränslet kan avsättas i tillräcklig omfattning och till tillräckligt högt pris. Energiverkningsgraden till etanol blir låg, 0,11. Räknas istället energiverkningsgraden till bränsleprodukter blir den i gengäld mycket hög 0,79.

4.3 Emissioner

Tillverkning av etanol från biobränslen ger inget nettoutsläpp av koldioxid förutom den del som härrör från transporter av råvaror och produktion av den el som utnyttjas i processen i de fall då fossila bränslen används för elproduktionen. På samma sätt är utsläppen av svaveloxider ytterst små. Produktion av processvärme förutsätts ske med biobränslen.

Vid produktion av etanol från spannmål ger användningen av fossilbaserade gödningsmedel ett koldioxidutsläpp som motsvarar cirka 300 kg/m³ etanol.

Produktion från lignocellulosa ger avloppsvattenstömmar med ett högt innehåll av organiskt material. Utan rening kan avloppsvattnet orsaka allvarliga miljöproblem. De organiska föroreningarna kan avlägsnas med användning av ett anaerobt filter som producerar metangas från det organiska materialet i avloppsvattnet. Metangasen kan användas för att täcka värmebehov i processen.

4.4 Potential

Potentialen för stärkelsebaserad etanolproduktion begränsas i första hand av avsättningen för det proteinfoder som bildas som biprodukt till alkoholen. För att nå en rimlig ekonomi krävs att all foderprodukt kan avsättas till de priser som motsvarande foderprodukter har idag. Detta begränsar potentialen för spannmålsbaserad etanolproduktion till omkring 120 000 ton etanol/år vilket motsvarar två fullskalanläggningar av den storleken som idag diskuteras att uppföras i Sverige.

Potentialen för cellulosebaserad etanolproduktion begränsas i första hand av råvarutillgången. Avsättningen av ligninbränsle är troligen inte en begränsande faktor. Aktuella råvaror är avverkningsrester, spån, industriavfall, träpulver, halm, papper och energiskog. Stiftelsen Svensk Etanolutveckling har uppskattat den idag praktiskt möjliga produktionsnivån från dessa råvaror till 1,8 Mton med en medelhög utnyttjningsgrad. Motsvarande nivå för år 2015 har uppskattats till 2,5 Mton. Skillnaden ligger i ett högre utnyttjande av råvaran genom att tekniken för pentosjäsning utvecklats samt ett effektivare utnyttjande av cellulosan för etanolproduktion (Bengtsson).

4.5 Kostnader, marknadspriser

Priset för etanol (95 %) har under de senaste åren legat på i medeltal 2,70 kr/l (Östman). Priserna varierar dock mycket kraftigt beroende på etanolkvalitet och tillfälliga förändringar i utbudet. Faktorer som har påverkat etanolpriset i Sverige är tex utförsäljningen av alkohol framställd ur det europeiska vinöverskottet och en tillfälligt stor produktion av sulfitsprit till följd av en hög massaproduktion. Kostnaden för absoluterad etanol (99,5%) ligger 50-60 öre/l över priset för 95 %-ig etanol.

Produktionskostnaden för etanol från spannmål är kraftigt beroende av kostnaden för råvaran (dvs spannmålspriset) och av avsättningen för biprodukterna. Vilket pris som ska sättas på råvaran är till stora delar en politisk fråga. Produktionskostnaden för etanol med Biostilprocessen har beräknats till 3,53 kr/l med ett spannmålspris baserat på en kombination av världsmarknadspris och inhemskt spannmålspris (gränsskyddsnivån) och under förutsättning att allt proteinfoder kan avsättas till ett pris som motsvarar värdet av det ersatta fodret. Om stora mängder proteinfoder från spannmålsbaserad etanolproduktion kommer ut på marknaden är det dock troligt att detta påverkar foderpriset vilket i sin tur påverkar kostnaderna för etanolproduktionen.

Produktionskostnaderna från lignocellulosa varierar mycket beroende på processutformningen och krediteringen för biprodukter. Med CASH-processen enligt konceptet med tvåstegshydrolys har kostnaderna beräknats till 3,45 kr/l 95%-ig etanol. Om processen istället bygger på att endast hemicellulosan utnyttjas för etanolproduktion och en större mängd pulverbränsle produceras har produktionskostnaden för alkoholen beräknats till 1,80 kr/l. Beräkningarna förutsätter att pulverbränslet kan avsättas till ett pris av 140 kr/MWh.

Råvaru-
kostnad 2
(5-60 kr/kWh)
400 kr/t

Om pulverbränslets värde istället sättes till 120 kr/MWh förändras produktionskostnaden för etanolen till 3,80 kr/l i fallet med tvåstegshydrolys och till cirka 2,80 kr/l med etanolproduktion endast från hemicellulosafraktionen.

Produktionskostnaden från melass kan grovt uppskattas till cirka 3,90 kr/l.

Kostnaderna sammanfattas i tabell 4.3.

		kr/l	öre/kWh
Melass		3,90	66
Spannmål		3,53	60
Lignocellulosa			
2-steps hydrolys	intäkt pulverbränsle:		
	140 kr/MWh	3,45	58
	120 kr/MWh	3,80	64
1-steps hydrolys	140 kr/MWh	1,80	30
	120 kr/MWh	2,80	48
Marknadspris		2,70	46

Tabell 4.3. Produktionskostnaden för etanol tillverkad i Sverige med inhemska råvaror.

5. DISTRIBUTION OCH LAGRING AV ALKOHOLBRÄNSLEN

Alkoholerna tillhör volymmässigt de största industrikemikalierna med väl etablerad hanteringsteknik och kan som flytande drivmedel distribueras på samma sätt som bensin. Introduktion av alkoholer som drivmedel sker naturligen genom distribution i det befintliga systemet för bensin/dieselolja, som de avser att partiellt ersätta.

Sammanfattningsvis kan konstateras

- att distribution av alkoholer i det nuvarande bensinsystemet kräver anpassningar med hänsyn till ändrade (större) volymer, transportvägar och material i systemet, varvid merkostnader uppkommer,
- att betydande investeringar behöver göras i hela distributionskedjan med tyngdpunkt på bensinstationerna; detta belyses i ett exempel i tabell 5.1 ur en studie för Norge,
- att dessa kostnader dock inte motsvarar mer än några få öre/liter merkostnad,
- att drastisk reduktion av denna merkostnad kan uppnås om introduktionen förbereds genom att föreskriva att hänsyn skall tas beträffande materialval vid normalt underhåll och normala förnyelser i distributionskedjan,
- att den totala merkostnaden för distributionen beräknas till cirka 30 % av nuvarande distributionskostnad (cirka 80 öre/liter eller ca 8,5 öre/kWh) med nedanstående fördelning

oceantransport	4 öre/liter bensin/dieseloljeekvivalent
kustsjöfart	5 " "
depålagring	5 " "
tankbilstransport	5 " "
stationslagring	3 " "
summa	22 " " (ca 2,3 öre/kWh)

Den totala distributionskostnaden för alkoholdrivmedel kan alltså uppskattas till drygt 1 kr/liter bensin/dieseloljeekvivalent (ca 11 öre/kWh) motsvarande ca 45-50 öre/liter metanol eller ca 60-65 öre/liter etanol.

En utförligare beskrivning av teknik och kostnader för distribution av drivmedelsalkohol i anpassat befintligt system för bensin och dieselolja ges i bilaga C.

Alkoholer omfattas av Lagen för brandfarliga och explosiva varor (SFS 1988:868) samt av Förordningen om brandfarliga och explosiva varor (SFS 1988:1145). Alkoholer är (liksom bensin) klassade som klass 1-vara (mer brandfarlig/explosiv) till skillnad från t ex eldningsolja som är klassificerad som 3. Vid övergång från eldningsoljor till alkoholer (t ex pannor) måste därför lagrings- och bränslehanteringsutrustningar anpassas till de strängare kraven.

TABELL 5.1

KOSTNADER VID METANOLINTRODUKTION

<u>DISTRIBUTION</u>			MSEK
Depåer: Tankar, konvertering	100.000 m ³ à 100 kr		10
Tankar, nya	100.000 m ³ à 600 kr		60
Utlastningsramper, ångåtervinning	15 à 6 Mkr		90
Diverse	15 à 1 Mkr		15
Tankbilar: Renovering	150 à 10.000 kr		2
Nya	100 à 1,2 Mkr		120
Tankningsstationer:			
Tankar, renovering	1.000 à 30.000 kr		30
Tankar, nya	1.000 à 150.000 kr		150
Pumpar, nya	2.000 à 90.000 kr		180
Delsumma			657
<u>FORDON, merkostnader</u>			
Lätta fordon (ottomotor)	885.000 à 1.000 kr		885
Lätta fordon (dieselmotor)	52.000 à 7.000 kr		365
Medeltunga fordon (diesel)	10.000 à 12.000 kr		120
Bussar (dieselmotor)	9.000 à 25.000 kr		225
Delsumma			1.595
Totalsumma			2.250

6. FORDON MED ALKHOLMOTORER

Utvecklingsarbetet med alkoholdrivna motorer började i slutet på 60-talet i USA men blev mer omfattande efter oljekrisen 73/74. Intresset har nästan helt varit inriktat på otto- och dieselkolvmotorer. Mycket litet arbete synes ha gjorts med alternativa motorer, som, med undantag för bränslecellen, inte är specifika för särskilda drivmedel.

Sammanfattningsvis kan konstateras

-- att oxygenater, främst metanolderivatet MTBE och etanol, av hälso- och miljöskäl gjorts till obligatoriska komponenter i en stor del av amerikansk bensin,

-- att alkoholerna kan vara drivmedel med potential till effektivare ottomotorer än med bensin (5-20 % lägre bränsleförbrukning beroende på graden av optimering av motor och fordon; figur 6.1) och minst lika effektiva som dieselmotorn med dieselolja,

-- att alkoholdrift av lätta bilar sker allmänt i Brasilien (etanol) och står inför introduktion som "rent drivmedel" i Kalifornien (naturgasbaserad metanol, M85) med både hälso/miljö- och försörjningsskäl som motiv; efter utvecklingsarbeten sedan slutet av 70-talet har utvecklingen nått stadiet att flera tillverkare förklarat sig kunna tillverka bilar med drivmedelsflexibilitet (kan köras på både alkoholer och bensin eller blandningar därav, vilket underlättar under uppbyggnaden av distributionen); bilarna kännetecknas förutom av lägre förbrukning av drivmedel (räknat i energitermer) av att de kan uppfylla de framtida kraven för lågemissionsfordon (tabell 6.1),

-- att alkoholdrift av personbilar demonstrerats i liten skala även i Sverige med bl.a. Saab- och Volvo-bilar och att Volvo deltar i demonstrationen i Kalifornien med drivmedelsflexibla bilar,

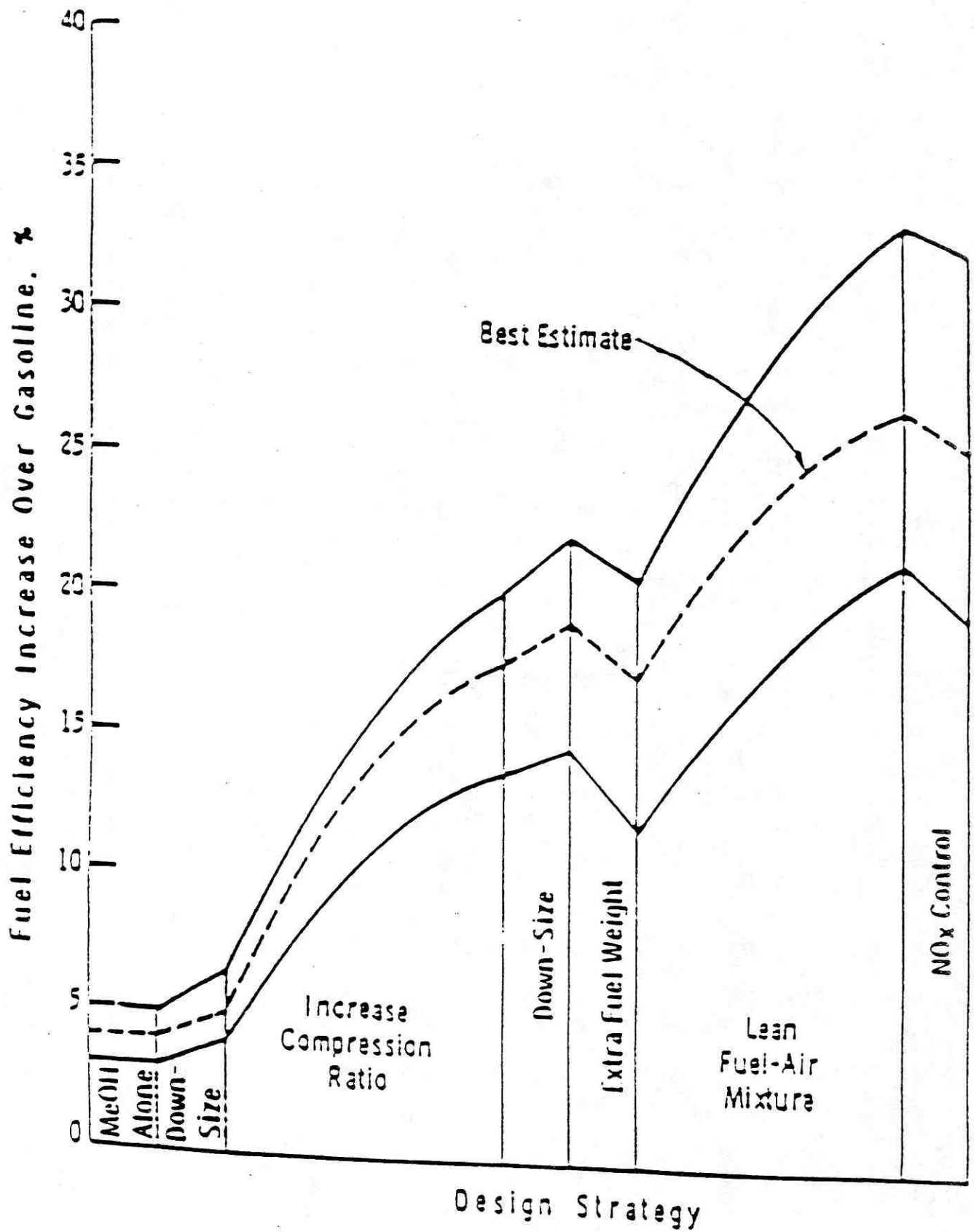
-- att alkoholdrift av dieselmotorer utvecklats till stadiet att minst två tillverkare marknadsfört alkoholmotorer, som kan möta de nya kaliforniska kraven från 1994; demonstration har skett framför allt i nischen bussmotorer för tätorter men även för tunga lastbilar,

-- att avgasutsläppen från alkoholdrift (tabell 6.2 leder till mindre försurande utsläpp, ytterligare minskar dieselmotorns ozonbildande potential och kraftigt minskar utsläpp av partiklar och cancerframkallande ämnen, (låg mutagenitet)

-- att demonstration av bussdrift sker även i Sverige med 32 Scania-bussar med dieselmotorer för etanol,

-- att merkostnader för fordon för alkoholdrift är låga (någon eller några få procent) och lägst av alla möjligheter för drift med alternativa drivmedel; total merkostnad för samhället måste inkludera även drivmedelskostnaden (kap. 3 och 4), som för metanol ur naturgas vid källan är billigast av alkoholerna och normalt i importhamn ligger vid eller något under 60 % av priset på bensin (på viktsbas); mot merkostnaden för alternativt drivmedel skall ställas lägre kostnader för samhället för hälso- och miljöskador och ev. även för försörjningssäkerhet, kostnader som ännu inte kunnat beräknas,

FIGURE 6.1.



Note: Figure taken from "The Outlook for Use of Methanol as a Transportation Fuel," Chevron U.S.A., Inc., January 1985.

TABELL 6.1.

Emission Standards (g/mi)

	<u>NMOG</u>	<u>NOx</u>
TLEVs	0.125	0.4
LEVs	0.075	0.2
ULEVs	0.04	0.2

Note: recently adopted California standard is 0.25 NMHC; existing standard is 0.39 NMHC

Reactivity Adjustment

- o NMOG standards to be adjusted for fuels cleaner than conventional gasoline
- o Maximum incremental reactivity method

NMOG = Non-Methane Organic Gases

NMHC = Non-Methane Hydrocarbons

TLEV, LEV, ULEV = Transitional, Low-emission, Ultra Low-emission Vehicle

Toxics Standards (mg/mi)

	<u>Benzene</u>	<u>HCHO</u>
TLEVs	6	15
LEVs	4	15
ULEVs	2	8

TABELL 6.2

Katalys.	Dieselolja		Metanol	Etanol	
	utan	med	med	med	
CO ₂	1140	1180	1080	1120	g/km
CO	4	0,5	0,5	0,5	g/km
HC	1,4	0,2	0,8*	0,8*	g/km
NOx	16	16	8	10	g/km
Partiklar	0,5	0,2	0,1	0,1	g/km
Metan	id	id	id	id	
Formald.	100	20	150	60	mg/km
Acetald.	70	25	(5)	80	mg/km
Bensen	15	id	(0)	(0)	mg/km
Eten, prop.	100	70	id	40	mg/km
PAC (Σ14)	200	70	(20)	6	μg/km
Mutagen. (TA98-S9)	300+	200	id	20	rev/m

Anm. id = inga data

* e; HC utan mest oxygenater

() uppskattat, inga säkra data

+ gasfas-bidrag osäkert

Σ14 avser summan av 14 identifierade PAC

-- att bedömningarna om den totala, långsiktiga kostnadsbilden för nya bränslen (inkl. förbättrade konventionella från nya raffinaderier) har inget entydigt svar angående klart bästa alternativ. Det finns bedömare som anger att metanol kan vara konkurrenskraftig med bensin redan i dag, sedan tröskelkostnader för introduktion övervunnits, och andra bedömare som anser att metanol inte kan konkurrera förrän oljepriset stigit väsentligt.

En fylligare beskrivning av resultaten från utvecklingarna och demonstrationerna av alkoholdrivna fordon ges i bilaga B.

7. ELPRODUKTION-GASTURBINER

Metanol som bränsle i gasturbiner för elproduktion har studerats under 80-talet bl. a. i USA, Japan och Italien. Främsta skälen till detta är att metanoldrivna gasturbiner ger mindre skadliga emissioner än naturgas och oljor, och därför betraktas som en intressant möjlighet vid lokalisering i tätbebyggelse och andra områden där särskilt stränga miljökrav kan förväntas.

Avgasvärmets från en gasturbin kan även användas för reformering (spaltning) eller ångreformering (med ångtillsats) av metanol till en gas bestående av koloxider och vätgas, varvid gasblandningen utgör gasturbinbränsle. Detta ger högre verkningsgrad från metanol till elektricitet samtidigt med mycket små mängder skadliga emissioner. Studier har skett främst i Japan och USA. I Sverige har en projekteringsuppgift genomförts vid KTH.

7.1. Metanol som gasturbinbränsle

7.1.1. Teknikstatus, verkningsgrader

Metanol kan användas som gasturbinbränsle i flytande eller i förångad form, och har flera fördelar (Banti 1988, Anderson 1983):

- god förbränning tack vare stabil flamma vid varierande luft/bränsleförhållanden och goda tändegenskaper
- ökad driftsäkerhet tack vare jämn temperaturfördelning i brännkammaren och lägre flamtemperatur (50-100°C) än konventionella flytande bränslen
- längre livslängd på turbinblad; tack vare avsaknad av alkalimetaller och aska (stoft), d.v.s. inga problem med erosion och högtemperaturkorrosion
- minskade utsläpp av kväveoxider p.g.a. lägre flamtemperatur och avsaknad av kväve i bränslet
- inga utsläpp av partiklar/sot eller svaveloxider
- större massflöde av förbränningsprodukter (per energienhet) genom turbinen ökar dess verkningsgrad (Bardon, 1980)

Mindre modifieringar i bränsletillförselsystemet krävs dock:

- fördubblad kapacitet p.g.a. lägre specifikt förbränningsvärme
- bränsletillsatser eller extra smörjningssystem, då metanol har dåliga smörjningsegenskaper
- val av tätningsmaterial som ej sväller eller mjuknar i kontakt med metanol
- åtgärder för att undvika absorption av för mycket vatten

Ett testprogram omfattande mer än 500 h drift av en 26 MW gasturbin med metanol har genomförts av Southern California Edison med finansiering från EPRI (Danko 1981).

Beräkningar av verkningsgrader, investering och driftkostnader för metanoldrift av en 25 MW gasturbin (Nuovo Pignone/General Electric MS 5001) tillsammans med 44 MW värmeproduktion har gjorts i Italien av Nuovo Pignone (Banti, 1988). Chiyoda Corporation i Japan har räknat igenom ett antal gasturbincykler (Aoki, 1988). Parameterstudier (Kanada) för metanol och etanol som gasturbinbränsle har visat att turbiner som är dimensionerande speciellt för alkoholer ger de effektivaste cyklerna (Bardon, 1980).

I Sverige (KTH) har beräkningar utförts för drift av en gasturbin typ ABB GT 35 med förångad metanol (Granquist, 1990).

Beräknade verkningsgrader beror av turbintyp och processutformning (cykel). Turbinutvecklingen går bl. a. mot allt högre temperatur på rökgasen in till turbinen, då detta ökar elverkningsgraden. Elverkningsgraden kan ökas (med ca 10 %) genom att turbinens avgasvärme utvinns i en ångturbincykel (kombicykel). En annan möjlighet är att istället generera ånga som injiceras i gasturbinens brännkammare (STIG, Steam Injection Gas Turbine). Turbininloppstemperaturen kan då hållas tillräckligt låg med ett lägre luftöverskott, resulterande i minskad energiåtgång för luftkompression och därmed ökad elverkningsgrad (ca 10-14 % för metanoldrift). STIG bör dock betraktas som en mer framtida teknik, då endast ett fåtal gasturbiner utformade för ånginjicering ännu finns på marknaden. Dessutom blir matarvattenförbrukningen hög.

Exempel på verkningsgrader redovisas i nedanstående tabell:

	Eleffekt MW	Turbininlopps- temperatur, °C	El- verkningsgrad,* %
Utan ånginjicering			
Gasturbin General Electric/ Nuovo Pignone MS 5001 (Bantil 1988)			
Enkel cykel 44 MW värme ur avgaspanna -metanol	25	-	27 (totalverkningsgrad 74 %)
Gasturbin ABB GT 35 (Granquist, 1990)			
Enkel cykel			
-naturgas	15,6	835	31
-förångad metanol	17,2	835	35
Chiyoda Corp., Japan (Aoki, 1988)			
Enkel cykel			
-LNG, olja, metanol	-	ca 1100	34
kombicykel			
-LNG, olja, metanol	-	ca 1100	46
Med ånginjicering			
Chiyoda Corp., Japan (Aoki, 1988)			
STIG			
-LNG, olja	-	ca 1100	44
-förångad metanol	-	ca 1100	44-48

*Baserad på effektiva värmevärden

7.1.2. Emissioner

Gasturbintester (Danko 1981, Southern California Edison) med etanoldrift har resulterat i kväveoxidhalter (NO_x vid 15 % syrgas) på 45 (volym) ppm i turbinavgaserna jämfört med 110 ppm för naturgasdrift. Vatteninsprutning (0,2 kg ånga/kg metanol) minskade halten ytterligare, ned till 20 ppm jämfört med 55 ppm för naturgasdrift med vatteninsprutning (0,3 kg ånga/kg metanol). Uppskattningar för ökad vatteninsprutning (1,0 kg ånga/kg metanol resp. naturgas) resulterade i 5 ppm resp. 13 ppm. Omräknat till producerad nyttig energi fås följande värden; (Anderson, 1983):

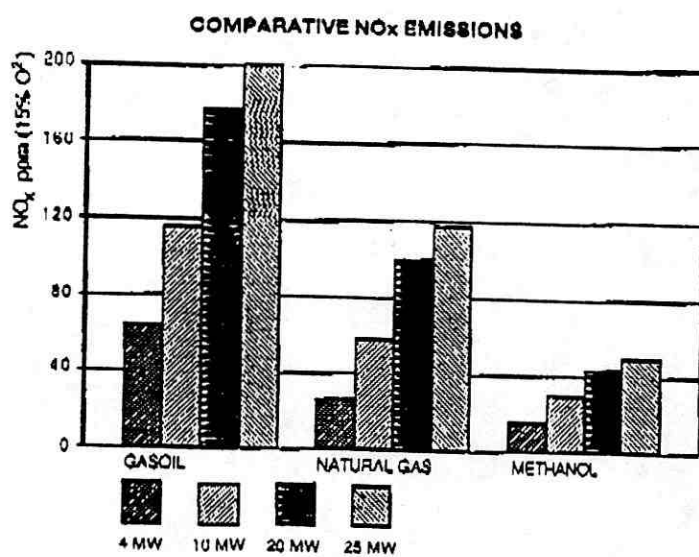
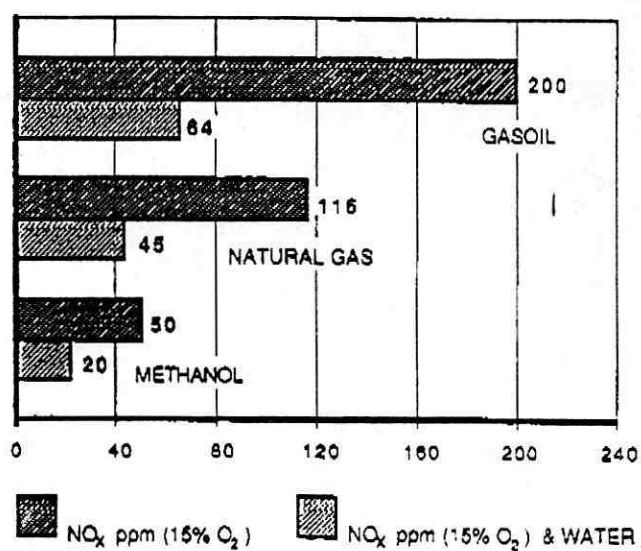
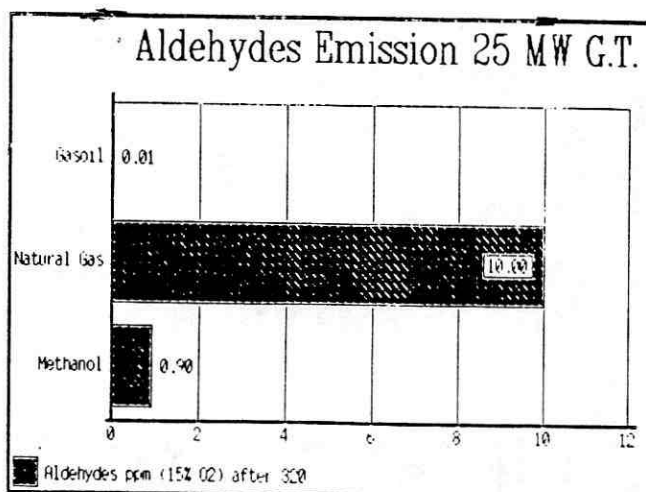
	mg NO _x /MJ nyttiggjord energi
<u>Naturgasdrift</u>	730
0,3 kg ånga/kg naturgas	370
1 kg ånga/kg naturgas (uppskattat)	80
<u>Metanoldrift</u>	340
0,2 kg ånga/kg metanol	150
1 kg ånga/kg metanol (uppskattat)	40

Med hänsyn tagen till turbinernas sannolika elverkningsgrader (storleksordningen 30-35 %) torde NO_x-utsläppen räknat per MJ tillfört bränsle motsvara ungefär en tredjedel av ovanstående värden. Metanoldrift med ånginsprutning (0,2 kg ånga/kg metanol, 20 ppm NO_x i avgasen) borde då ge ungefär 50 mg NO_x/MJ tillfört bränsle, vilket är i nivå med förväntade svenska normer.

I den italienska studien (Banti, 1988) presenteras liknande värden. Se figur 7.1. Där framgår också att emissioner av aldehyder vid metanoldrift blir högre än vid drift med gasolja men betydligt lägre än vid drift med naturgas.

Utsläpp av svaveloxider och partiklar/sot blir som tidigare nämnts försumbara vid metanoldrift.

Figur 7.1. Emissioner vid metanoldrift avgasturbiner (Banti, 1988)

**NO_x EMISSION 25 MW G.T.****Aldehydes Emission 25 MW G.T.**

7.1.3. Kostnader

Skillnaden i investering och driftkostnader mellan metanoldrift och drift med naturgas resp. gasolja har beräknats för en 25 MW gasturbin (Nuovo Pignone/General Electric MS 5001) av Nuovo Pinnone i Italien (Banti, 1988).

Om miljökraven vad avser kväveoxidutsläpp antas motsvara 20 ppm NO_x i turbinavgasen förändras investeringen för metanoldrift jämfört med naturgasdrift enligt nedan:

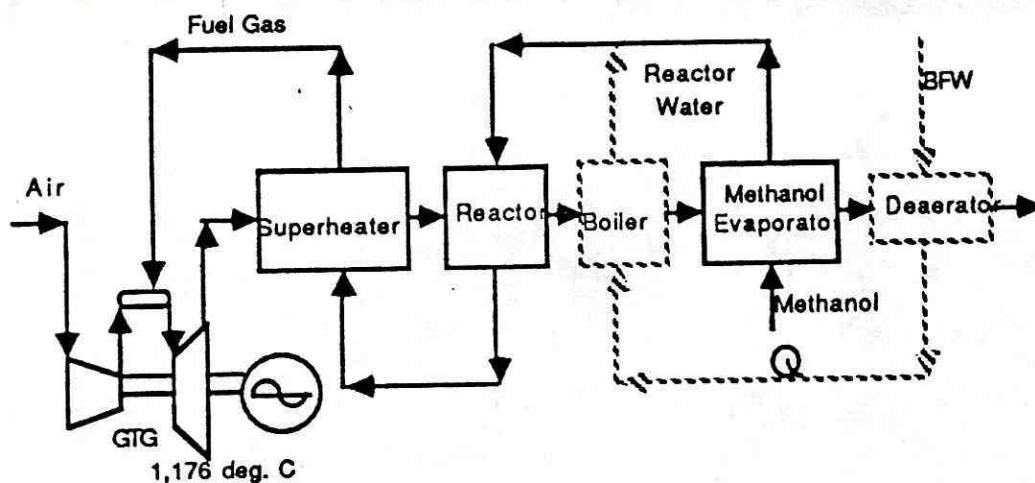
	MSEK	KSEK/kWhel
-ändringar i bränslesystem	+5,2	+0,21
-ingen kväveoxidrening i avgasen för metanoldrift (vatteninsprutning tillräckligt)	-10,2	-0,41
-förändring i investering	-5,0	-0,20

Produktionskostnaden för el (25 MW) plus värme (44 MW) (totalverkningsgrad 74 % och ca 7500 drifttimmar/år) exklusive bränslekostnad minskar obetydligt vid metanoldrift - med 0,3 öre/kWh jämfört med drift med naturgas resp. 0,6 öre/kWh jämfört med gasololjedrift. Helt avgörande för produktionskostnadens förändring är det högre bränslepriset för metanol jämfört med både naturgas och gasolja. 1988 kostade exempelvis metanol minst 3 ggr mer per energienhet (ca 180 USD/ton eller ca 20 öre/kWh) än naturgas (ca 7 öre/kWh). För dessa förhållanden beräknades bränslekostnaden jämfört med naturgasdrift öka med ca 18 öre/kWh producerad el plus värme. Jämfört med gasoljedrift beräknades ökningen till ca 12 öre/kWh producerad el plus värme.

7.2. Reformerad/ångreformerad metanol som gasturbinbränsle

7.2.1. Teknikstatus, verkningsgrader

Genom att utnyttja gasturbinens avgasvärme (ca 350-600°C beroende på gasturbin) för elproduktion kan elutbytet ökas. En möjlighet med metanol som bränsle är att utnyttja värmets till att förånga och sedan reformera ("spalta") metanol till kolmonoxid och vätgas över en katalysator vid 230-350°C. Man kan dessutom förånga vatten och låta vattenångan reagera med förångad metanol över katalysatorn (ångformering), varvid man erhåller en blandning av kolmonoxid, koldioxid och vätgas. Den producerade gasen används sedan som bränsle i gasturbinen, eventuellt efter överhettning. Avgasen kyls då till ca 200-300°C. Beroende på turbintyp och processutformning har elverkningsgraden beräknats bli ca 5-10 % högre än för endast metanoldriven gasturbin (s.k. enkel cykel). (Aoki 1988, Granquist 1990). Ett principalschema visas i figur 7.2.



Catalytic Decomposition ; Reactor Water/Methanol Mol Ratio = 0

Steam Reforming ; Reactor Water/Methanol Mol Ratio = 1

Fig 7.2. Gasturbincykel för reformerad eller ångreformerad metanol. Principschema (Aoki, 1988).

Beräkningar i Japan har även gjorts för användning av turbiner med ånginjicering, varvid en del av ångan överhettas och leds direkt till gasturbinens brännkammare (Aoki 1988, Baba 1988). För drift med reformerad eller ångreformerad metanol blir elverkningsgraden då ytterligare ca 5 % högre (Aoki 1988). Detta bör dock betraktas som en mer framtida teknik, då endast ett fåtal turbiner utformade för ånginjicering ännu finns på marknaden. Dessutom blir matarvattenförbrukningen hög.

Tester med drift av gasturbiner med reformerad metanol har genomförts i USA (Solar Energy Research Institute) och bl.a. resulterat i mycket låga kväveoxidhalter i avgasen (Karpuk, 1984). Förbränningsförsök har genomförts i Japan och bl.a. visat att reformerad/ångreformerad metanol har goda förbränningsegenskaper samt att kväveoxidutsläppen kan minskas avsevärt genom tvåstegsförbränning och ånginjicering (Abe, 1988).

De verkningsgrader som beräknats för drift med reformerad/ångreformerad metanol kan sammanfattas i nedanstående tabell:

	Eleffekt MW	Turbininlopps- Temperatur, °C	El- verkningsgrad,* %
Utan ånginjicering			
Gasturbin ABB GT35 (Granquist, 1990)			
-reformerad metanol	16,9	835	40
-ångreformerad metanol	18,1	835	40
Chiyoda Corp., Japan (Aoki, 1988)			
-reformerad metanol	-	1100	45
-ångreformerad metanol	-	1100	45
Med ånginjicering			
Chugoku Electric Power Co, Japan (Baba, 1988)			
-ångreformerad metanol	10	1150	45
	100	1150	47
Chiyoda Corp., Japan (Aoki, 1988)			
-reformerad metanol	-	1100	51
-ångreformerad metanol	-	1100	50

*Baserat på effektiva värmevärden

7.2.2. Emissioner

De försök med drift av en gasturbin med reformerad metanol som gjorts i USA (Karpuk, 1984) resulterade i kväveoxidhalter i avgasen som var ca 6 gånger lägre än vid metanoldrift. Jämförda med resultaten från Southern California Edison's tester med metanoldrift (se avsnitt 7.1.2) skulle detta motsvara ca 8 ppm NO_x (15 % syrgas) i avgasen eller ca 60 mg NO_x/MJ myttiggjord energi utan vatteninsprutning. Med 40-50 % verkningsgrad blir detta mindre än 30 mg NO_x/MJ bränsle, dvs i nivå med förväntade svenska normer. Förbränningstester vid Mitsui Engineering & Shipbuilding Co i Japan (Abe, 1988) har också visat på goda möjligheter att hålla kväveoxidutsläppen låga genom tvåstegsförbränning. Ånginjicering minskade kväveoxidutsläppen på ett likartat sätt för ett antal olika bränslen.

På samma sätt som vid metanoldrift fås inga utsläpp av partiklar/sot eller svaveloxider.

7.2.3. Kostnader

I Sverige (KTH) har investering och driftkostnader för drift av en gasturbin typ ABB GT 35 (16,9 MW el) med reformerad metanol beräknats (Granquist, 1990).

Investeringen beräknades till 68 MSEK.

Driftkostnaden exklusive bränslekostnad beräknades till 42 öre/kW el för 2400 drifttimmar/år. För 6000 drifttimmar/år blir den knappt 20 öre lägre, d.v.s. knappt 25 öre/kWh el.

Störst inverkan på produktionskostnaden har bränslepriset. Vid ett metanolpris på ca 180 USD/ton eller ca 20 öre/kWh metanol blir bränslekostnaden ca 50 öre/kWh el.

Ovanstående ger en total produktionskostnad av ca 75 öre/kWh eller drygt 90 öre/kWh el för 6000 resp. 2400 drifttimmar/år.

8. ELPRODUKTION - STATIONÄRA KOLVMOTORER

Metanoldrift av stationära dieselmotorer för elproduktion och andra industriella tillämpningar har studerats i Japan under 1980-talet. Främsta orsaken är de miljöfördelar som kan uppnås med metanol jämfört med användning av petroleumbränslen eller naturgas.

8.1 Teknikstatus, verkningsgrader

För de motorstorlekar som är aktuella har man valt att studera dieselmotorer som modifierats för metanol. Viktiga faktorer är bl a (Kajiwara, 1988, Murayama, 1988):

- Tändning och flamutbredning. Metanol självantänder ej, utan andra metoder, såsom pilotbränsle eller tändstift erfordras.
- Förbränning av metanol-luftblandning i stora motorer (cylindrar)
- Driftsäkerhet vid höga laster.

Modifiering av stationära motorer till metanoldrift förenklas (jämfört med för motorer i fordon) av drift vid konstant varvtal, mindre lastvariationer, mindre krav på snabba kallstarter och avsaknad av fysiska storleksbegränsningar.

Motortester med metandrift (några hundra timmars drift, ca 40 kW motoreffekt har genomförts vid Hokkaido University (Murayama, 1988). Något högre verkningsgrader än vid naturgasdrift uppnåddes (för den aktuella motorn ca 37 %).

En studie av metanoldrivna stationära motorer (400-2000 kW uteffekt) för bl a elkraft och kraftvärmetillämpningar har genomförts av Mitsubishi Heavy Industries (Kajiwara 1988).

8.2 Emissioner

Motortesterna med metanoldrift vid Hokkaido University (Murayama, 1988) resulterade i kväveoxidhalter i motorns avgaser på ca 500 ppm, vilket var betydligt lägre än vid naturgasdrift. Man anser att halten bör kunna sänkas ytterligare. En oxidationskatalysator erfordrades för att reducera halterna av oförbränd metanol och formaldehyd (ner till ca 500 ppm resp ca 10-20 ppm) i avgaserna.

8.3 Kostnader

Ekonomiska beräkningar för kraftvärmeproduktion med en 400 kW stationär motor har genomförts av Mitsubishi Heavy Industries (Kajiwara). Resultaten presenteras i form av relativa jämförelser med brännoljedrift resp statsgasdrift.

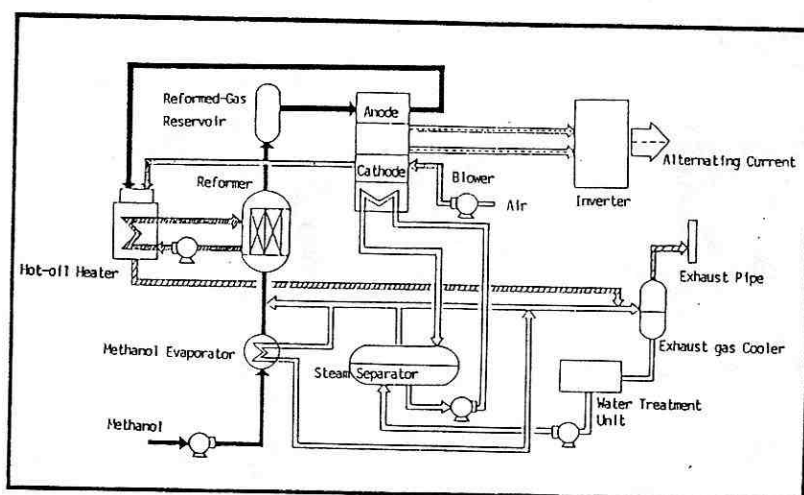
Investeringen beräknas öka främst på grund av modifierade system för bränsleinsprutning och tändning (ca 8 % av investeringen i själva motorn), fördubblad kapacitet (och investering) för bränsletillförselsystem samt på grund av säkerhetsåtgärder för metanolhantering (ca 10 % av investeringen i själva motorn). Minskade krav på kväveoxidrening efter motorn ger en investeringsminskning motsvarande upp till 1,6 gånger motorinvesteringen.

Kalkylerna av produktionskostnader visar att dessa blir lika för metanol och brännolja då metanolpriset är 1,5 ggr brännoljepriset och för metanol och stadsgas då metanolpriset är 3,4 ggr brännoljepriset. 1988 uppgavs metanolpriset vara ca 2-2,5 ggr brännoljepriset.

9. ELPRODUKTION - BRÄNSLECELLER

Bränslecellen är en elektrokemisk cell där en direkt omvandling sker av bränslets kemiska energi till elektrisk energi. Detta förfarande skiljer sig mot förbränningsmotorernas där omvandlingen går vägen över värmeenergi. Teoretiskt sett kan bränsleceller uppnå en mycket hög verkningsgrad men i praktiken begränsas den idag av ofullkomligheter i tekniken till mellan 40 och 60%.

Under det senaste årtiondet har intresset för bränsleceller för stationär elproduktion ökat starkt. Mer än 65 demonstrationsanläggningar, allt ifrån små anläggningar på ett par kW till större MW-anläggningar, är eller har varit i drift. I de flesta av dessa används naturgas som bränsle, men det finns ett fåtal anläggningar som har testats med metanol. Bland annat har Fuji testat sex 4 kW_{el}, en 25 kW_{el} och en 200 kW_{el}-anläggning. Ingen av dessa har utnyttjat metanol direkt i cellen utan metanolen har först reformerats externt till vätgas och därefter tillförts cellen. Direkt användning av metanol har endast använts i celler tänkta för fordonsdrift.

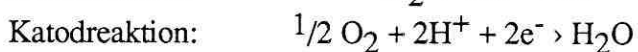


Figur 9.1. Ett översiktligt processchema på den 200 kW_{el} metanoldrivna PAFC-anläggningen på ön Tokashiki i Japan. (Nogi)

9.1 Bränslecellens funktionssätt

Bränslecellen består av två elektroder, en porös bränsleanod och en oxidantkatod, och dessa står i kontakt med den mellanliggande elektrolytfasen. Bränslet tillförs anoden och oxideras till joner under avgivande av elektroner. Dessa elektroner vandrar genom den elektriska ledare som förbinder anod med katod, och en elektrisk ström bildas.

I det ideala fallet används ren vätgas som bränsle och ren syrgas som oxidationsmedel, vilket ger utprodukterna el (likström), värme och vatten. Vattnet lämnar bränslecellen med katodsidans avgaser.



För att öka reaktionsbenägenheten kan en katalysator användas. Den blandas antingen in i bränslet och oxidationsmedlet eller byggs in i elektroderna.

Varje cell genererar en spänning på 0,5 - 1 volt, men strömstyrkan är uppemot flera tusen ampere per m². Uteffekten blir därför relativt hög. För att få önskad spänning och effekt kopplas flera celler ihop i serie till en sk stack.

Det finns flera olika slags bränsleceller och de karakteriseras av den elektrolyt som används och den temperatur vid vilken den arbetar. Elektrolyten har även givit bränslecellerna deras namn. Idag är det främst fyra bränslecellstekniker som utvecklas för kommersiell introduktion:

- | | | |
|---|-------------------|-----------------------------------|
| – | fosforsyracell | PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell) |
| – | smältkarbonatcell | MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell) |
| – | fastoxidcell | SOFC (Solid Oxid Fuel Cell) |
| – | alkalisk cell | AFC (Alkaline Fuel Cell) |

Några karakteristika för respektive teknik visas i tabellen nedan.

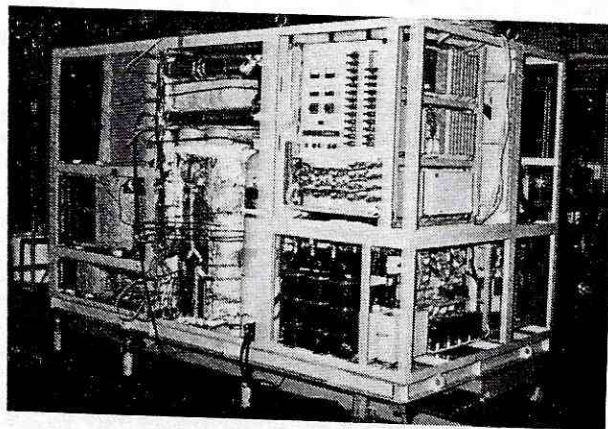
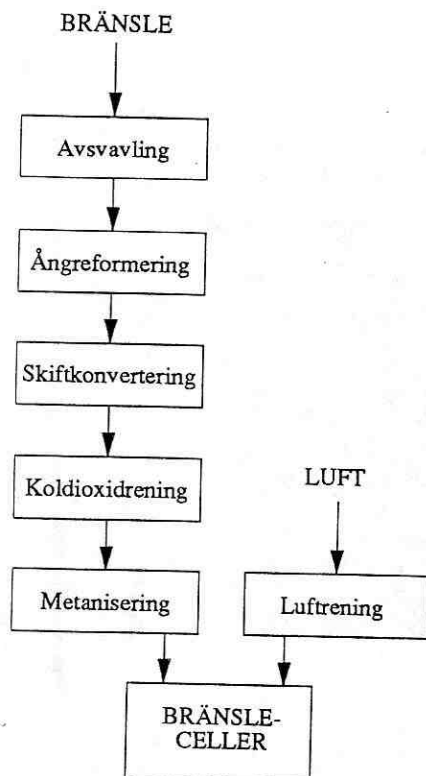
Elektrolyt	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
Arbetstemperatur °C	80	200	650	1000
Bränsle	ren H ₂	H ₂	H ₂ , CO	H ₂ , CO
Oxidation	O ₂	Luft	Luft	Luft
Problem	CO ₂	CO	Korrosion	Material
Verkningsgrad %	60	40	55	60
Anodreaktion	$H_2 + 2OH^- \rightarrow 2H_2O + 2e^-$	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	$H_2 + CO_3^{2-} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$	$H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2e^-$
Katodreaktion	$\frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^-$	$\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$	$\frac{1}{2}O_2 + CO_2 + 2e^- \rightarrow CO_3^{2-}$	$\frac{1}{2}O_2 + 2e^- \rightarrow O^{2-}$
Totalreaktion	$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$	$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$	$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$	$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$ $CO + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO$

Tabell 9.1. Bränslecellstyper och några karakteristika för dessa.

9.2 Vätgasdrivna bränsleceller

Alkoholer, liksom de bränslen som idag används kommersiellt för elproduktion (olja, kol, naturgas, gasol, torv, ved), kan inte användas direkt i de bränsleceller som finns utvecklade. Dagens generation av bränsleceller drivs med vätgas. För att metanol skall kunna användas måste den först omvandlas till en vätgasrik gas, reformeras. De olika bränslecellsteknikerna har olika krav på gaskvalitet och sammansättning (se tabell 1).

Bränsleberedningssystemet består av en eller flera av följande komponenter, beroende på ingående bränsle och bränslecellsteknik.



Figur 9.2 T.v. blockschema över bränsleprocesstegen i en bränslecellsanläggning. Vissa steg kan uteslutas beroende på vilken bränslecellsteknik som används. Exempelvis ingår koldioxidrening och metanisering endast i AFC. T.h. 50 kW-anläggning i modulutförande från Fuji.

Svavelrening. Metanol innehåller ej svavel, varför svavelrening ej behövs.

Reformering innebär att bränslet överförs till en vätgasrik gas genom att alkoholen får reagera med vattenånga till vätgas och koldioxid över en katalysator. Reformeringen av det renade bränslet kan ske antingen i en extern reformeringsreaktor eller i cellerna, sk intern reformering. Reformering av metanol sker vid cirka 300 °C vilket ger metanoldrivna bränsleceller en fördel jämfört med naturgasdrivna eftersom naturgas kräver reformeringstemperaturer på 600-800 °C.

Skiftkonvertering. Platinakatalysatorn i PAFC:n förgiftas av kolmonoxid varför halten måste hållas så låg som möjligt (helst under 1,5%). Gasen från reformern får därför reagera med vattenånga och bilda koldioxid samt vätgas.

Koldioxidrening. I alkaliska bränsleceller krävs att koldioxid i bränslegasen tas bort eftersom den reagerar med elektrolyten och bildar kaliumkarbonatkristaller.

För metanoldrivna bränsleceller finns data bara tillgängligt för PAFC-anläggningar. Den 200 kW-anläggning som provkörts på ön Tokashiki har uppvisat följande testresultat. (Nogi, Anahara)

	Förväntade resultat	Testresultat
Brutto effekten	-	215 kW
Netto effekten	200 kW	202 kW
Elverkningsgrader total	> 37%	39,7% HHV
75% last	-	40,6% HHV
50% last	-	36,7% HHV
20% last	-	22,9% HHV
Totalverkningsgrad	80% HHV	80% HHV (89% LHV)
NO _x -emissioner (7% O ₂)	20 ppm	2 ppm
SO _x -emissioner	-	<1 ppm
Drifttid	-	3600 timmar

Tabell 9.2 *Prestanda för en 200 kW_{el} metanoldriven PAFC-anläggning i Tokashiki.*

Den 100 kW-anläggningen som har provkörts av Mitsubishi Electric Corp. (MELCO) har givit en elverkningsgrad på 37% HHV och en totalverkningsgrad på 79% HHV. NO_x-emissionerna understeg 1 ppm. (Ishioka)

Metanoldrivna bränsleceller uppvisar någon procent lägre verkningsgrad än de anläggningar som drivs med naturgas.

9.3 Direkt användning av metanol i bränslecellen

Som nämnts tidigare är vätgas det enda praktiskt lämpade bränslet för bränsleceller. Anledningen till detta är främst att vätgas har hög elektrokemisk reaktionsförmåga jämfört med de vanligare bränslena kolväten, alkoholer och kol. Reaktionsmekanismen är dessutom enkel och ger inga biprodukter. Det är dock möjligt att mata in metanol direkt i bränslecellen och låta den reagera elektrokemiskt. Tyvärr är metanol inte särskilt reaktiv och kräver därför stora mängder katalysator som innehåller legeringar av ädelmetaller. Effekttätheten är lägre för en metanolcell än för en vätgascell. Den har dock vissa fördelar jämfört med en vätgascell. Bland annat är metanolelektroden mindre komplicerad än vätgaselektroden.

Den direkta metanolcellen har hitintills inte kommit till praktisk användning annat än i enstaka experimentbetonade fall. Ett sådant exempel är elförsörjning till ensligt belägna lysbojar.

Under 1990 har resultat publicerats från försök där metanol oxiderats selektivt till formaldehyd (H₂CO) samtidigt som elenergi producerats i fastoxidceller. Artikelförfattarnas förhoppning är att industrier som idag producerar formaldehyd ska övergå till att producera det i fastoxidceller och samtidigt bidra till elförsörjningen. (Neophytides)

Även etanol kan utnyttjas som bränsle, men den har sämre reaktivitet än metanol och bildar störande mellanprodukter. (Sylwan)

9.4 Miljö

Ett av de främsta argumenten för bränsleceller är att de uppvisar mycket goda miljödata. En av de stora fördelarna med bränslecellkraftverk blir därför att de kan placeras nära den plats där elektriciteten skall användas, eftersom de inte alstrar några miljöfarliga produkter.

Utsläppen från samtliga bränslecellstyper är mycket begränsade. Huvudsakligen utgörs de av koldioxid och kväveoxider. På grund av den höga elverkningsgraden blir dock utsläppet av koldioxid per kWh producerad el jämförelsevis låg.

Slutprodukten är rent vatten och eventuellt koldioxid, beroende på vilket bränsle och vilken typ av bränslecell man använder. Vattnet återvinns genom kondensering och används sedan för att generera ånga som krävs till reformeringen.

Utsläppen från en PAFC-anläggning som har naturgas som bränsle anges av tillverkarna till :

NO _x :	< 10 mg/MJ	(bildas i reformeringsprocessen)
CO:	< 100 mg/MJ	(bildas i reformeringsprocessen)
Kolväten:	< 10 mg/MJ	
Stoft:	<< 0,01 mg/MJ	

Vissa uppmätta värden för metanoldrift redovisas i tabell 9.2.

Även ljudnivån är mycket låg och leverantörerna garanterar att ljudnivån inte överstiger 60 dB (A) på ett avstånd av 10 meter från anläggningen.

9.5 Kostnader

Investringskostnaderna för bränsleceller är idag mycket höga eftersom kommersiell produktion inte kommit igång ordentligt. Flera tillverkare har dock som mål att kostnaden inte ska överstiga US\$ 1000/kW_{el} vid sekelskiftet.

Kostnaden för elproduktion från metanol med bränsleceller har uppskattats ligga i intervallet 50-80 öre/kWh. Det lägre värdet motsvarar kostnaden med en framtida serieproducerad MCFC-anläggning medan det högre värdet är kostnaden i PAFC-anläggningar med dagens bästa teknik. Antaget metanolpris motsvarar 20 öre/kWh. — 88 ö/l

Användning av metanol från biobränslen (45 öre/kWh) ger på motsvarande sätt en produktionskostnad på ca 90-120 öre/kWh el.

9.6 Potential

Bränslecelltekniken är idag inte helt kommersiell och följaktligen inte ekonomiskt konkurrenskraftig. Ett stort intresse finns dock över hela världen för tekniken och ett omfattande utvecklingsarbete pågår. Mot slutet av 90-talet antas PAFC-tekniken vara kommersiell i Japan för småskalig elproduktion. Den kommersiella introduktionen i Sverige beror till mycket stor del av elpriset.

På grund av de olika bränslecellsteknikernas beskaffenhet har de olika tillämpningsområden. Högtemperaturbränslecellerna MCFC och SOFC är bäst lämpade för större el- och värmeproducerande anläggningar medan PAFC och AFC är bättre lämpade för mindre anläggningar och AFC då främst i fordonstillämpningar. Mot bakgrund av kostnaderna för metanolproduktion och bränslecellernas investeringskostnad bör den största potentialen för bränsleceller drivna med metanol vara mindre anläggningar (ett par MW och mindre), placerade nära användaren. I denna applikation utnyttjas bränslecellens fördelar väl. Tack vare de låga emissionerna, låga bullernivån och de enkla lokaliseringskraven kan anläggningen placeras intill bebyggelse där konsumtionen sker. Ändras elbehovet med tiden kan anläggningens produktion enkelt ökas genom att utöka bränslecellsstacken med fler celler. I Japan utvecklas de metanoldrivna cellerna främst i avsikt att placeras på öar där det inte finns några större elproducenter. Ett annat användningsområde är i fordonstillämpning för drift av bussar, bilar och industrifordon.

Fördelarna med högtemperaturbränslecellerna MCFC och SOFC jämfört med PAFC är att den höga temperaturen tillåter intern reformering. Dessutom förenklas bränslehanteringen eftersom även kolmonoxid kan användas som bränsle. Kolmonoxid producerar nämligen vätgas tillsammans med vatten, och därmed behövs ingen separat skiftreaktor. Den höga temperaturen gör även att det inte krävs någon katalysator för att upprätthålla cellspänningen. Erfarenheterna från anläggningar med högtemperaturbränsleceller drivna med metanol är dock mycket begränsade.

AFC-tekniken har begränsad potential vad gäller en storskalig el- och värmeproduktion, pga den låga temperaturen på spillvärmes. AFC:ns framtid ligger därför troligen inom transportsektorn. Tidigare såg många en lovande framtid i metanoldrivna bränsleceller i fordonstillämpning. Svårigheterna att få tekniken att fungera tillfredsställande har dock minskat intresset.

10. VÄRMEPRODUKTION

Alkoholer är väldefinierade flytande bränslen och skulle därför tekniskt kunna vara ett alternativt bränsle i mindre och medelstora värmepannor. Alkoholer framställda från biobränslen ger dessutom ett biobränsle med hanterings- och lagringsegenskaper liknande olja och möjlighet till en miljömässigt betydligt bättre förbränning än både olja och fasta biobränslen.

I tabell 10.1 visas fysikaliska data för alkoholbränslen samt för några alternativa bränslen för mindre pannor. Här ses att alkoholer har en hög energitäthet jämfört med andra biobränslen.

	värmevärde (MWh/m ³)
metanol	4,4
etanol	5,9
olja (EO1)	9,9
gasol	6,7 *
ved	1,2
flis	0,8
pelletter	2,9

* vätskeform

Tabell 10.1 Värmevärde och densitet för en rad bränslen för mindre värmepannor.

10.1 Övergång från olja till alkoholbränsle

Alkoholer kan ersätta olja i befintliga pannor med relativt begränsade modifieringar av brännare, bränslesystem och panna. Resultat från ett fåtal försök med alkohol som bränsle i pannor av olika storlekar finns publicerade (Jones, Hayden, Tatsuta, Filho, Choi). Erfarenheten är alltså begränsad men några generella slutsatser kan dras från de redovisade försöken.

Alkoholer brinner med en blå låga vilket gör att strålningen från lågan är mindre. Större del av värmen måste därför överföras via konvektion. Detta innebär att pannor avsedda för tex olja har en olämplig fördelning mellan strålnings- och konvektionsytor vilket i sin tur betyder att en lägre brännareffekt alternativt större konvektionsytor krävs vid övergång till alkohol i en befintlig panna. Detta bör dock inte ge problem i villapannor eftersom dessa nästan undantagslöst är kraftigt överdimensionerade jämfört med husens verkliga värmebehov. Tillsatser av additiv har föreslagits för att göra lågan mindre genomskinlig och på så sätt öka strålningsvärmets (Hayden).

På grund av alkoholernas betydligt lägre kokpunkt och lägre viskositet måste brännarmunstycket förändras. En konventionell brännare för villapannor med tryckatomiseringsmunstycke uppges dock kunna användas för metanol med inga eller mycket små förändringar.

För olja används idag självsmörjande pumpar eftersom olja har en självsmörjande effekt. Alkoholer är däremot inte självsmörjande varför bränslepumparna med nödvändighet måste bytas ut.

Alkoholer omfattas av Lagen om brandfarliga och explosiva varor (SFS 1988:868) samt Förordningen om brandfarliga och explosiva varor (SFS 1988:1145). Lagring av alkoholer regleras därför mycket noggrant. Alkoholer är klassad som en klass 1-vara till skillnad från eldningsolja som klassificeras som klass 3. Det innebär att man vid övergång från oljeeldning till eldning av alkoholer måste anpassa lagringscisterner, bränsleledningar, elutrustning och pannrummet till de strängare krav som gäller för en klass 1-vara.

Alkoholer har ett högt väteinnehåll jämfört med olja. Rök-gaskondensering ger därför en påtaglig effekt på verkningsgraden.

10.2 Miljö

Alkoholer är helt fria från svavel varför emissioner av svaveloxider är obefintliga.

Emissioner av kväveoxider är beroende av flera olika faktorer; bränsle, brännare och panna, som var och en har ungefär lika stor inverkan. Alkoholer saknar bränslekväve och alkoholernas lägre energiinnehåll jämfört med eldningsolja indikerar en lägre temperatur vid förbränningen vilket leder till lägre NO_x -utsläpp. Redovisade resultat från försök med metanol och etanolförbränning visar också på låga NO_x -emissioner, betydligt lägre än vid förbränning av de bränslen som normalt eldas i respektive panna. (Jones, Tatsuta)

Sotbildning från alkoholförbränning är i det närmaste obefintlig.

Utsläppen av oförbrända produkter dvs oförbränd alkohol, aldehyder och övriga kolväten är mycket små. Halter i nivån några ppm har rapporterats från genomförda storskaliga försök.

10.3 Potential

Potentialen för användning av alkoholer för värmeproduktion i befintliga mindre och medelstora pannor begränsas av kostnaden för ombyggnaden av bränslelager, pannrum och övrig utrustning så att den uppfyller kraven för en brandfarlig vara av klass 1. Kostnaderna för uppklassningen till klass 1 standard är mycket omfattande. Av detta skäl torde marknaden för alkoholer som ersättning för olja i befintliga villapannor eller mindre fastighets- och industripannor. 2

Anpassningen av förbränningsutrustningen är förhållandevis enkel och användning av alkoholbränsle skulle därför kunna vara aktuell i vissa speciella fall där lager för alkoholer redan finns eller vid viss nyinstallation där merkostnaden för att installera klass 1-utrustning kan anses motiverad, av tex miljöskäl.

11. LAGRING AV NATURGAS SOM METANOL

Naturgas är den viktigaste råvaran vid framställning av metanol. Eftersom metanol till skillnad från naturgas är vätskeformig och därmed förhållandevis lätt att lagra och transportera har metanol diskuterats som ett enklare och billigare sätt att sjötransportera naturgas och som ett billigt sätt att buffertlagra energi.

Inom Sverige finns också ett lagringsbehov för naturgas. Gasleverantören bör kunna garantera anslutna kunder försörjning med naturgas även under perioder med stor förbrukning exempelvis under en köldperiod. Ett gaslager kan utnyttjas för att utjämna dessa lastvariationer. Olika former av lager har diskuterats, bl.a. lagring i trycksatta berggrum på cirka 1000 m djup och lagring som LPG (förvätskad naturgas). Ett tredje alternativ, som också nämnts, är lagring av gasen i form av metanol (Granberg). Eftersom ingen kommersiell metod finns för att direkt överföra metan till metanol måste metanet krackas till en syntesgas som via mellansteg för skiftning överförs till metanol. Processer för metanolproduktion beskrivs närmare i kapitel 3.

LNG

Om gasen lagras i form av metanol kan två alternativ tänkas vid användning av den lagrade "naturgasen". Ska metanolen användas för att direkt ballansera variationer i gasförbrukning måste den före användandet katalytiskt överföras till en metanrik gas som kan användas i naturgasnätet. Det andra alternativet är att istället använda metanolen direkt som bränsle i tex fordon.

10

Lagring av naturgas som metanol är av tekniska och ekonomiska skäl inte aktuellt i Sverige som metod för lastutjämning mellan perioder av låg och hög gasförbrukning. Metanolsyntessteget liksom steget för att kracka metanolen kräver omfattande investeringar och ger förhållandevis stora förluster. Uppskattningsvis kan endast cirka 55% av tillförd energi i form av naturgas återvinnas efter lagringen.

$$0,75 \times 0,93 = 0,70$$

Gasdistributörer och storförbrukare av naturgas är skyldiga att, av beredskapsskäl, hålla lager som omfattar 25% av årsförbrukningen. Beredskapslagring av naturgas kan för 90% av förbrukarna lösas genom att man i ett avspärrningsläge istället använder en propan-luftblandning som ersättning för naturgas (Lähdemäki). Propan (dvs gasol) kan lätt lagras i tillräcklig mängd till en rimlig kostnad. För en mindre andel av naturgasförbrukarna är propan-luft inte acceptabelt av tekniska skäl. Det gäller bl.a. för naturgasdrivna fordon och vissa industritillämpningar. I dessa fall kan beredskapslagring av metanol vara ett alternativ. Av kostnadsskäl är det inte realistiskt att tillverka metanolen i Sverige utan lagren fylls med metanol inköpta på den internationella marknaden. För att lagret ska fungera som ersättning för naturgas i ett krisläge krävs att enheter för att överföra metanolen till gas finns inom landet. Verkningsgraden för denna överföring är förhållandevis hög, cirka 93%.

11.1 Potential

Dagens svenska naturgasförbrukning är cirka 6,5 TWh/år. Om metanollagring skulle användas som beredskapslager för den andel av förbrukningen som inte kan ersättas med propan-luft motsvarar det en lagringskapasitet på cirka 1,7 GWh dvs 40 000 m³ metanol.

Olika möjligheter att lösa beredskapslagring av naturgas bör undersökas, bla avseende investeringskostnader och verkningsgrader, för att kunna avgöra metanolmetodens potential.

12. RÅVARA TILL ANVÄNDNING-SAMMANSTÄLLNINGAR

En fullständig bild av utnyttjande av primärenergi eller av utsläpp av hälsovådliga eller klimatpåverkande gaser fodrar att hela kedjan från råvara till slutanvändning beaktas.

Alkoholerna metanol och etanol kan betraktas som högförädlade bränslen som är enkla att lagra och distribuera samt har goda förbränningsegenskaper i motorer, gasturbiner och pannor. De utgörs av enkla molekyler endast innehållande kol, väte och syre. Den långtgående reningen vid tillverkningen gör att de ej heller innehåller föroreningar såsom svavel, klor eller metallföreningar. Extremt stränga miljökrav kan därför uppfyllas vid användningen. Den höga förädlingsgraden gör dock att priset per energienhet blir betydligt högre än för oförädlade eller mindre förädlade bränslen såsom naturgas, kol eller biobränslen. Prisskillnaden gentemot förädlade flytande bränslen, såsom bensin, är däremot mindre.

Grovt förenklat, kan man påstå att en småskalig användning av praktiska och ekonomiska skäl kräver ett mer förädlat och renare bränsle än en storskalig användning. Man kan se det som att förädlings/reningsmomenten oftast sker mest ekonomiskt i stor skala. Vid småskaliga användningar bör dessa moment så långt det är möjligt ske i samband med tillverkningen av bränslet, som därefter distribueras till ett flertal användare. Vid storskaliga användningar spelar däremot bränslepriset en mer avgörande roll, och det betalar sig ofta att använda ett mindre förädlat bränsle och i stället en mer avancerad teknik vid användandet. Lokalisering med hänsyn till god bränsletillgång blir då också betydelsefull.

*och väsentligt
på utsläppskrav*

Metanol och etanol kan därför sägas bli ekonomiskt konkurrenskraftigare för småskaliga användningar. Fordonsdrift kan med detta synsätt betraktas som den mest småskaliga och vanligast förekommande användningen, där mycket höga krav ställs på bränslet vad avser förbränningsegenskaper under mycket varierande förhållanden, hanteringsegenskaper, lagringsbarhet och renhet. Dessutom går utvecklingen mot allt strängare miljökrav.

Flertalet utvecklingsarbeten och studier kring metanol och etanol som bränsle har också gjorts avseende fordonstrift.

12.1 Drivmedel för fordon

Vid utvinning av råolja och framställning av bensin/dieselloolja beräknas förbrukningen av drivenergi för utvinning, transporter, raffinering och distribution till genomsnittligt 12 % av energiinnehållet i råvaran, varav huvuddelen 9,5 %, för raffineringen, 1 % vid utvinningen, 0,6 % för transporten till raffinaderi och 0,9 % för distributionen till slutanvändare (inkl. 0,3 % avdunstningsförlust). Sannolikt underskattas bensinens andel något, då den framställs genom en längre, mer komplex och energikrävande processväg än diesellojan.

För produktion av metanol beräknas drivenergi motsvarande 27-37 % av råvarans energi gå åt med största posten, 24 resp 34 %, vid konverteringen av naturgasen till metanol i framtida resp nutida, moderna anläggningar, och 1 % för gasutvinning, 1 % för våtgasbehandlingen i landterminal och 1,4 % för distribution till slutanvändare (inkl. 0,1 % avdunstningsförlust).

I användarledet förutsätts att drivmedelsförbrukningen i energitermer för metanoldrivna ottomotorer är 10 % lägre än vid bensindrif och för metanoldrivna dieselmotorer lika som vid drift med diesellolja. I tabell 12.1 har en enkel sammanställning för hela kedjan gjorts (för 75 % verkningsgrad vid konverteringen naturgas-metanol). Som jämförelse har direkt naturgasdrift av

T A B E L L 12.1

Förbrukningar av drivmedel resp. råvara och CO₂-utsläpp i kedjan råvara - användning.

R E L A T I V A T A L

	Användning i ottomotor (bensin=100)				Användn. i dieselmotor (olja=100)		
	Konv. bensin	Reformulerad bensin med 15 vol-% MTBE	Metanol	Naturgas	Dieselolja	Metanol	Naturgas
FÖRBRUKNINGAR							
I fordon, volymenheter	100	100	102,3	185	100	225	-
energienheter	100	97,3	100	90	100	100	125
Av råvara, energienheter							
Råolja	113,6	107,6	110,6	-	113,6	-	-
Naturgas	-	3,6	3,7	123,3	-	137	136 ^x
CO ₂ -UTSLÄPP							
I råoljekedjan	100	94,7	97,3	-	100	-	-
I NG-kedjan	-	2,5	2,7	84	-	93	93 ^x
VID MTBE-tillv.	-	0,8	0,8	-	-	-	-
Totalt	100	98	101	84	100	93	93

x = importerad el för drift av kompressorer för pipeline-transport och för fordons-tankning

fordon och av användning av MTBE-blandad bensin under två olika förutsättningar (betr. förbrukning) medtagits. Dessutom har beräknade CO₂-utsläpp angivits med utgångspunkt från att oljeprodukter vid förbränning ger cirka 75 g CO₂ per MJ och naturgas 58 g CO₂ per MJ. Fördelen med att ur utsläppssynpunkt använda metanol kvarstår för ottomotorer även om verkningsgraden vid konverteringen skulle vara lägre, 65 %, men blir självfallet mindre.

Framställningen av drivmedel från naturgas ger detta som enda produkt. Vid framställning av drivmedel ur råolja erhålles oundvikligen en viss mängd andra produkter, som ger upphov till CO₂-utsläpp. Dessa har inte medtagits då det är oklart hur de skall behandlas vid jämförelsen.

Framställning av metanol eller etanol ur biomassa ger vid konverteringen relativt sett låga produktutbyten, vilket är oundvikligt på grund av råvarans karaktär som mycket kolrik och vätefattig. Å andra sidan har den skapats av solenergi genom fotosyntes med måttlig insats av fossil energi i odlingsledet. Drivmedelsproduktionen blir, under förutsättning att biomassa eller restprodukter därav används som bränsle, en avsevärd leverantör av drivmedelsenergi i förhållande till insatt fossil energi (höga utbytestal) med låga netto-CO₂-utsläpp som följd. Den diskussionen förs inte vidare i denna rapport, då kvantifieringen kan ske under många olika förutsättningar för uppbyggnad av systemet och för produkternas användning.

Tabell 12.2, 12.3 och 12.4 nedan sammanfattar en översiktsbild av hela kedjan i relativa tal för ett transportarbete med otto- resp. dieselmotor (kostnadsrelationer från kap. 3, 4, 5 och 6 och antagen prisnivå för bensin resp. dieselolja vid raffinaderi på 135 resp. 110 ö/l).

Vid etanolframställning ur jordbruksgrödor eller träbränslen erhålls förutom etanol andra produkter (foder resp. träpulverbränsle). En jämförelse av verkningsgrader från råvara till fordon mellan etanoldrift och andra drivmedel låter sig därför ej göras på ett meningsfullt sätt.

Utsläppen av hälsovådliga och miljöskadliga ämnen är i många avseenden lägre vid användning av naturgas och biomassa som råvara för alkoholer än med råoljebaserad bensin och dieselolja. Utsläpp av sura gaser blir lägre genom den lägre svavelhalten i de förstnämnda råvarorna och även kväveoxidutsläppen blir lägre vid användningen, främst från dieselmotorer.

De alternativa drivmedlen skiljer sig från de oljebaserade framför allt genom frånvaron av aromatiska föreningar (bensen, etc) och partiklar med polycykliska aromatiska ämnen (PAC), som har mutagena egenskaper. Även utsläpp av andra föreningar med mutagena egenskaper, såsom alkener, är betydligt lägre med alkoholdrivmedel. Utsläpp av i atmosfären reaktiva, oxidantbildande ämnen är likaledes lägre än med kolvätedrivmedel. Motverkande är högre utsläpp av aldehyder och möjlig högre bildning av alkylnitriter, men nettoeffekten bedöms ändå som klart till alkoholernas fördel.

Kostnaderna för slutanvändaren sammansätts av kostnaden för drivmedlet och för fordonet och dess underhåll. Ur samhällsekonomisk synpunkt innebär en övergång till alkoholdrivmedel kortsiktigt en merkostnad därför att det redan finns en uppbyggd apparat för oljebaserade drivmedel och fordon för dem. Längsiktigt behöver dock inte alternativen eller fordon för dem vara dyrare och införs skaderelaterade skatter t ex för SO₂-, CO₂-utsläpp och NO_x-utsläpp kan vågskålen väga över till deras fördel. Denna diskussion förs inte vidare här.

Tabell 12.2. Råvara till fordonsanvändning
Energiverkningsgrader för metanol relativt bensin resp dieselolja

Råvara	råolja		naturgas		biobränslen	
Drivmedel	bensin	diesel- olja	metanol		metanol	
Energiverkningsgrad råvara-drivmedel, %	81 88	86 88	63 - 73 ¹⁾		50	
Motor i fordon	Otto- motor	diesel- motor	Otto- motor	diesel- motor	Otto- motor	diesel- motor
Verkningsgrad i fordon relativt bensin resp dieselolja	1,0	1,0	1,1	1,0	1,1	1,0
Verkningsgrad råvara-fordon relativt bensin resp dieselolja	1,0	1,0	0,80-0,92	0,72-0,83	0,63	0,57

1) Modern respektive framtida anläggning

Tabell 12.3. Råvara till fordonsanvändning
CO₂-utsläpp för metanol relativt bensin resp dieselolja

Råvara	råolja		naturgas	
Drivmedel	bensin	dieselolja	metanol	
CO ₂ -utsläpp råvara-fordon g/MJ drivmedel	85	85	92 - 79 ¹⁾	
Motor i fordon	Otto- motor	diesel- motor	Otto- motor	diesel- motor
CO ₂ -utsläpp råvara-fordon relativt bensin resp dieselolja	1,0	1,0	0,97-0,84	1,08-0,93

1) Modern resp framtida anläggning för metanoltillverkning

Tabell 12.4. a) Fordonsanvändning
 Drivmedelskostnad för metanol relativt bensin resp dieselolja

Råvara	råolja		naturgas		biobränslen	
Drivmedel	bensin	diesel- olja	metanol		metanol	
Drivmedelspris						
-USD/ton	-	-	180		ca 420	
- SEK/liter	1,35	1,10	0,85		2,00	
Lagring och distribution						
- SEK/LITER	0,80	0,80	0,48		0,48	
Drivmedelspris till konsument (exkl skatter)						
-SEK/liter	2,15	1,90	1,33		2,48	
- öre/kWh	0,24	0,19	0,30		0,56	
Motor i fordon	Otto- motor	diesel- motor	Otto- motor	diesel- motor	Otto- motor	diesel- motor
Drivmedelskostnad för fordon (exkl skatter) relativt bensin resp dieselolja	1,0	1,0	ca 1,1	ca 1,6	ca 2,1	ca 2,9

Tabell 12.4. b) Fordonsanvändning
 Drivmedelskostnad för etanol relativt bensin resp dieselolja

Råvara	Lignocellulosa (träbränslen)	
Tillverkningsprocess	1-stegshydrolys	
Förädlad bränsle - Intäkt, öre/kWh	(Träpulver) 14	
Drivmedel - Produktionskostnad, SEK/LITER	Etanol 1,80	
Lagring och distribution (exkl oceantransport) - SEK/LITER	 0,60	
Drivmedelspris till konsument (exkl skatter) - SEK/liter - öre/kWh	 2,40 0,41	
Motor i fordon	Otto- motor	diesel- motor
Drivmedelskostnad för fordon (exkl skatter) relativt bensin resp dieselolja	ca 1,5	ca 2,2

12.2 Elproduktion - gasturbiner

Utvecklingsarbete har bedrivits framför allt i USA och Japan. Dessutom har studier gjorts i bl a Italien och Sverige.

Verkningsgrader till el för gasturbiner beror av turbintyp och processutformning (cykel). Högsta elverkningsgraden vid naturgasdrift fås med gasturbin plus ångturbincykel (kombicykel). Högsta elverkningsgraden vid metanoldrift fås med reformerad/ångreformerad metanol (ca 40-45 %). En mera framtida teknik, då även ånginjicering utnyttjas, ökar elverkningsgraden med ytterligare ca 5 %-enheter.

Uppskattade intervall för verkningsgrader från råvara till el finns sammanställda i tabell 12.5. Av denna framgår att de något högre elverkningsgraderna i gasturbinerna för metanoldrift ej helt kompenserar energiåtgången för metanoltillverkningen.

Tabell 12.5. Elproduktion - gasturbiner
Verkningsgrader från råvara till el

Råvara	naturgas	naturgas	biobränslen
Bränsle för gasturbin	naturgas	metanol	metanol
Energiverkningsgrad råvara-bränsle, %	<i>för högt</i> 98	63-73 ¹⁾	50
Elverkningsgrad i gasturbin, %	31-46 ²⁾	35-50 ³⁾	35-50 ³⁾
Verkningsgrad råvara-el, %	30-45	22-37 ³⁾	18-25 ³⁾

1) Nutida modern respektive framtida metanolproduktionsanläggning.

2) Enkel gasturbincykel respektive gasturbin plus ångturbin (kombicykel).

3) Enkel metanoldriven gasturbin och nutida metanolanläggning resp drift med reformerad/ångreformerad metanol och ånginjicering kombinerad med framtida metanolanläggning.

De totala koldioxidutsläppen från råvara till el blir följaktligen högre för metanoldrift jämfört med naturgasdrift, vilket framgår av tabell 12.6. Jämfört med oljedrift borde utsläppen bli ungefär lika, då oljeprodukter ger högre CO₂-utsläpp vid förbränning (jämför tabell 12.3 för motorer i fordon).

Tabell 12.6. Elproduktion - gasturbiner
CO₂-utsläpp för hela kedjan råvara till el

Råvara	naturgas	naturgas
Bränsle för gasturbin	naturgas	metanol
CO ₂ -utsläpp råvara-el, g/MJ _{el}	190-130 ²⁾	260-160 ³⁾

2) Enkel gasturbincykel respektive gasturbin plus ångturbin (kombicykel).

3) Enkel metanoldriven gasturbin och nutida metanolanläggning resp drift med reformerad/ångreformerad metanol och ånginjicering kombinerad med framtida metanolanläggning.

Utsläpp av hälsovådliga och miljöskadliga ämnen härrör så gott som helt från gasturbinens avgaser. Partikel- och svaveloxidutsläpp blir försumbara vid metanoldrift. Kväveoxidutsläppen kan utan extra rening uppskattas bli så låga som ca 60 mg NO_x/MJ producerad el vid drift med reformerad/ångreformerad metanol. Aldehydutsläpp vid metanoldrift motsvarar knappt 1 ppm i avgasen (15 % syre), vilket är högre än för oljedrift (ca 0,01 ppm) men betydligt lägre än för naturgasdrift (ca 10 ppm).

Produktionskostnaden för el är mycket känslig för bränslepriset. Om metanol kostar ca 20 öre/kWh (180 USD/ton) kan elproduktionskostnaden för reformerad metanol uppskattas till ca 75-90 öre/kWh_{el}. Metanol framställd ur biobränslen (45 öre/kWh) ger på motsvarande sätt en elproduktionskostnad på ca 140-155 öre/kWh el.

12.3 Elproduktion - stationära kolvmotorer

Vi har endast lyckats hitta ett fåtal japanska studier och testresultat. Metanoldrift bör kunna ge goda miljöprestanda, men de testresultat som vi lyckats finna tyder på att mycket utvecklingsarbete återstår för att uppnå detta. Då tillgängliga data är mycket knapphändiga och möjliga prestanda samt ekonomisk potential därför framstår som oklara är det ej meningsfullt att i denna rapport göra jämförelser med andra bränslen och elproduktionsmetoder.

12.4 Elproduktion - bränsleceller

Bränslecelltekniken är ännu ej kommersiell. Några av de demonstrationsanläggningar som finns har testats med metanol som bränsle. Störst potential för metanoldrivna bränsleceller bedöms finnas för små anläggningar (upp till ett par MW) placerade nära användaren.

Elverkningsgrader för den längst utvecklade bränslecelltekniken (fosforsyra, PAFC) kan uppskattas till knappt 40 % med metanoldrift. Framtida tekniker kan tänkas ge upp till 60 % elverkningsgrad. För drift med metanol tillverkad av naturgas innebär detta ca 25-30 % resp upp till ca 45 % från råvara till el (förutsättningar när det gäller metanoltillverkning samma som i avsnitt 12.2 och tabell 12.5).

För drift med metanol tillverkad av biobränslen blir verkningsgraden från råvara till el på motsvarande sätt ca 20 % resp 30 %.

De totala koldioxidutsläppen från råvara till el kan på analogt sätt uppskattas till 230-190 g CO₂/MJ el för PAFC resp ned till ca 130 g CO₂/MJ el för framtida tekniker.

Utsläpp av hälsovådliga och miljöskadliga ämnen är alltid mycket låga för bränsleceller. Med metanoldrift har NO_x-halter (7 % syre) uppmätts till 2 ppm.

Produktionskostnaden för el har beräknats till ca 80 öre/kWh för dagens bästa teknik (PAFC) resp ned till ca 50 öre/kWh för serieproducerade framtida bränsleceller (smält karbonat, MCFC) för drift med metanol till ett pris av ca 20 öre/kWh (180 USD/ton). Metanol framställd av biobränslen (45 öre/kWh) ger på motsvarande sätt en elproduktionskostnad på 120 resp 90 öre/kWh_{el}.

12.5 Värmeproduktion

Ett fåtal försök med metanol och etanol som bränsle i panna finns publicerade. Fördelar är enkel hantering och lagring samt miljömässigt bättre förbränning än olja eller fasta bränslen (t ex biobränslen). Höga kostnader för ombyggnad av bränslelager, bränslehanteringsutrustning m m för mer brandfarliga ämnen (klass 1) än olja (klass 3) utgör en begränsning av potentialen.

Utsläpp av kväveoxider blir betydligt lägre än för andra bränslen i samma panna.
Utsläpp av oförbrända produkter blir mycket små och sotbildningen blir så gott som obefintlig.

13. ALKOHOLER SOM DRIVMEDEL I FORDON - INFÖRANDESCENARIER - STYRMEDEL

Alkohol användning i olika former har studerats ytligt under lång tid men har under senare tid fått fastare planer. Användning som komponenter i bensin (direkt eller som etrar) för befintliga bilar har i stor utsträckning skett genom att marknaden ekonomiskt acceperat dem. I USA har dock etanolanvändningen haft hjälp av ett kraftigt styrmedel i form av lägre skatt. Nu kommer också oxygenatanvändning i bensin att krävas genom lagstiftning grundad på miljö- och hälsoskäl. Den kommer också att medföra införande av alternativa drivmedel, som kan vara alkoholer.

Användning av alkoholer som blandbränsle med högre halter, 15-25 vol-%, diskuterades i slutet av 70-talet och början av 80-talet som ett sätt att komma igång med användning av icke-petroleumbaserade drivmedel för nya eller enkelt konverterade bilar. Idén stupade på att marknaden inte acceperade införande av ytterligare en bensinkvalitet och fordonsmodeller för denna. Tanken på att införa blyfri bensin var vid denna tid inte acceperad och idén att införa alkoholblandbränslen som en blyfri kvalitet för att ersätta en befintlig blyad kvalitet fick inte något genomslag.

Användningen av sådana blandbränslen i Brasilien har gammal hävd och är statligt styrd. Etanolen utgjorde en regulator för sockerindustrins överskott vid variationer i efterfrågan på socker på världsmarknaden.

Några seriösa planer eller förslag att börja använda alkoholer som självständigt drivmedel i Europa har inte funnits och kan för närvarande inte heller förutses komma. I USA har man däremot börjat planera för alternativa drivmedel av skäl som rör både försörjningssäkerhet och miljö- och hälsoaspekter. Ny lagstiftning (Alternative Motor Fuels Act 1988 och Clean Air Act 1990) syftar till införande till att börja med som ett pilotprogram i Kalifornien men med möjlighet för andra stater att ansluta sig. Medlen är att föreskriva införande av lågemissions-fordon av olika klasser i en given och ökande andel av nya fordon med åren och med början i mitten på 90-talet. Det kaliforniska programmet börjar 1995 med en årlig försäljning av 150.000 fordon, som ökar till 300.000 per år efter tre år. Inledningen till detta program är nu uppbyggd av en demonstrationsflotta på närmare 6.000 huvudsakligen lätta fordon i Kalifornien. Parallellt sker sådan uppbyggnad även i federala flottor i övriga USA.

För de nya fordonen gäller kraftigt skärpta utsläppskrav, för vars uppfyllande man anser att alternativa drivmedel behövs. Samtidigt föreskrivs viss skyldighet för distributörerna att tillhandahålla alternativa drivmedel för allmänhetens tankning.

Medlen att få bilföretagen att börja tillverka fordon för dessa drivmedel finns i lagen om högsta drivmedelsförbrukning för nya fordon (CAFE-bestämmelserna) med bötespåföljder om de inte uppfylles. Incitamentet ligger i att de alternativa drivmedlen delvis eller helt (med tak) inte räknas med i förbrukningstalen. Vilka incitament som den enskilda bilköparen skall ha är osäkert annat än att fordonen har minst lika goda prestanda som nuvarande fordon och uppvisar lägre skadliga utsläpp och att tillgång av de nya drivmedlen säkerställs.

Det är således mestadels inte några direkta ekonomiska drivkrafter som finns utan obligatorier, särskilt för ägare av flottor. Marknadsdrivkrafterna kan spela en roll för valet av alternativt drivmedel, som inte är föreskrivet. Störst intresse har dock metanol som är flytande och kan utan hinder spridas i bensinsystemet (efter anpassningar) och därigenom få stort volymmässigt genomslag. Kostnaderna för att införa metanol på marknaden (distribution, fordon) har bedömts vara lägst av alternativen (U.S.DOE 1990). Detta betyder dock inte att inte de övriga skulle

komma till användning, särskilt inte som intressen i dessa (propan, naturgas, etanol, el) var och en arbetar för deras användning. Användning i betydande nischer synes sannolik för dem. Införande av eldrivna fordon är ofrånkomlig då det ingår viss andel nollemissions-fordon, som endast är möjlig med eldrift.

De totala kostnaderna innefattar också kostnaderna för drivmedlen och prissättningen av dessa är långt ifrån klar. Metanolalternativet kan visa sig inte ge de lägsta totala kostnaderna (CARB, CEC). Beskattningen är olika för alternativen. El är obeskattat och naturgas har lägre skatt än de övriga.

Sverige har till skillnad från USA inga egna naturgas- eller oljetillgångar. Däremot är den potentiella tillgången på biobränslen relativt folkmängden hög. Den alkohol från biobränslen som har lägst produktionskostnad per energienhet är etanol framställd ur träbränslen. I Sverige skulle därför etanol som drivmedel kunna få en relativt sett större betydelse än i USA, speciellt om miljödebatten fortsätter att fokuseras kring växthuseffekten och koldioxidutsläpp.

2 2

14. SLUTSATSER

Några generella slutsatser kan dras ur den information som sammanställts inom ramen för föreliggande studie.

- Metanol och etanol utgörs av enkla molekyler, endast innehållande kolväte och syre, samt är i övrigt rena. De ger vid förbränning betydligt mindre utsläpp av hälsovådliga och miljöskadliga ämnen än både bensin, dieselolja och naturgas. *2*
- Den *f n* billigaste alkoholen räknat per energienhet är metanol framställd ur naturgas. Dess pris kan förväntas ha en relativt konstant relation till bensinpriset.
- Den billigaste alkoholen från biobränslen räknat per energienhet är etanol framställd ur träbränslen. Dess pris beror framförallt av prisbilden för tillgängliga träbränslen och priset på det förädlade träbränsle(pulver) som erhålls vid sidan om etanolen. *22 p.65*
- Metanoltillverkning kräver för att vara lönsam relativt stora anläggningar (linjestorlek ca 1-5 milj m³/år från naturgas eller ca 0,35-2 milj m³/år från biobränslen) placerade nära råvarukällan.
- Etanoltillverkning ur träbränslen kan vara ekonomisk vid betydligt mindre anläggningsstorlekar, ca 20.000 m³ etanol /år. Den totala praktiskt möjliga produktionsnivån i Sverige begränsas av biobränsletillgången och har uppskattats till mer än 2 milj m³/år. *Shalleffekt upphör vid*
- Potentialen för etanoltillverkning av spannmål är däremot mycket begränsad (ca 150.000 m³/år på grund av begränsad avsättning för den samtidigt producerade foderprodukten i Sverige. Dessutom blir produktionskostnaden hög, även med dagens prisnivåer för foderprodukter.
- Metanol och etanol kan betraktas som högförädlade och rena bränslen med betydligt högre priser än mindre förädlade bränslen. De blir därför ekonomiskt konkurrenskraftiga framför allt vid småskaliga tillämpningar med mycket höga krav på bränslets förbränningsegenskaper och vid mycket stränga miljökrav. Fordonsdrift kan betraktas som den mest småskaliga vanligast förekommande användningen med mycket högt ställda krav på bränslets egenskaper.
- Drivkrafter för ett framtida införande av metanol och/eller etanol som drivmedel för fordon kan vara mycket stränga miljökrav, eventuellt kopplade med skatter på t ex skadliga utsläpp och/eller skattelättnader för önskade drivmedel. Fortsatt fokusering av miljödebatten kring växthuseffekten och koldioxidutsläpp kan innebära ett ökat intresse för etanol framställd ur biobränslen.
- Elproduktion med metanol som bränsle kan eventuellt vara konkurrenskraftig vid lokaliseringar med mycket stränga miljökrav (t ex tätbebyggelse) och utan tillgång till naturgas. Priset på metanol är för högt för att kunna konkurrera med tillämpningar där gällande miljökrav kan uppfyllas med naturgas- eller oljedrift. Speciellt i större anläggningar med gasturbiner medger ekonomin omfattande avgasrening om ett billigt bränsle används. Om biobränsle används som primärråvara uppnås inga fördelar med att gå via alkoholer för större anläggningar.

- Små (upp till ett par MW) lokalt belägna bränsleceller kan eventuellt bli av intresse för metanoldrift i framtiden, då alkoholer är enkla att distribuera. Bränslecelltekniken är dock ännu ej kommersiell.
- Värmeproduktion genom eldning av metanol i panna kan vara av intresse för mindre pannor om mycket stränga miljökrav ställs.
- Lagring av naturgas som metanol är ej ekonomisk enbart som lastutjämning, främst på grund av energiåtgången för konverteringen. En möjlighet är som beredskapslagring av naturgas, men detta behöver utredas ytterligare.

ALLMÄNNA REFERENSER

IEA (International Energy Agency). Alcohols and alcohol blends as motor fuels. Status report Oct. 1986. Published as STU Information no 580-1986. Follow-up reports in series TRENDS following years.

IEA. Substitute fuels for road transport. A technology assessment Paris 1990

NE (Nämnden för energiproduktionsforskning). Tillverkning, hantering och användning av alternativa drivmedel i Väst-Europa. Projektresultat NE 1982:17.

STU (Styrelsen för teknisk utveckling). Effektivare energiteknik. STU information no 341-1983 och 342-1983.

STU. Användning av alternativa drivmedel. STU information no 588-1986.

STU. Alternativa värmemotorer. STU information no 592-1986

Industridepartementet. Strategi för alternativa drivmedel. Rapport från Oljeersättningsdelegationen. Ds I 1982:12.

Industridepartementet - Motoralkoholkommitén. Alkoholer som motorbränsle. SOU 1986:51.

DFE (Delegationen för energiforskning). Alternativa drivmedel. DFE rapport nr 48, 1982.

ISAF (Int. Symposium on Alcohol Fuels). Proceedings.

1980, Oct. 5-8 - Guarujá, SP-Brasil

1982, May 13-18 - Auckland, New Zealand.

1984, May 21-25 - Ottawa, Canada.

1986, Oct. 20-23 - Paris, Frankrike.

1988, Nov. 13-16 - Tokyo, Japan.

BMFT (Bundesministerium für Forschung und Technologie). Entwicklungslinien in Kraftfahrzeugtechnik und Strassenverkehr. Forschungsberichte 1979, 1980, 1981, 1982/83, 1984, 1986, 1988. Verlag TÜV Rheinland, Köln.

CERI (Canadian Energy Research Institute, Michelle Heath). Alternative Transportation Fuels. Study No.37. Feb. 1991. ISBN 0-920522-66-1.

CEC (California Energy Commission). AB 234 Report. Cost and Availability of Low-emission Vehicles and Fuels. Aug. 1989.

U.S.DOE (U.S.Department of Energy). Assessment of Costs and Benefits of Flexible and Alternative Fuel Use in the U.S. Transportation Sector. Technical reports. Progress reports. 1988, 1989, 1990.

Windsor Workshop on Alternative Fuels. Presented by Ortech International, sponsored by EMR Canada, U.S.DOE, Ontario Ministry of Energy. 1985 - 1990.

ÖVRIGA REFERENSER

Abe, T. et al (Mitsui Engineering). Development of a gas turbine combustor burning reformed methanol. VIII ISAF p.983. 1988.

Alson, J. & Gray, C. (U.S.EPA). Scientific American March 1990. Aven New Fuels Report May 7, 1990, p.2.

Ament, F. (General Motors). Tailpipe emissions from GM variable fuel Corsicas. Proc. Windsor Workshop 1990, p.108.

Anahara, R., Fuji Electronic Phosphoric Acid Fuel Cell Activities, Journal of Power Sources, 29, p 109-117, Fuji Electric Co., Ltd, Tokyo, 1990.

Andersson, S.J., Jackson, M.D. (Acurex Corp), Smith, K.D. (California Energy Commission). Synthetic fuels for stationary gas turbines: A California perspective. Stationary Gas Turbine Alternative Fuels. ASTM STP809, Philadelphia, 1983, pp 186-211.

Aoki, I., Shindou, A. (Chiyoda). Enhancing efficiency of methanol fuelled gas turbine. Proc. VIII ISAF, p. 959.

Appleby, A.J., Foulkes, F.R., Fuel Cell Handbook, Van Nostrand Reinhold, New York, 1989.

Baba, S. (Chugoku Electric Power). R&D of reformed methanol gas-type power generation system. VIII ISAF p.945. 1988.

Banti, A. et al (Nuovo Pignone, Ecofuel). Methanol in gas turbine for electricity production. Proc. VIII ISAF p.951. 1988.

Bardon, M.F. Methanol and ethanol as gas turbine fuels. Proc. IV ISAF p. I-387. 1980.

Bengtsson, C. (Svensk Etanol kemi AB). Personlig information.

Bertilsson, B-I. (Volvo Lastbilar). Experiences of heavy-duty alcohol fuelled diesel-ignition engines. SAE paper 871672

California Advisory Board on Air Quality and Fuels. Report to the California Legislature. Vol.4. Economics report Aug. 1989. Prepared by Acurex Corp.

CARB (California Air Resources Board). Proposed regulations for low-emission vehicles and clean fuels. Technical support document. August 13, 1990.

Choi, B.C. et al (Hokkaido univ.). Catalytic combustion of lean mixture for a room heater, VIII ISAF p. 1013. 1988.

CRC (Co-ordinating Research Council, Atlanta, Ga.). Auto/oil air quality improvement research program. Technical bulletin No.1 Dec. 1990.

Dahlgren, Lars (LRF). Personlig information.

Danko, E.A. et al. Test and evaluation of methanol in a gas turbine system. EPRI Report 988-1, Palo Alto, California, February 1981.

Decker, G. & Menrad, H. (Volkswagen). Fortschritte in der Methanolmotorentechnik von Volkswagen. BMFT Forschungsberichte 1986, p. VI-78.

Filho, V.B. et al (CESP, Sao Paulo). Experiences on methanol utilization on burners and boilers. V ISAF p.3-11. 1982.

Floody, B., Ethanol from Biomass - The Factors Affecting Its Commercial Feasibility. Preliminär IEA-rapport, 1989.

Gold, M.D. et al (U.S.EPA). Emission factor data base for prototype light-duty methanol vehicles. SAE paper 872055.

Granberg, R., Lagring av naturgasenergi i form av metanol. Examensarbete nr 5/89, Institutionen för värmeteknik, KTH, 1989.

Granquist, Å. et al. Förädlad metanol som bränsle för gasturbin. Projekteringsuppgift, KTH, Inst för Värmeteknik, Stockholm, mars 1990.

Hahn-Hägerdahl, B., (Lunds universitet), Personlig information.

Havenith, C. (Klöckner-Humboldt-Deutz). Experience with the Deutz glow plug assisted methanol engine for transit bus operation. VIII ISAF p.539. 1988.

Hayden, A.C.S. (EMR Canada). Methanol: An efficient fuel for domestic heating. VI ISAF p.3-313. 1984.

Hikino, K. et al (Hino Motors). Improvement of heavy-duty spark-assisted methanol engine for city bus. VIII ISAF p.525. 1988.

IKU (Sintef, Trondheim). Greenhouse gas emissions from off-shore oil and gas production on the Norwegian continental shelf. Report 90.145. Dec. 1990.

Industridepartementet, arbetsgruppen för etanolproduktion. Rapport 1991-06-06.

Ishoika, H. et al., Results of 100 kW methanol fueled PAFC pilot plant and recent cell technology development, Program and Abstracts from Fuel Cell Seminar in Arizona, november 1990.

JARI (Japan Automobile Research Inst.). Data collection and surveys on diesel-substitute methanol vehicle through proto-type driving test. March 1990. Report to IEA.

Jones, E.C. (Servic. Elec., Sao Paulo). The utilization of ethanol as a fuel in utility size boilers. IV ISAF p.I-403.1980.

Kajiwarra, H. et al (Mitsubishi Heavy Ind.). Availability study on conversion of stationary diesel engine to methanol fuel. VIII ISAF p.989. 1988.

Karpuk, M.E., Schell, D.J. (Solar Energy Research Institute), Testing of a small combustion turbine burning reformed methanol. Proc. 6 Int'l Symp. on Alcohol Fuels Technology, 1984.

Katoh, K. et al (Toyota Motor Corp.). Development of methanol lean burn system. SAE paper 86 02 47.

Lähdemäki, K., (Vattenfall Energisystem), Personlig information.

Miller, S.P. (Detroit Diesel Corp.). DDC methanol engine development status. Proc. Windsor Workshop 1990, p.339.

MOT (Ministry of Transport, Japan). Fleet test report of methanol trucks. October 1986.

Murayama, T. (Hokkaido univ.) et al. Development of a gasified methanol engine for stationary use. VIII ISAF p. 1001. 1988.

Naturvårdsverket. Avgasrening dieselfordon och Partikelfällor dieselfordon. Rapport 3170 resp. 3171 (1986-09).

Naturvårdsverket. Etanol som drivmedel? Rapport 3304 (1987).

Naturvårdsverket, LUFT'90 - Aktionsplan mot luftföroreningar och förurning, 1990. Med underlagsrapport Törnqvist, M. (Strålningsbiologiska inst., Sthlms univ.) Genotoxiska effekter och cancerrisker.

Naturvårdsverket. Biobränslen från jordbruket. Rapport 3713. 1990/01.

Neophytides, S., Vayenas, C.G. Chemical Cogeneration in Solid Electrolyte Cells, The Oxidation of CH_3OH to H_2CO , Journal of Electrochemical Society, Vol. 137, No. 3, sid 839-845, Mars 1990, Department of Chem. Engineering University of Patras, Patras Grekland.

Nichols, R. (Ford Motor Co). Up-date on Ford's dedicated and FFV methanol vehicles. Light-duty methanol workshop. Los Angeles . April 6-7, 1987.

Nogi, T. et al., Developments of 200 kW phosphoric acid fuel cell system for detached islands, Program and Abstracts from Fuel Cell Seminar in Arizona, november 1990.

Nynäs Petroleum/Nämnden för energiproduktionsforskning. Energi-kombinat Stockholm-Nynäshamn. Metanol-bränslegas-fjärrvärme. Projektresultat NE 1981:6.

Pettersson, L. & Sjöström, K. (KTH). Decomposed methanol an excellent cold start fuel for S-I-engines. VII ISAF 1986, compl. vol., p.77. Även STU-projekt 85-3873, rapp. feb 1987.

Pettersson, L. (KTH). Theoretical and experimental studies of the S-I engine fueled by catalytically decomposed methanol. KTR 90-10. 1990-05-02.

Phillips, V.D., Takahashi, P.K. Methanol from biomass. Environ.Sci.Technol. 24 (1990):8, p. 1136.

Phillips, V.D. et al. (Hawai Nat. Energy Inst), Thermochemical production of methanol from biomass in Hawaii. Applied Energy 35, 1990, pp 167-175.

Potter, R. (General Motors). GM's variable fuel cars. Light-duty methanol vehicle workshop. Los Angeles. Apr. 6-7, 1987.

Saab-Scania AB. Scania information N89-09-01/23. Etanolmotor i stort upplagt fältprov med Scania stadsbussar. Även broschyr från Storstockholms Lokaltrafik - Etanol ett alternativ? 1990.

Sauerteig, J.E. et al (Deutz Corp.). Performance and emission characteristics of the Deutz air-cooled heavy-duty methanol engine. Windsor workshop 1987, p.119. Även SAE paper 870812.

SDAB (Svensk Drivmedelsteknik AB). Project M100. STU information no. 640-1987.

SDAB/NE. Torvbaserat energikombinat. NE (Nämnden för energiproduktionsforskning) rapport BF 83/9. 1983.

Siewert, R.M. et al (General Motors). Unassisted cold starts to -29°C and steady state tests of a direct-injection engine operated on neat alcohols. SAE paper 87 20 66.

SSEU (Stiftelsen Svensk Etanolutveckling). Fullskalig etanolproduktion. Rapport juni 1987. Även: Industridepartementet. Ds I 1986:9.

Stokes, C.A. Paper at 1990 World Methanol Conference, Marbella, refererat i The Clean Fuels Report, Febr. 1991, p.79 (ISSN 1051-3116).

Sylwan, C., Utveckling av metanol-luft bränslecell för lätta traktionära ändamål, doktorsavhandling, Institutionen för Kemisk Teknologi, KTH, 1980.

Tatsuta, S. & Ito, K. Thermal efficiency and emission characteristics of pot-type burning space heater. VI ISAF p.1-371. 1984.

TFB (Transportforskningsberedningen). Etanoldrivna bussar. TFB-meddelande nr 86. Mars 1989. Med kompletterande rapport 1989-10-10 Karakterisering av avgaser från etanoldriven Scaniabuss av ELAB Utveckling AB.

Thyberg, S., Systemstudie av naturgasbaserade alkaliska bränslecellkraftverk, Institutionen för Kemisk Teknologi, KTH, 1988.

U.S.DOE. Assessment of costs and benefits of flexible and alternative fuel use in the U.S. transportation sector. Technical report three: Methanol production and transportation costs. November 1989. DOE/PE-0093.

U.S.DOE. Ibid. Technical report four: Vehicle and fuel distribution requirements. August 1990. DOE/PE-0095P.

U.S.DOE. Biomass-to-methanol. Study report refererad i The Clean Fuels Report, Febr. 1991, p. 91 (ISSN 1051-3116).

U.S.EPA (Environmental Protection Agency). Guidance on estimating vehicle emission reduction from the use of alternative fuels and fuel blends. EPA-AA-TSS-PA 87-4, Jan.29, 1988.

U.S.EPA. Analysis of the economic and environmental effects of methanol as an automotive fuel. Special report - Office of mobile sources. September 1989.

van der Weide, J. et al (TNO). Flexible fuel vehicles optimized on methanol. VIII ISAF p.765. 1988.

Williams, R.L. et al (General Motors). Formaldehyde, methanol and hydrocarbon emissions from methanol-fueled cars. J. Air Waste Manage. Assoc. 40 (1990):5, p. 747-756.

Wright, J.D., Ethanol from Lignocellulose: An overview, Energy Progress, Vol 8, No 2, p 71, 1988.

Östman, A. (Kemiinformation AB), Personlig information.