




TEKNOLOGISK
INSTITUT

J. nr. 64011-0341

Anvendelse af alkoholer som dieselbrændstof i blandinger og emulsioner



Titel:

Anvendelse af alkoholer som dieselbrændstof i blandinger og emulsioner

Udarbejdet for:

EUDP 11-II

Udarbejdet af:

Teknologisk Institut
Teknologiparken
Kongsvang Allé 29
8000 Aarhus C
Transport og Elektriske Systemer

Marts 2015

Forfatter: Troels Dyhr Pedersen

1. Indhold

2. Opsummering	5
3. Baggrund	6
4. Introduktion til alkoholer som brændstof i forbrændingsmotorer	7
Anvendelse af alkohol i gnisttændingsmotorer	7
Anvendelse af alkoholer i kompressionstændingsmotorer	7
Direkte indsprøjtning og kompressionstænding af alkohol	8
Scanias ethanol-motorer.....	8
Videreudvikling af kompressionstændingsprincippet	9
Alkoholer kombineret med diesel i "dual fuel" motorer.....	9
SPIRETH projektet	9
Reformering af alkoholer til ætere.....	10
OBATE projekterne	10
5. Alkoholers grundlæggende egenskaber	11
Sammenligning af fysiske og kemiske egenskaber for alkoholer, diesel og benzin	12
6. Produktion af alkoholer	14
Metanol	14
Ethanol.....	14
Butanol	15
7. Anvendelse af rene alkoholer som brændstof	16
Metanol som brændstof	16
Ethanol som brændstof.....	16
Butanol som brændstof	17
8. Blandinger af alkoholer og diesel	18
Definition.....	18
Cosolventer.....	18
Stabilitet af blandinger	18
Blandbarhed af metanol.....	18
Blandbarhed af ethanol.....	19
Blandbarhed af butanol	19
Opløselighed af alkoholer i biodiesel.....	19
Vandindholdets betydning for stabiliteten af blandinger	19
Konsekvenser af fase separation.....	20
9. Emulsioner af alkohol i diesel	21
Definition.....	21

Beskrivelse af emulsioner	21
Baggrund for anvendelse af emulsioner med diesel	22
Forudsætninger for dannelse af emulsioner med diesel og alkohol	22
Effekt af vandindhold i emulgerede alkoholer	22
Emulgatorer	23
On-board emulgering	23
10. Erfaringer fra forsøg med E-diesel i Danmark.....	24
11. Konklusion	25
12. Litteraturliste.....	27
13. Potential savings for omitting the dehydration unit at an ethanol plant.....	29
CAPEX	29
OPEX.....	29
Cost of dehydrating ethanol	29
14. Report on engine test of diesel blended with methanol, ethanol and n-butanol.....	30

2. Opsummering

Denne rapport omhandler anvendelse af alkohol som blandingskomponent i dieselbrændstof.

Rapporten er udarbejdet for at danne et overblik over anvendelse af alkohol som brændstof i motorer, både generelt og specifikt som blandingskomponent i dieselbrændstof.

I introduktionen beskrives først alkohols historiske baggrund som brændstof i benzinmotorer, og derefter hvilke teknologier der i dag kan tænkes anvendt til forbrænding af alkohol i dieselmotorer.

I de følgende afsnit omtales først de grundlæggende fysiske og kemiske egenskaber for alkoholer, som har relevans for anvendelsen som brændstof. De produktionsmæssige aspekter og anvendelighed som brændstof beskrives herefter for alkoholerne metanol, ethanol og butanol.

I afsnittet om blandinger og emulsioner gennemgås den grundlæggende forskel på en blanding og en emulsion, som er de to måder hvorpå alkoholer kan kombineres med dieselbrændstof. Det beskrives hvilke faktorer som har betydning for blandbarheden af alkoholer i diesel.

Endelig er der som en del af projektet udført forsøg med blandinger af diesel og metanol, ethanol og butanol ved Teknologisk Institut. Der er på baggrund af disse forsøg skrevet en selvstændig rapport, som også er præsenteret ved et projektmøde i IEA-AMF Anneks 46 arbejdsgruppen. Rapporten er vedlagt som appendiks.

Studiet er finansieret af midler fra EUDP 11-II. Midlerne er givet til deltagelse i IEA-AMF Anneks 46, som omhandler anvendelse af alkohol i dieselmotorer.

3. Baggrund

Motivationen for at undersøge alkoholer som blandingskomponent i dieselbrændstof er opstået som følge af at dieselbrændstof, i lighed med benzin, er en knap ressource som er under pres grundet stigende forbrug og stagnerende produktion. Benzin kan imidlertid erstattes direkte med andre brændstoffer såsom metanol og ethanol, ligesom der findes mange alternative måder at producere syntetisk benzin på. Diesel derimod er mere krævende at fremstille syntetisk. Det er også mere vanskeligt at erstatte diesel i større omfang med biologiske alternativer. Derfor er det af stor interesse at finde måder hvorpå billige biobrændstoffer som fx alkoholer kan erstatte diesel.

En anden interessant virkning af at tilsætte alkohol til diesel er, at der kan være andre væsentlige miljømæssige fordele i form af en lidt bedre virkningsgrad på motorerne, samt lavere emissioner af partikler. Talrige studier fra det sidste årti har dokumenteret de positive effekter af diesel/alkohol blandinger, om end studierne også påpeger de væsentlige udfordringer som består i at blande diesel og alkoholer.

Endelig vil erstatning af fossil diesel med alkoholer fremstillet af biomasse kunne give en stor reduktion i CO₂ udledningen. Denne reduktion vil imidlertid kun gælde for biomasse baserede alkoholer, idet alkoholer baseret på syntetiske processer (fx metanol fremstillet på basis af kul eller naturgas) vil medføre en højere CO₂ udledning grundet energitab i de mellemliggende produktionstrin.

Ethanol og metanol er delvist opløselige i diesel og kan derfor iblandes i lave koncentrationer, under gunstige forhold med tilpas høje temperaturer. Blandinger med selv lave koncentrationer af diesel og metanol/ethanol vil dog separere når temperaturen i blandingen kommer under ca. 10 grader. En anden væsentlig udfordring består i at selv lave koncentrationer af vand i alkoholerne (eller dieselen) øger tendensen til faseseparation. Resultatet er at alkohol og vand udfælder i bunden af brændstoftanken, hvilket kan medføre motorstop, ligesom det kan skade brændstofsyste­met. Det er imidlertid muligt at lave mere temperaturstabile blandinger af diesel og alkoholer ved at anvende emulgatorer. Når der tilsættes emulgatorer kan der skabes såkaldte emulsioner, hvor alkoholen ikke er sammenblandet men i stedet findes som mikroskopiske dråber omgivet af diesel. I emulsionerne er der også muligt og i nogle tilfælde fordelagtigt at der også er vand i emulsionen, da det kan forbedre emulsionens stabilitet. Det kræver til gengæld ofte en dedikeret proces at skabe emulsioner. Derfor kan emulsioner i praksis kun skabes på stationære anlæg, hvilket sammen med omkostningen til emulgatorerne fordyrer brændstoffet.

En anden tilgang til at skabe stabile blandinger med alkoholer er at anvende alkoholer med længere kulstofkæder såsom butanol, enten som alternativ eller i kombination med de lettere alkoholer. Butanol er fuldt blandbart med benzin og kan også anvendes direkte i benzinmotorer. Butanol udmærker sig endvidere ved at danne langt mere stabile blandinger med diesel end metanol og ethanol. Det er også muligt at anvende butanol i kombination med både metanol og ethanol, hvilket forbedrer stabiliteten af blandingerne. Butanol har i lang tid været urentabelt at producere ved biologiske processer, men nyere forskning kan måske bane vejen for butanol som den næste generation af biobrændstof.

4. Introduktion til alkoholer som brændstof i forbrændingsmotorer

Anvendelse af alkohol i gnisttændingsmotorer

Anvendelsen af ethanol som brændstof rækker helt tilbage til opfindelsen af benzinmotoren. Nikolaus Otto brugte ethanol i de første modeller af gnisttændingsmotorer i 1860. Motorerne blev kendt som Otto motorer, men kaldes i dag benzinmotorer. Ethanol udmærker sig som brændstof til benzinmotorer ved at have en høj modstandsdygtighed mod bankning, hvilket beskrives ved oktantal som er omkring 115, hvor benzin typisk sælges som oktan 92 eller 95. Dette betyder at ethanol fungerer fint i benzinmotorer, særligt hvis kompressionen er lidt højere end normalt, da ydelsen og virkningsgraden dermed kan hæves betydeligt.

I dag bruges ethanol stadig i vid udstrækning i en række lande som erstatning for, eller som additiv i benzin. Benzinblandinger med metanol er også blevet et alternativ, særligt i Kina som har en stor produktionskapacitet for metanol baseret på kul. Metanol har ligeledes været anvendt i mange år i nogle former for motorsport, særligt i USA, da brændstoffet er mere sikkert end benzin.

Således har de simple alkoholer – metanol og ethanol – i lang tid fungeret som økonomisk rentable og teknisk acceptable alternativer til benzin, både som blandingskomponent og som rent brændstof. Der er således etableret industriel kapacitet, distributionskanaler og lovmæssigt grundlag som understøtter brugen af alkoholerne. Endvidere er der opnået stor erfaring med sikkerhed, miljøaspekter, produktionsmetoder og omkostninger, ligesom der er forsket intensivt i andre vigtige emner som fx forbrænding, emissioner, korrosion og materialekompatibilitet i brændstofsyste­mer og andre tekniske aspekter.

Anvendelse af alkoholer i kompressionstændingsmotorer

Som naturlig følge af den succes alkohol har opnået i benzinmotorer er der opstået interesse for at se på anvendelsen af alkohol i dieselmotorer. Dette er først og fremmest begrundet i økonomiske interesser, idet de simpleste alkoholer som udgangspunkt ikke er kvalificerede kandidater til at erstatte diesel. Ikke desto mindre er der ganske store økonomiske, forsyningssikkerhedsmæssige og miljømæssige incitament­er. De økonomiske og forsyningssikkerhedsmæssige består i at fastholde en lavere pris på diesel, ved at substituere en del af forbruget med lokal produktion af alkohol og derved holde efterspørgslen nede. De miljømæssige gælder CO₂ emissionerne, som kan sænkes med CO₂ neutrale alkoholer, såvel som en potentiel reduktion i udledningen af partikler og kvælstofoxider som kan opnås hvis der udvikles dieselmotorer som kan køre på alkoholer eller blandingsbrændstoffer med alkoholer.

Hvor benzinmotorer med relativt få ændringer kan anvende ethanol eller metanol direkte, er det langt mere vanskeligt med dieselmotorer, idet disse motorer ikke kan anvende brændstoffer der i store træk har samme egenskaber som benzin. Mens blandinger og emulsioner med alkoholer som blandingskomponent er hovedtemaet i denne rapport, findes der også en række teknologispør som i praksis gør det muligt at anvende alkoholer i dieselmotorer, enten direkte eller indirekte. Disse principper vil blive omtalt i de følgende underafsnit.

Direkte indsprøjtning og kompressionstænding af alkohol

Ethanol kan under de rette betingelser anvendes som direkte erstatning for diesel, men det kræver langt højere temperatur i forbrændingskammeret at antænde alkohol end diesel. Derfor er det nødvendigt at sikre antændelsen ved et meget højt kompressionsforhold, eller ved en antændelseskilde som fx et gløderør. Der er i tiden også lavet enkelte dieselmotorer der kunne køre på metanol, men med meget begrænset succes.

Scanias ethanol-motorer

Scania har pt. som de eneste i verden en færdigudviklet dieselmotor med højt kompressionsforhold, som kan køre direkte på ethanol tilsat additiver, som forbedrer brændstoffets tændingsegenskaber. Scania udviklede deres dieselmotorer til drift på ethanol omkring 1985, og har siden leveret mere end 600 busser til drift i hovedsageligt svenske byer. I dag kører over halvdelen af alle svenske bybusser på ethanol, men der er også mange busser i drift på verdensplan.¹

Bussernes motorer er baseret på Scanias standardmotorer og komponenter i let modificerede versioner, hvilket er med til at holde meromkostningen nede på motorinstallationen. Den væsentligste modifikation består i at kompressionsforholdet på motorerne er forøget til 28 vha. stempler med højere kompression, hvilket øger temperaturen under kompressionsfasen og dermed letter antændelsen af ethanolen. Derudover anvendes tændingsforbedrende additiv til at sikre en tilpas hurtig antænding.

ETAMAX D brændstoffet udgøres af 92 % vandholdig ethanol (5 % vand), 5 % tændingsforbedrende additiv (Beraid 3540), 2,8 % denatureringsmidler (MTBE og iso-butanol) samt rusthæmmende additiv.² Idet ethanol udgør langt størstedelen af brændstoffet er der ikke problemer med fase-separation som hvis diesel var blandet med en mindre andel ethanol. Endvidere sikre ethanolens meget lave frysepunkt at der ikke opstår problemer med voksdannelse i motorbrændstoffet, hvilket ellers kan være et problem i ekstreme kuldegrader.

Ethanol har i sin rene form meget lav smøreevne. Det tændingsforbedrende additiv har en smørende effekt, men ikke nok til normale højtrykspumper. I Scanias ethanol-motorer anvendes imidlertid enhedsinjektorer, hvor højtrykspumpe og dyse er sammenbygget i én enhed, som blot skal tilføres brændstof ved lavt tryk. Enhedsinjektorerne er tilpasset brændstoffets lavere viskositet ved at pumpeelementet og andre belastede dele er belagt med DLC (Diamond-Like-Carbon), hvilket sikrer at dyserne har samme holdbarhed som normale dyser til diesel.

Scanias ethanol-motorer er et godt eksempel på en succesfuld implementering af teknologi til anvendelse af ethanol i transportformål. Successen skyldes primært Scanias eget initiativ som motorudvikler, idet ombygninger på eksisterende motorer foretaget af 3.parts interessenter ikke ville gøre det muligt at anvende samme høje andel af ethanol direkte i motorerne.

¹ <http://scania.com/media/pressreleases/N08013EN.aspx>

² http://www.iea-amf.org/content/fuel_information/ethanol/special_engines_ethanol/diesel_engines_ethanol

Videreudvikling af kompressionstændingsprincippet

Der er på forskningsniveau nye forbrændingskoncepter under udvikling, hvor alkohol med fordel kan anvendes i kompressionstændingsmotorer. Et af disse er PPC (partial premixed combustion) som minder om det princip der anvendes i nogle benzinmotorer med direkte indsprøjtning, når disse kører i dellast (lean combustion). En del af brændstoffet sprøjtes ind tidligt under kompressionen, mens resten indsprøjtes ved normal timing. Ved samtidig at anvende forvarmet luft i indsugningen i kombination med additiver kan alkoholerne antændes. Grundet en ekstremt hurtig forbrænding kan motorer med dette princip opnå langt højere virkningsgrader end normale dieselmotorer, samtidig med at emissionerne af partikler og kvælstofoxider kan holdes på et lavt niveau. I princippet kan de fleste brændstoffer bruges, men alkoholerne har vist sig særligt anvendelige grundet deres høje oktantal, som gør at de modstår for tidlig tænding.

Alkoholer kombineret med diesel i "dual fuel" motorer

Dette princip består i at tilsætte alkohol separat, enten i indsugningsluften eller ved en sekundær dyse i forbrændingskammeret. Antændelsen sker ved at der indsprøjtes diesel gennem den normale dieselinjektor. Dieselbrændstoffet vil antænde først og derved starte forbrændingen af den tilsatte alkohol. Princippet kan bruges hvor det er muligt at ombygge og tilpasse motorerne. Det er dog mere sandsynligt at princippet vil kunne findes i fremtidige motorer.

SPIRETH projektet

Stena Line har siden 2013 arbejdet med at implementere dual fuel princippet i deres motorer på STENA Germanica i SPIRETH projektet. Dette projekt vil være den første storskala udnyttelse af metanol i dieselmotorer på skibe. Baggrunden er indførelsen af SECA (Sulfur Emission Controlled Area) zonerne, som har til formål at opnå renere emissioner fra skibstrafikken. Der er løbende sket en opstramning af grænseværdierne for svovlindholdet i brændstoffet, som skibene må anvende i de farvande hvor SECA zonerne er gældende. Næste trin er en grænseværdi på 0,1 % (m/m) gældende fra 1. januar 2015. Alternativet til brændstof med lavt svovlindhold er at installere systemer til rensning af røggassen for svovl, hvilket i praksis er våd-skrubbere svarende til dem som anvendes på kraftværker.

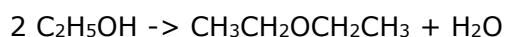
Idet brændstof med 0,1 % svovlindhold er omkring 50 % dyrere end brændstof med 1 % svovl vil selskaberne bag skibstrafikken opleve dramatiske stigninger i deres brændstof omkostninger, når reglerne træder i kraft. Dette har tvunget rederierne til at handle. Der er således i dag flere godkendte røgrensningssystemer installeret på skibe som sejler i SECA farvande, som kan nedbringe emissionerne af svovldioxid svarende til forbrænding af brændstoffet med den gældende grænseværdi for svovl.

Rederiet Stena Line har valgt at undersøge en alternativ løsning, som består i at bruge metanol direkte og indirekte i deres motorer. Denne løsning undersøges pt. i et projekt som kaldes SPIRETH (SPIrits and EThers as marine fuel) Projektet er støttet af bl.a. den danske maritime fond og det svenske energiagentur. Direkte indsprøjtning af ren metanol gennem en såkaldt Dual-Fuel injektor er pt. ved at blive afprøvet af Wärtsilä. Dette skal efter planen implementeres på Stena Germanica. Herefter vil skibets fremdriftsmotorer kunne køre med over 90 % metanol, idet HFO kun skal anvendes til pilot-forbrænding hvorefter metanolen indsprøjtes og udgør hovedforbrændingen.

Anvendelse af metanol skal ses som et alternativ til LNG. Andre rederier, primært norske, har valgt at satse på LNG som brændstof til deres hovedmotorer. Samsø har ligeledes valgt at satse på LNG. Stena Line er således enestående i deres valg af metanol, så projektets succes og erfaringerne herfra vil i høj grad medvirke til at sætte dagsordenen for fremtiden. SPIRETH projektet er imidlertid stadig interessant, idet potentialet for at anvende 100 % ren metanol som dieselbrændstof er økonomisk og miljømæssigt attraktivt.

Reformering af alkoholer til ætere

Fremfor at anvende alkoholerne direkte i motorerne, kan man i stedet betragte dem som en flydende energibærer der kan omdannes til bedre egnede motorbrændstoffer. De bedste eksempler herpå er omdannelse af metanol og ethanol til hhv. dimethyl og diethyl æter ved katalytisk dehydrering gennem processerne:



Både dimethyl og diethyl æter er særdeles gode dieselbrændstoffer, som brænder med minimal udvikling af sod og lavere niveauer af kvælstofoxider. Dimethyl æter er en gas med fysiske egenskaber som ligner propangas, og kan altså transporteres som væske under tryk. Diethyl æter er en væske med et kogepunkt på ca. 35 °C og har en meget lav selvantændelsestemperatur. Begge ætere har cetantal som er højere end diesel, og vil derfor kunne fungere som direkte erstatning for diesel hvis man tilpasser motorens brændstofsysteem til disse væsker. Der kører allerede en del lastbiler på forsøgsbasis i Japan, og store virksomheder som fx Volvo har også gjort sig erfaringer med DME som motorbrændstof.

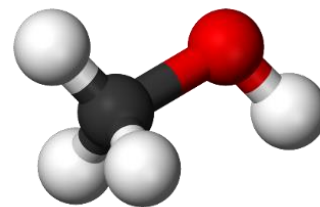
OBATE projekterne

Haldor Topsøe har bygget mange store anlæg til DME produktion i udlandet. De har i samarbejde med blandt andet Teknologisk Institut også arbejdet på kompakte reformeringsenheder til skibe, som kan reformere metanol ombord på skibet, til et produkt som består af dimethyl æter, vand og en rest af metanol. Dette er foregået parallelt med Wärtsiläs udvikling af metanol indsprøjtning i hovedmotorerne i SPIRETH projektet. Det reformerede produkt bestående af dimethyl æter, metanol og vand er sammen med processen patenteret af Haldor Topsøe under navnet OBATE. Formålet med reformeringen er at opgradere et brændstof med lavt cetantal (dårlige tændingsegenskaber) til et brændstof med så gode egenskaber at det kan anvendes direkte i dieselmotorer. Teknologisk Institut bidrog til projektet med modificering af generatorsæt til drift på denne blanding. Grundet tekniske vanskeligheder med idriftsættelsen af reformeringsanlægget og store udfordringer med at få brændstoffet til at fungere i motorerne valgte Stena Line at sætte projektet på pause i starten af 2014.

OBATE teknologien er baseret på simple katalytiske processer som kan nedskaleres og anvendes på fx tankstationer. Således kan der fremstilles og tankes rene og miljøvenlige dieselbrændstoffer baseret på metanol og ethanol, som er billige brændstoffer der er lette og sikre at distribuere. Haldor Topsøe har også arbejdet på at udvikle OBATE anlæg som kan monteres i lastbiler. Det er dog tvivlsomt om teknologien kan gøres billig og kompakt nok til sådanne anvendelser.

5. Alkoholers grundlæggende egenskaber

De lette alkoholer metanol, ethanol, propanol og butanol adskiller sig kemisk fra de lette alkaner (kulbrintekæder med enkeltbindinger) ved at have en OH-gruppe, også kaldet hydroxylgruppe, koblet på et af kulstofatomerne. Dette gør de letteste af alkoholerne (metanol og ethanol) polære nok til at de er blandbare med vand, men ikke så polære at de ikke i nogen grad er blandbare med andre kulbrinter. Butanol findes i fire forskellige former (isomere) med forskellige grader af polaritet, hvor N-butanol er den mindst polære og dermed mest blandbar med diesel.



Figur 1: Model af metanol molekyle.

Hydroxylgruppen består af et ilt (rød) og et brint (hvid) atom, som her sidder koblet på et kulstof atom (sort)

Hydroxylgruppen er den direkte årsag til at alkoholerne har en væsentlig lavere brændværdi end de tilsvarende alkaner. Dette skyldes hovedsageligt at iltatomet indgår i brændstoffets vægt, hvilket går ud over den massespecifikke brændværdi. Endvidere er iltet bundet til et kulstofatom, hvorved der på forhånd er afsat en del af den energi som brændstoffet kan afgive ved omdannelse til CO₂ og vand. Dette betyder også at flammemetemperaturen for alkoholer er lidt lavere end for de tilsvarende alkaner. Til gengæld betyder den bundne ilt at brændstoffet oxidere hurtigere under forbrændingen, hvilket modvirker dannelse af sodpartikler.

Hydroxylgruppen er også årsagen til at alkoholerne har et meget højere kogepunkt end de tilsvarende alkaner. Tabel 1 viser kogepunkterne for de letteste alkaner og de tilsvarende alkoholer. Det høje kogepunkt er en stor fordel i forhold til håndtering, idet flydende brændstoffer kan distribueres og lagres langt billigere, nemmere og sikrere, end hvis de skal være tryksatte og nedkølede for at være flydende.

Tabel 1: Kogepunkter for de letteste alkaner og alkoholer

Alkaner (gasser)	Kogepunkt (°C)	Alkoholer (væsker)	Kogepunkt (°C)
Metan	-160	Methanol	65
Ethan	-88	Ethanol	78
Propan	-42	Propanol	98
N-butan	-1	N-butanol	118

Medens metanol og ethanol er udbredte som brændstoffer til benzinmotorer i dag. Butanol forventes også at kunne bruges som erstatning for diesel, såfremt produktionsomkostningerne kan sænkes. Propanol derimod anses generelt ikke som en kandidat til motorbrændstof, idet det er for dyrt at producere. Propanol anvendes dog til andre formål, primært som opløsningsmiddel. Iso-propylalkohol, som er en isomer af propanol, anvendes mest som additiv til benzin, idet dets hygroskopiske egenskaber holder lave koncentrationer af vand opløst i benzinen og derved beskytter brændstofsyste

Sammenligning af fysiske og kemiske egenskaber for alkoholer, diesel og benzin

Tabel 2: Vigtige fysiske og kemiske egenskaber for alkoholer og konventionelle brændstoffer

	Metanol	Ethanol	Butanol*	Diesel B7	Benzin E95 95 oktan
Vægtfylde @ 20 °C [g/cm ³]	0,79	0,79	0,81	0,83	0,76
Kogepunkt [°C] **	65	78	117	200-360	30-200
Frysepunkt [°C] ***	-97	-114	-89	-12 / -24	- 40
Energitæthed [MJ/L]	15,8	21,2	27,9	35,4	33,3
Nedre brændværdi [MJ/kg]	20,1	26,9	34,4	42,7	43,8
Flammepunkt	12	16	35	56	-43
Selvantændelsestemperatur	470	365	397	235	280
Cetantal (CEN)	5	8	25	51	5-20
Oktantal (MON)	104	102	78	15-25	85
Oktantal (RON)	136	129	96	-	95

*Gennemsnit af de fire isomere

**Destillationsintervallet for benzin og diesel

***CFPP (cold filter plugging point) for diesel ved hhv. sommer og vinterdiesel. Ved denne temperatur dannes voks af de tungeste parafiner, hvorved brændstoffilteret tilstoppes.

Den nedre brændværdi (i MJ/kg) er defineret som den mængde energi der frigøres ved forbrænding af et brændstof der som udgangspunkt er 25 °C, og hvor forbrændingsprodukterne nedkøles til 150 °C. Den nedre brændværdi tager dermed højde for at det dannede vand ikke kondenseres. Energitætheden i MJ/L, som ofte er mest relevant for brændstoffer på væskeform, fremkommer ved at gange brændstoffets densitet med den nedre brændværdi.

Flammepunktet (engelsk: flash point) er defineret som den temperatur, hvor dampene fra brændstoffet kan antændes. I praksis måles dette i et særligt standardiseret apparat. Flammepunktet har stor betydning for sikkerheden ved håndtering og opbevaring af brændstoffer, idet et lavere flammepunkt i praksis medfører større risiko for selvantændelse. Dette betyder at der kan være væsentlige sikkerhedsproblemer ved at blande brændstoffer med lave flammepunkter som fx alkoholer, med diesel som ellers har et højt flammepunkt og derfor er relativt sikkert at håndtere.

Selvantændelsestemperaturen er den temperatur hvor brændstoffet antænder spontant, hvilket har størst relevans for dieselmotorer som tænder brændstoffet ved hjælp af varmen fra kompressionen. Idet alkoholerne har langt højere selvantændelsestemperaturer end diesel, vil en blanding af alkohol og diesel alt andet lige medføre en højere selvantændelsestemperatur, hvilket i praksis betyder at brændstoffet er længere tid om at antænde. Dette er særligt relevant for blandinger med høje koncentrationer af alkohol, idet selvantændelsestemperaturen vil blive markant højere hvilket især kan være et problem ved start på kold motor.

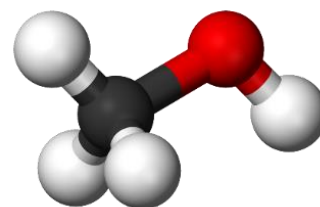
Cetantallet måles efter en ISO standard, hvor brændstoffets evne til selvantændelse bestemmes ved at teste det i en standardiseret motor. Testen foregår ved at blande to referencebrændstoffer indtil referencen har de samme egenskaber som det brændstof der skal bestemmes. Cetantallet defineres som forholdet mellem referencebrændstofferne. Jo højere cetantal, jo bedre er brændstoffet som dieselbrændstof. Det er i dag et krav til dansk diesel at det har et cetantal lig med eller højere end 51. Ved iblanding af alkoholer i diesel vil cetantallet falde proportionalt med mængden af den iblandede alkohol. For at kompensere for dette kan man iblande additiver til forbedring af cetantallet.

Oktantallet kan bestemmes på to lidt forskellige måder, hvilket giver hhv. Research Octane Number (RON) og Motor Octane Number (MON). I lighed med cetantallet er oktantallet defineret som blandingsforholdet mellem to referencebrændstoffer. Tallet er et udtryk for brændstoffets evne til at modstå selvantændelse, idet selvantændelse i en benzinmotor giver uønsket kraftig forbrænding kendt som bankning. Derfor skal oktantallet gerne ligge omkring 92-95 for normale motorer. Idet cetantal og oktantal er komplementære, vil et højt oktantal som hovedregel være ensbetydende med et lavt cetantal. Både ethanol og metanol har meget høje oktantal, så især ethanol anvendes i stedet for andre additiver som fx MTBE til at øge oktantallet for benzin.

6. Produktion af alkoholer

Metanol

Metanol er den simpleste alkohol med kun ét kulstofatom. Metanol har en forholdsvis lav specifik brændværdi, men brænder til gengæld med en meget ren, usynlig flamme uden røg. Der kan derfor være store fordele ved at anvende metanol som blandingskomponent i diesel, idet emissioner af især partikler kan sænkes markant.



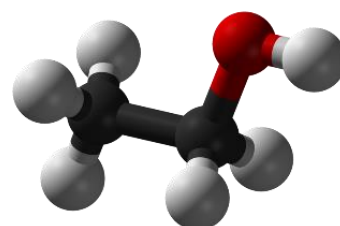
Figur 2: Model af metanol molekyle

Metanol produceres i dag hovedsageligt vha. katalytisk omdannelse af syntesegas, som består af kulmonoxid og brint.

Syntesegassen produceres oftest af naturgas, om end lande med store forekomster af kul som fx Kina hovedsageligt bruger kul til produktionen af kulmonoxid og producerer brinten ved spaltning af vand. Metanol kan derfor overvejende betragtes som en energibærer baseret på naturgas eller kul, hvor en del af energiindholdet i gassen eller kullet er brugt på at danne et nyt brændstof, som til gengæld bedre kan transporteres og udnyttes.

Ethanol

Ethanol er den mest kendte alkohol, som har to kulstofatomer. Ethanol har en lidt højere brændværdi end metanol, og brænder med en ren, blålig flamme som regel uden soddannelse. Ligesom med metanol kan der være store fordele ved at anvende ethanol som blandingskomponent i diesel med henblik på at sænke emissioner af partikler.



Figur 3: Model af ethanol molekyle

Produktionen af ethanol foregår i dag langt overvejende ved biologisk fermentering af stivelsesholdige afgrøder, hvorefter

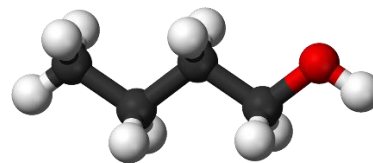
ethanol destilleres fra. Denne proces er traditionelt anvendt til produktion af alkohol til indtagelse. De anvendte afgrøder afhænger af de lokale ressourcer, hvor det fx i USA hovedsageligt er majs, mens Brasilien anvender sukkerrør. Anvendelsen af afgrøder som er en fødekilde anses for problematisk, idet en stor del af verdens befolkning i forvejen lever på sultegrænsen. Et økonomisk incitament til at producere brændstof af fødevarer er derfor ikke alene moralsk angribeligt, men vil potentielt kunne forværre situationen i de fattige lande hvis disse motiveres til at producere brændstof frem for fødevarer.

Der har i det seneste årti været forsket målrettet i anvendelse af restprodukter fra landbrug og skovbrug til produktion af bio-ethanol, herunder særligt halm. Bio-ethanol fremstillet af restprodukter kaldes også 2.generations bio-ethanol. Udfordringen har primært været at nedbryde cellulosen, således at det kan anvendes i fermenteringsprocessen. Denne proces er opnået ved at anvende særlige enzymer. Danmark har været foregangsland i denne udvikling, gennem firmaer som bl.a. Novozymes, Biogasol og Inbicon.

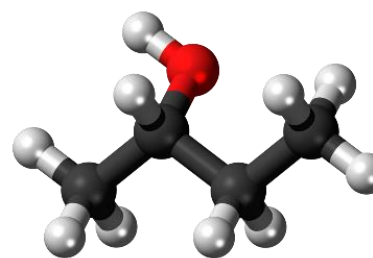
Butanol

Butanol er fællesbetegnelsen for fire isomere af C₄ alkohol, som er vist i figur 4-7. Isomererne har lidt forskellige fysiske og kemiske egenskaber. En vigtig forskel ligger i at n-butanol er svært opløselig i vand, og derfor heller ikke er hygroskopisk (tiltrækker vand) som ethanol og metanol. Det betyder at n-butanol altid vil være blandbart med diesel, og derfor også er den mest oplagte kandidat til iblanding. Sec-butanol og iso-butanol er moderat opløselige i vand, mens tert-butanol er fuldt vandopløselig.

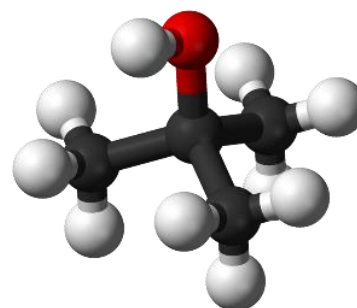
N-butanol blev op til år 1950 produceret ved fermentering, ved hjælp af en bakteriestamme kaldet *Clostridium Acetobutylicum*. Fra 1950 til i dag benyttes relativt komplicerede petrokemiske processer til at producere de forskellige isomere af butanol. Fermentering er desværre pt ikke en rentabel proces da butanol i lighed med de andre alkoholer er giftigt og derfor dræber bakterierne ved en koncentration omkring 7 %, hvilket giver lavt udbytte af fermenteringsprocessen sammenlignet med gæringsprocessen med ethanol, hvor gærcellerne dør ved en koncentration på 14 %. Når butanol efterfølgende skal destilleres er det ydermere problematisk at kogepunktet for butanol er ca. 117 °C. Dette betyder at det i praksis er vandet som skal fordampes fra butanolen, hvilket er meget energikrævende i forhold til at fordampe alkoholen fra vandet. Der er dog opstået fornyet interesse for at gøre produktion af butanol rentabel ved hjælp af nye lovende bakteriestammer og energieffektive processer, eftersom butanol forventes at kunne indtage en vigtig rolle som biobrændstof i fremtiden.



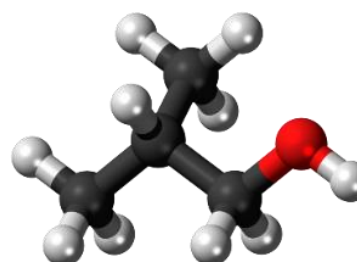
Figur 4: Model af n-butanol



Figur 5: Model af sec-butanol



Figur 6: Model af tert-butanol



Figur 7: Model af iso-butanol

7. Anvendelse af rene alkoholer som brændstof

Metanol som brændstof

Metanol har traditionelt været anvendt direkte eller opblandet med benzin i gnisttændingsmotorer, blandt andet i nogen udstrækning til personbiler i Brasilien i perioder hvor produktionen af ethanol ikke har dækket markedets behovet. I Kina sælges også flere blandingsprodukter af benzin og metanol, fra 15 % og op efter til ren metanol. Metanol har fået stor betydning i motorsport, grundet dets høje oktantal og fordampningsvarme som betyder at det er et godt brændstof til højtydende motorer. Dette er vigtigt idet motorer som udsættes for ekstreme belastninger ellers hurtigt vil blive så varme at der opstår fortænding og bankning, hvorved motoren ødelægges. Herudover har et væsentligt argument været at metanol brænder uden at der dannes røg, hvilket er en stor fordel hvis bilernes brændstof antænder efter uheld på banerne. Endvidere kan brande slukkes med vand, idet metanol er opløseligt i vand.

Metanols høje oktantal modsvarer af et meget lavt cetantal, som i praksis betyder at brændstoffet er fuldstændigt uanvendeligt i standard dieselmotorer. Derfor er der gennem tiden ikke gjort så mange forsøg på at udvikle dieselmotorer til direkte indsprøjtning og kompressionstænding af metanol. En forudsætning for at anvende ren metanol i dieselmotorer er at der anvendes kraftige gløderør til antændelsen, idet kompressionstænding ikke er praktisk muligt. Den væsentligste ulempe ved at anvende gløderør er at de har en ret begrænset levetid pga. de meget høje termiske påvirkninger og derfor skal skiftes ofte for at sikre at motoren tænder og forbrænder på alle cylindre. Derudover er der risiko for fortynding af motorolien med metanol hvilket nedbryder smøreevnen af olien, ligesom det er problematisk at lave højtrykspumper til metanol pga. en meget lav smøreevne.

Interessen for metanol som blandingskomponent til dieselbrændstof er opstået gradvist som følge af periodevis knaphed på diesel, blandt andet under anden verdenskrig. Inden for de seneste år har interessen også været begrundet i at brændstoffet er meget billigt, tilgængeligt og rent. Metanol er, grundet den lave blandbarhed og dårlige tændingsegenskaber, imidlertid også den alkohol der giver de største udfordringer ved blanding med diesel.

Ethanol som brændstof

Ethanol har i store træk de samme egenskaber som metanol. Det bruges også i de samme anvendelsesområder, bl.a. i motorsport. Der er meget udbredt anvendelse af ethanol til persontransport i de lande der i forvejen har produktion og infrastrukturen på plads. Af disse lande er Brasilien blandt de vigtigste, idet en meget stor andel af deres brændstof til privatbilisme udgøres af ethanol. I USA produceres der også store mængder ethanol til persontransport, med Brasilien som forbillede

De fleste motorer som anvender blandingsbrændstoffet er udviklet til at kunne køre på blandinger med varierende indhold af ethanol, idet motorstyringen selv justerer tændingen såvel som blandingsforholdet mellem brændstof og luft. Flexible brændstofs-systemer kan også detektere indholdet af ethanol direkte i tanken og tilpasse motorstyring efter dette, således at brugeren ikke er bundet til at tanke et bestemt blandingsprodukt.

Det er blevet almindeligt og lovpligtigt i mange lande at iblande op til 5 % ethanol i benzin, idet der erfaringsmæssigt ikke opstår problemer med brændstofsyste^m og motorerne ved så små koncentrationer. Større koncentrationer kan imidlertid give problemer for biler der ikke er bygget til brændstofblandinger, eftersom motorstyringen normalt ikke kan kompensere for høje koncentrationer af ethanol i benzin. Dette skyldes at brændstof/luft blandingsforholdet er højere for ethanol end for benzin, hvilket betyder at der skal tilføres op til 30 % (volumen) mere brændstof, når der skiftes fra benzin til ethanol, for at opnå den ideelle iltbalance i forbrændingen. Derudover kan der være problemer med brændstoftanke og rør, idet særligt pakninger kan være inkompatible med ethanol. Endelig har ethanol også en stærk indvirkning på fordampningen af de lette kulbrinter fra benzinen, som bliver højere med koncentrationen af ethanol. Dette kræver opgradering af de filtre som tilbageholder dampene fra benzintanken, idet udslip af kulbrinter til atmosfæren ikke må forekomme.

Butanol som brændstof

Butanol produceres i dag kun til anvendelse som opløsningsmiddel, til maling, i proceskemi, til kosmetik og i parfume. Endvidere er prisen på butanol mere end dobbelt så høj som ethanol, hvilket indtil videre har betydet at det er uinteressant som alternativ til benzin. Der er imidlertid inden for det sidste årti blevet forsket meget i butanol som motorbrændstof, idet det har stort potentiale for anvendelse både i benzin og dieselmotorer. N-butanol har egenskaber der ligger så tæt på benzin, at det principielt kan anvendes direkte i benzinmotorer uden ændringer. Det vil ligeledes kunne anvendes i dieselmotorer i blandinger med diesel, eller ved anvendelse af additiver der kan øge cetantallet og smøreevnen så det kan bruges direkte i dieselmotorer.

Der findes pt. ingen motorer som er bygget til eller godkendt specifikt til anvendelse af butanol som brændstof, eftersom brændstoffet endnu ikke er rentabelt at producere eller tilgængeligt.

8. Blandinger af alkoholer og diesel

Definition

En brændstofblanding er defineres ved at alle komponenter er sammenblandet i én homogen fase. Det betyder at molekylerne i blandingen i princippet vil være fuldstændigt blandet. Blandinger af alkoholer og diesel er mulige, på trods af at alkoholer er polære væsker, hvorimod de kulbrintekæder som diesel er sammensat af generelt er ikke-polære. Dette betyder dog også i praksis, at blandingen ikke kan være stabil under alle forhold.

Cosolventer

Blandinger kan gøres mere stabile ved at anvende cosolventer, som er additiver der øger opløseligheden af alkoholen. Et eksempel på en cosolvent er n-butanol, som både er blandbart med diesel og de lavere alkoholer. Højere alkoholer kan også anvendes, ligesom glykoler og andre organiske forbindelser med polære grene. Biodiesel har også egenskaber der gør det egnet som cosolvent, idet disse som regel består af estere som er svagt polære og dermed svagt blandbare med vand såvel som alkohol.

Stabilitet af blandinger

Stabiliteten af blandingen afhænger af flere faktorer, hvoraf typen af alkohol, blandingsforholdet og temperaturen er de vigtigste. Endelig er det vigtigt at bemærke, at dieselbrændstof ikke er et globalt standardiseret produkt. Indholdet af parafiner, aromater og svovl kan variere ganske meget afhængigt af hvor olien kommer fra og hvor den er destilleret. Dette kan også have indflydelse på blandbarheden med især ethanol. Indholdet af aromatiske kulbrinter i diesel kan hjælpe til at binde ethanol, idet disse molekyler kan polariseres delvist og dermed binde ethanolen. Der kan også med fordel anvendes andre cosolventer, evt. højere alkoholer, som kan hjælpe til at holde ethanolen opløst ved lave temperaturer.

Blandbarhed af metanol

Metanol har som udgangspunkt en meget lav opløselighed i standard diesel. Dette skyldes molekylets kompakte størrelse og hydroxylgruppens placering, som betyder at dets egenskaber ligger meget tæt på vands egenskaber. Hvis der tilsættes cosolventer som fx butanol kan der laves stabile blandinger, men det kræver at der anvendes omtrent samme mængde cosolvent som metanol. Der er derfor ikke så stor interesse for metanol som blandingskomponent, som for ethanol og butanol.

Enkelte studier har vist at blandinger af metanol med diesel er stabile ved lave koncentrationer af metanol, hvilket vil sige op til 10 %. Blandingen vil dog separere ved lave temperaturer. Højere koncentrationer af metanol kræver også højere temperaturer. Hertil kommer at selv lave koncentrationer af vand gør blandingen ustabil, idet vandet binder sig til metanolen som herefter bundfælder sammen med vandet. Normalt har industrielt produceret metanol et meget lavt indhold af vand, da det primært fremstilles på basis af naturgas eller syntetiseres i kontrollerede processer. Men idet metanol er hygroskopisk vil det tiltrække og binde vand, selv vand fra atmosfærisk luft. Derfor skal metanol opbevares i tæt forseglede beholdere for at undgå at det tiltrækker og forurenes med vand.

Blandbarhed af ethanol

Ethanol er et lidt større molekyle end metanol og er derfor mere blandbart med diesel eftersom den polære hydroxylgruppe har en lavere polariserende indvirkning på den ikke-polære ende af molekylet. Ethanol er derfor blandbart med diesel i alle forhold, hvis temperaturen blot er højere end 10 grader, samtidig med at der er mindre end 0,5 % vand i blandingen. I praksis vil dehydreret ethanol derfor være nødvendigt at anvende, frem for ethanol

Ethanol til transportformål fremstilles i dag primært ved fermentering, hvilket kræver efterfølgende destillation af alkoholen fra vandet. Udskillelsen af ethanol fra vandet ved destillation har en naturlig begrænsning som giver en rest på ca. 4,4 vol. % vand i ethanolen. Det resterende vand kan kun udskilles kemisk, hvorved der fås vandfri (anhydrous) ethanol. Det har hidtil haft relativt store meromkostninger at fjerne det sidste vand, men eftersom vandfri ethanol er påkrævet til iblanding i benzin, er der udviklet metoder der kan reducere omkostningerne til dehydrering. Niels Ole Knudsen, som arbejder ved New Bio Solutions / DONG har udarbejdet et notat som omhandler omkostninger ved dehydrering af ethanol i en ny proces. Dette notat er vedhæftet som bilag.

Blandbarhed af butanol

Butanol indeholder fire isomere med forskellige dipolmomenter, som betyder at de har forskellig blandbarhed. N-butanol betragtes som den vigtigste kandidat, idet denne er fuldt blandbar med diesel i alle forhold, uanset temperatur. N-butanol tiltrækker heller ikke vand, så blandinger med n-butanol vil ikke kunne blive ustabile på samme måde som metanol og ethanol blandinger der kan absorbere vand fra atmosfærisk luft.

Sec og iso-butanol er mest blandbare med andre alkoholer, og vil derfor kunne bruges som cosolventer for metanol og ethanol. De kan begge opløses i diesel, men med samme begrænsninger som ethanol. Tert-butanol er fuldt vandopløselig men kun begrænset opløselig i alkoholer, mens den ikke er opløselig i ikke-polære væsker. Tert-butanol er derfor ikke egnet til blanding med diesel.

Opløselighed af alkoholer i biodiesel

Biodiesel er kendt for at være bedre til at opløse alkohol end diesel fra fossil olie. Dette skyldes at biodiesel består af estere, som er fremstillet ved spaltning af fedtmolekyler. Spaltningens produkterne er estere og glycerol, hvor glycerol betragtes som et spildprodukt. Kendte biodiesel produkter er fx RME (rapeseed-methyl-ester) og FAME (fatty-acid-methyl-ester). En ester er en kulstofkæde hvor der i den ene ende findes iltatomer, som gør molekylet svagt polært, hvilket gør det i stand til at binde alkohol. Endvidere findes der ofte restprodukter fra den kemiske omdannelse såsom mono og diglycerider, som er hygroskopiske og dermed også kan tiltrække de polære alkoholer. Glyceriderne er dog generelt uønskede i biodiesel da de erfaringsmæssigt tiltrækker små mængder vand, som er skadeligt for brændstofsyste­met i motorer.

Vandindholdets betydning for stabiliteten af blandinger

Lave koncentrationer af vand i brændstofblandinger med alkoholer reducerer stabiliteten. Ved koncentrationer over 0,5 % vil der kunne opstå fase­separation selv ved temperaturer over 10 grader. Vand er stærkt polært og derfor ikke blandbart med diesel, men vil i stedet

vil binde sig til alkoholen og forstærke den polariserende virkning hvilket fører til separation og bundfældning af vand/alkohol fasen. Dette er problematisk i normale tankanlæg, hvor bl.a. ånderør til trykudligning med atmosfæren kan tilføre atmosfærisk vand til blandingen, så den med tiden bliver ustabil. Da indtrængning af atmosfærisk vand og kondensation kan forekomme i de fleste tankanlæg pga. temperaturvariationer og trykforskelle er det vigtigt at kende til konsekvenserne af vand i brændstoffet, både når dette er tilført tilsigtet og utilsigtet.

Konsekvenser af fase separation

Der kan ske fase separation enten fordi blandingen er blevet ustabil som følge af temperatursænkning, eller som følge af forurening med vand. Hvis en blanding med diesel og ethanol/metanol separerer, vil det kunne medføre skader på brændstofs system og motor. Idet tanksystemer altid suger brændstof fra bunden af tanken vil fasen med alkohol og vand blive suget ind i brændstofs systemet som det første når motoren startes. Dette kan føre til alvorlige problemer med brændstofs system og motor. Det vil sandsynligvis først komme til udtryk i form af dårlig motorgang som følge af at diesel fortyndes med alkohol og vand, hvilket danner en grov emulsion når det passerer gennem højtrykspumpen. Dette kan føre til at antændelsen bliver forsinket og forbrændingen bliver ustabil, eventuelt med motorstop til følge. Hertil kommer eventuelle skader på brændstofs systemet, særligt højtrykskomponenterne, som kan være skader i form af slid og korrosion. Det største problem opstår idet smøreevnen nedsættes når der pumpes alkohol og eventuelt vand igennem højtrykspumpe og dyser. Herved kan der hurtigt opstå skader og havari, primært på pumper som kører med meget fine tolerancer og høje fladetryk, som kræver en effektiv smøring. Vand ødelægger denne smøring gennem forskellige mekanismer, hvilket medfører at de glidende flader kommer i kontakt og dermed slides meget hurtigt.

Såfremt der sker en faseadskillelse af en ethanol/metanol blanding med diesel kun som følge af lave temperaturer, vil alkoholen lægge sig i et lag oven på dieselbrændstoffet, da densiteten af diesel er højere end ethanol og metanol. Dette betyder at der ikke vil blive suget ren alkohol ind i motoren, så i første omgang er der ingen risiko for motorskader. Men idet alkoholen i stor udstrækning vil kunne absorbere fugtighed fra luften når den ligger oven på dieselen er risikoen på længere sigt at densiteten af alkohol/vand fasen vil stige så meget at dråber af alkohol og vand vil synke ned gennem blandingen. De to faser vil dog blandes igen hvis temperaturen i brændstoffet bringes tilbage til udgangspunktet hvor blandingen var stabil. Derfor vil fase separation som følge af en periode med lav temperatur ikke have konsekvenser, hvis blot blandingen bliver stabiliseret igen inden alkoholen kan nå at absorbere så meget vand at der sker bundfældning.

Hvis blandingen bliver forurennet med større mængder vand, vil der hurtigt dannes en fase med ethanol/metanol og vand, som er væsentlig tungere end fasen med diesel. Der vil der ske en bundfældning og dermed lagdeling, hvor diesel vil ligge øverst, efterfulgt af et lag med vand/alkohol og evt. et lag med vand nederst. Typisk vil lagdelingen tage noget tid, og vil derfor kun forekomme hvis et køretøj står stille uden cirkulation af brændstof mellem tank og motor. I et køretøj som er aktivt vil der ofte være en stor cirkulation af varm diesel som føres retur til tanken, hvilket både holder blandingen stabil og forebygger lagdelingen. Samme funktion kan varetages af en lille cirkulationspumpe, såfremt køretøjet skal stå stille i længere tid. Opvarmning af brændstoffet vil dog være nødvendigt i koldt vejr.

9. Emulsioner af alkohol i diesel

Definition

Emulsioner adskiller sig fra blandinger, som er homogene, ved at den ene blandingskomponent er fordelt som meget små dråber i en kontinuert fase af den anden komponent. I emulsioner er det oftest den komponent som er i lavest koncentration, som er spredt på dråbeform, mens den anden komponent er sammenhængende. Et eksempel er mælk, hvor fedtdråber holdes opløst i vand.

Beskrivelse af emulsioner

En emulsion fremstilles typisk ved at udsætte komponenterne der skal emulgeres, for en kraftig mekanisk påvirkning som opblander og findeler den væske som skal emulgeres. Der findes forskellige metoder som kan tilføre den nødvendige påvirkning. Man kan fx anvende en hurtig og kraftig mekanisk omrøring med specielle skovlblade, eller man kan trykke den ene væske ind i den anden gennem en dyse ved højt tryk. Det er også muligt at bruge ultralyd, som ryster væskerne sammen.

I stabiliserede emulsioner anvendes overfladeaktive stoffer til at indkapsle alkoholerne i en kappe af molekyler. De overfladeaktive stoffer har den egenskab at den ene ende er lipofil (tiltrækker non-polære molekyler), mens den anden ende er hydrofil (tiltrækker polære molekyler). Derved er dråbe beskyttet af en barriere, der dels sørger for at holde sammen på dråben, dels holder den adskilt fra de andre dråber. Barrieren kan også sikre at dråberne ikke opløses i den kontinuerte fase, såfremt de to væsker er delvist opløselige. Molekyler med disse egenskaber kaldes emulgatorer og tilhører en overordnet klasse af overfladeaktive stoffer, som kaldes surfaktanter.

Det er muligt at lave emulsioner uden brug af emulgatorer, men de suspenderede dråber finder sammen igen inden for kort tid og emulsionen vil dermed separere, eftersom dråberne vokser i størrelse indtil de enten begynder at synke eller stige som følge af densitetsforskellen til det medie de ligger i. Hvis der ikke er brugt emulgatorer siges emulsionen at være ikke-stabiliseret.

I fagverdenen skelnes der endvidere mellem mikroemulsioner og nano-emulsioner, alt afhængigt af størrelsen på dråberne, som kan være fra få hundrede nanometer og opefter. Ved dråbestørrelser under 100 nanometer er det en nano-emulsion, mens emulsioner med større dråber kaldes mikroemulsioner. Det er generelt mere krævende at fremstille nano-emulsioner da der skal bruges kraftigt udstyr, men til gengæld kan emulsionerne laves mere stabile. Mikroemulsioner kan ofte fremstilles blot ved at tilsætte emulgatorer og evt. cosolventer i en blandingsproces, hvorved emulsionen dannes spontant.

I nano-emulsioner er dråberne mindre end ca. 100 nanometer, hvilket betyder at de ikke kan sprede synligt lys. Emulsionen vil derfor være gennemsigtig, såfremt væskerne hver for sig er det. Dermed er det også muligt at se hvornår en emulsion begynder at blive ustabil, idet den vil blive tiltagende uklar som følge af at dråberne klumper sig sammen og vokser i størrelse, før de eventuelt bundfælder. Af samme grund er mikroemulsioner ikke gennemsigtige, men kan være gennemsigtigt blå eller mælkehvide da dråberne enten spreder eller absorberer lyset, afhængigt af størrelsen.

Baggrund for anvendelse af emulsioner med diesel

Interessen for emulsioner med diesel er oprindeligt opstået som følge af man har fundet interessante virkninger ved at emulgere små mængder vand i diesel. Vandet har medvirket til at skabe en hurtigere og mere effektiv forbrænding med reduceret soddannelse og lavere emissioner af kvælstofoxider. Den hurtigere forbrænding tilskrives effekten af at vandet i det forstøvede diesel hurtigt når op på kogepunktet efter indsprøjtningen, hvilket medfører en hurtig ekspansion af diesel sprayen. Effekten kendes også fra stearinlys, hvor flammen gnistrer, hvis der er vand i vægen. Når forbrændingen sker hurtigere, vil der også dannes mindre sod. Reduktionen i kvælstofoxider skyldes at vandets fordampningsvarme sænker temperaturen under forbrændingen, hvilket har en stor effekt på dannelsen af kvælstofoxiderne. Emulsioner har således virket som en ukompliceret og billig teknologi til reduktion af skadelige emissioner fra dieselmotorer.

Forudsætninger for dannelse af emulsioner med diesel og alkohol

Emulsioner af alkoholer i diesel er principielt lig emulsioner af vand i diesel. Forudsætningen for at der kan dannes en emulsion er dog at der er tilstrækkelig frastødning mellem alkoholen og diesel, da de ellers blot vil blandes. Eftersom butanol er fuldt blandbart med diesel, er det derfor som udgangspunkt formålsløst at emulgere butanol med diesel.

Ethanol med lavt vandindhold er i overvejende grad blandbart med diesel. Derfor vil det være nødvendigt at anvende emulgatorer, så der kan dannes en stabiliseret emulsion. Der skal imidlertid anvendes omtrent samme mængde emulgator som ethanol, hvilket kan gøre brændstoffet så dyrt at det ikke er konkurrencedygtigt.

Metanol er den mest oplagte alkohol til emulsioner, da det er den sværest opløselige i diesel. Der er dog stadig behov for en emulgator, som skal tilsættes i ca. samme mængde som metanol. Hvis der anvendes en lav koncentration af vand på omkring 1:10 i forhold til metanolen, vil det være muligt at reducere mængden af emulgator.

Emulsioner er relevante, hvis det ikke er muligt at holde metanol eller ethanol opløst i diesel som blanding. Dette kan fx være tilfældet hvis brændstoffet bliver udsat for lave temperaturer, høj luftfugtighed eller andre omstændigheder som kan føre til fase separation. Den øgede kompleksitet gør dog emulsioner til et sekundært valg frem for blandinger.

Effekt af vandindhold i emulgerede alkoholer

Hvis der tilsættes en lav koncentration af vand vil frastødningen mellem ethanol/metanol og diesel øges, således at mængden af emulgator kan reduceres. Dette betyder bl.a. at vandholdigt ethanol med fordel kan bruges, frem for dehydreret som er dyrere at fremstille. Det betyder også at emulsioner med metanol, som er hygroskopisk, ikke er så følsomme over for forurening med vand som blandinger.

Det kan også være en fordel med et mindre vandindhold i forhold til emissioner, som nævnt i afsnittet ovenfor. Vands fordampningsvarme er flere gange højere end alkoholernes, så effekten af mindre mængder vand i emulsioner vil være større end for vandfri alkoholer.

Emulgatorer

For at opnå tilstrækkelig stabilitet i emulsioner af alkohol og diesel, vil det i mange tilfælde være nødvendigt at tilsætte høje koncentrationer af emulgator. I mikroemulsioner kan der være behov for en koncentration som er på niveau med koncentrationen af metanol, mens der skal bruges lidt mindre for ethanol. Den nødvendige koncentration afhænger ligeledes af hvor godt man ønsker at sikre emulsionen mod fase-separation ved lave temperaturer.

Da emulgatoren således kan udgøre en væsentlig andel af brændstoffet, er det ønskeligt at emulgatorerne ikke indeholder stoffer som danner sundhedsskadelige eller uønskede forbindelser under forbrændingen. Nogle kunstigt fremstillede emulgatorer indeholder fx fluor, fosfor, klor, brom eller svovl, som danner giftige forbindelser under afbrænding.

Ideelt set bør emulgatorerne derfor kun bestå af kulstof, ilt og brint. Emulgatorer som opfylder disse betingelser ligger inden for den undergruppe af overfladeaktive stoffer, hvor den hydrofile ende er non-ionisk, dvs. ikke bærer en elektrisk ladet ion. Overfladeaktive stoffer med ioniske hydrofile grupper indeholder stort set alle de uønskede stoffer.

Emulgatorer kan endvidere karakteriseres ved deres hydrofil-lipofil balance (HLB), som er et udtryk for hvor stor en andel af molekylet som er hydrofilt. Skalaen går fra 0 til 20, hvor 0 er 100 % lipofilt, mens 20 er 100 % hydrofilt. Bancrofts regel postulerer at emulgatoren skal have en lav HLB (mindre end 10), eftersom det ønskes at det er diesel som skal udgøre den kontinuerte fase. Specifikt skal HLB for emulgatorer til emulsioner af alkoholer i diesel ligge i intervallet 3-6. Derfor skal emulgatoren overvejende være lipofil, hvilket sikres gennem kombinationen af en lang kulbrintekæde med en kort hydrofil gruppe i den ene ende.

Der findes en lang række af emulgatorer til fødevarer som potentielt set kan anvendes til emulsioner af alkohol i diesel. Flertallet af disse er baseret på organiske molekyler, som ikke indeholder de uønskede stoffer. Eksempler på fødevareremulgatorer som går igen i nyere litteratur om emulsioner af ethanol i diesel er produkter som Tween 80 (E433) og Span 80 (E494).

Højere alkoholer kan ligeledes anvendes både som emulgatorer og som cosolventer. Blandt andet kan nævnes butanol, octanol og dodecanol.

Biodiesel kan både fungere som cosolventer og som emulgatorer, alt afhængigt af om det bruges i blandinger eller emulsioner. Biodiesel nævnes dog oftest i forbindelse med blandinger, hvor det øger blandbarheden af normal diesel med alkohol.

Herudover findes der mange andre produkter, som er udviklet til fødevarerindustrien eller kosmetiske produkter. Størstedelen af disse er anioniske og dermed relativt ugiftige, både som produkt og ved afbrænding i motorer.

On-board emulgering

Der er udført enkelte demonstrationer med emulgeringsanlæg i køretøjer, som danner en emulsion umiddelbart før indsprøjtningssystemet. Dette er dog forbundet med en del praktiske vanskeligheder, og ikke mindst en teknisk kompleksitet som fordyrer brændstofs-systemet yderligere. Hvorvidt sådanne systemer kan finde udbredt anvendelse er derfor meget usikkert.

10. Erfaringer fra forsøg med E-diesel i Danmark

Fra oktober 2001 til marts 2002 blev der udført et demonstrationsprojekt på lastbiler med en blanding af diesel og ethanol, som også går under navnet E-diesel. To identiske lastbiler indgik i forsøget, hvor den ene kørte i perioden som reference på normal diesel, mens den anden kørte på E-diesel.

Blandingen som blev anvendt bestod af 88 % diesel, 10 % ethanol og 2 % Beraid ED10. Sidstnævnte er handelsnavnet for en additivpakke fra Akzo Nobel, som består af et smørende og korrosionsbeskyttende additiv, et opløsningsmiddel og et cetantalsforbedrende additiv.

De to lastbiler kørte på samme strækning tur/retur mellem Odense og Düsseldorf. Deres brændstofforbrug blev løbende registreret. Herved blev det bestemt at forbruget på reference diesel var 28,3 L/100 km mens forbruget var 32,9 L/100 km. Dermed var der et merforbrug på ca. 16 % med E-diesel som brændstof, hvilket er højere end forventeligt, idet E-diesel kun har ca. 3,8 % lavere brændværdi. En mulig forklaring kan være at brændstoffet blev anvendt i en motor der ikke var tilpasset og optimeret til brændstofkombinationen.

Motorenes effekt blev målt ved kørsel på rullefelt. Det blev bestemt at drejningsmomentet var reduceret med 5,6 – 7,5 % i det øvre effektområde med E-diesel, ligesom chaufførerne gav udtryk for at de havde mærket den manglende trækraft. Det blev bemærket at det var nødvendigt at skifte gear oftere, hvilket kan have været den primære årsag til merforbruget. Det kan dog ikke udelukkes at en del af merforbruget skyldes psykologiske effekter, som kan have ændret kørselsmønster.

I afprøvningen på rullefelt var der langt mindre forskel i merforbruget på E-diesel. Der blev målt et merforbrug på 2,2 % under stationær belastning i fem driftspunkter. Merforbruget afspejler bedre forskellen i brændværdi på 3,8 %, og understøtter i øvrigt andre forskningsresultater som peger på at diesel med alkohol iblandet kan give en mere effektiv udnyttelse af brændstoffet som følge af hurtigere og renere forbrænding.

Ved rullefeltsmålingerne blev der på målt specifikke emissioner, dvs. g/kWh, på både referencediesel og E-diesel. Emissionerne af især partikler og CO blev reduceret med hhv. 31 og 29 % med E-diesel. Partikler og CO er komponenter der primært dannes i zoner med dårlig forbrænding. Der blev dog også målt 13 % højere emissioner af uforbrændte kulbrinter, hvilket gør resultatet mindre entydigt. NO_x blev reduceret med ca. 5 %, hvilket er mindre væsentligt. CO₂ udledningen blev reduceret med ca. 3 %, hvilket blandt andet skyldes at ethanol producerer mere vand ved forbrænding end CO₂. På volumenbasis producere diesel ved forbrænding ca. lige store mængder vand og CO₂, mens ethanol producerer vand og CO₂ i forholdet 3:2.

Ud over de nævnte problemer og konsekvenser af nedsat trækraft blev der ikke bemærket væsentlige ulemper ved at køre med E-diesel frem for almindelig diesel. Der blev heller ikke fundet øget slid på motorens PDE injektorer, som var blevet skiftet før forsøgets start. Der blev i alt kørt ca. 95.000 km med E-diesel.

11. Konklusion

Ethanol har i lang tid fungeret som et miljøvenligt og konkurrencedygtigt alternativ til benzin, særligt i de lande hvor det har været rentabelt at producere ethanol. Med modningen af nye enzymbaserede produktionsmetoder vil ethanol sandsynligvis blive endnu mere udbredt som brændstof i fremtiden. Det samme scenarie gælder for metanol, som produceres af naturgas og kul. Selvom metanol ikke giver samme CO₂ fortrængning som ethanol, er det dog et konkurrencedygtigt alternativ til benzin, som mange lande med fordel vil kunne benytte sig af når prisen på olie begynder at presse energi og brændstof priserne.

N-butanol er et relativt nyt, men meget lovende bud på et af fremtidens brændstoffer. Nye produktionsmetoder kan potentielt sænke prisen på n-butanol til et niveau hvor det kan konkurrere direkte med benzin såvel som de øvrige alkoholer. Endnu mere interessant er det dog at n-butanol også er fuldt blandbart med diesel, og har så gode tændingsegenskaber at det sandsynligvis vil kunne bruges direkte i tilpassede dieselmotorer, eventuelt i kombination med cetantalsforbedrende additiver. Hertil kommer at butanol også har potentiale til at reducere dannelsen af partikler i dieselforbrændingen markant. Dette er ikke alene en stor sundhedsmæssig gevinst hvis det bliver anvendt i motorer uden partikelfilter, men kan også være nyttigt for motorer med filtre, idet sodbelastningen i filtrene reduceres.

Ethanol, metanol og n-butanol vil også i fremtiden overvejende blive brugt som erstatning for benzin. De økonomiske interesser i alternative dieselbrændstoffer vil dog medføre at alkoholerne på sigt vil kunne supplere diesel på nogle områder. I denne rapport er derfor nævnt en række tekniske principper, som kan gøre det muligt at anvende rene alkoholer direkte i dieselmotorer. Et interessant eksempel er Stena Lines forsøg med tilpasning af skibsmotorer til metanol, som kan være med til skabe interesse for metanol som brændstof. Et andet eksempel er Scania's ethanol-busser, som har haft stor succes særligt i Sverige, men som også er blevet eksporteret til andre lande. Hertil kommer at udviklingen af nye avancerede forbrændingsprincipper til motorer har fokus på alternative brændstoffer. Særligt alkoholer er interessante i denne sammenhæng, idet deres egenskaber, herunder høj modstandsdygtighed mod selvantændelse og dermed bankning, gør det muligt at hæve kompressionsforholdet i nye motorer og dermed opnå meget høje virkningsgrader og lave emissioner.

Det nævnes også i rapporten at alkoholer kan spille en vigtig rolle som flydende energibærere, der med simple processer kan omdannes til dimethyl eller diethyl æter. Disse ætere er særdeles velegnede som dieselbrændstoffer, og har potentiale til at reducere udledning af partikler ved dieselforbrænding til meget lave niveauer. Det er ikke så teknisk kompliceret at bygge brændstoffsyste mer der kan håndtere æter, men det kræver langt højere sikkerhedsmæssige standarder, da de er let antændelige.

I rapporten omtales en række problematikker ved blandinger af alkoholer og diesel. Det største problem er stabiliteten af blandinger, som afhænger af mange parametre. Den mindst blandbare alkohol er metanol, hvor særligt lave koncentrationer af vand og lave temperaturer vil betyde at blandingen separerer. Ethanol er lidt mere blandbart, men vil ligeledes separere hvis temperaturen er for lav, eller vandindholdet for højt. Endvidere sænker alkoholerne cetantallet i blandingen, hvilket forringer brændstoffets kvalitet.

Faseseparation af blandinger med metanol og ethanol i diesel kan undgås ved tilsætning af cosolventer, ligesom cetantallet kan hæves med additiver. Det er dog tvivlsomt om blandinger kan være konkurrencedygtige med almindeligt diesel, såfremt der skal tilsættes større mængder af dyrere additiver og cosolventer. Det primære argument for at producere blandinger må derfor findes i de miljømæssige fordele, lavere udledning af sodpartikler samt en reduceret afhængighed af diesel. I nogle tilfælde vil blandinger måske kunne bruges, hvor drift med almindelig diesel giver problemer med for høj udledning af partikler, eller hvis partikelfiltre stopper for hurtigt til pga. langvarige lave belastninger på motoren.

N-butanol udmærker sig ved at være fuldt blandbart med diesel, og vil ikke separere selv ved lave temperaturer. N-butanol tiltrækker heller ikke vand, som destabiliserer blandinger. N-butanol har også et så højt cetantal, at det kun vil give en mindre sænkning af blandingscetantal og dermed behov for korrigerende additiver. Derfor fremstår butanol i øjeblikket som den mest lovende kandidat til at indgå i blandinger med diesel.

Emulsioner omtales som et alternativ til blandinger. Emulsioner af alkoholer i diesel kan gøres relativt stabile, såfremt der anvendes emulgatorer der kan binde alkoholerne som mikroskopiske dråber i dieselbrændstoffet. Her er det mest oplagt at emulgere metanol og ethanol, idet butanol som nævnt er fuldt blandbart. Der omtales forskellige typer af emulgatorer som er særligt egnede til at indgå i emulsioner med alkohol og diesel, og der nævnes nogle mulige teknikker som kan bruges til at danne emulsionerne. I lighed med blandinger kræver emulsioner imidlertid også fordyrende cetantalsforbedrende additiver, hvortil kommer mekanisk procesudstyr og emulgatorer. Dette gør at emulsioner bliver dyrere end blot summen af blandingskomponenterne. Det er derfor også tvivlsomt om emulsioner vil kunne blive konkurrencedygtige med de mere konventionelle dieselprodukter.

I forbindelse med projektet er der udført forsøg med blandinger med metanol, ethanol og butanol i diesel, der er blevet anvendt i en standard lastbilmotor. Forsøgene og resultaterne er beskrevet i en selvstændig rapport, som er vedlagt. Der var overordnet fokus på at måle emissioner og virkningsgrader, samt forskelle i tændingsforsinkelsen. Den vigtigste observation var en markant reduktion i antallet af partikler, som var op til 70-80 % med ethanol og metanol. Butanol medførte knap så markante reduktioner i partikeltallet, men viste til gengæld ikke tegn på faseseparation under iblanding.

Den samlede vurdering er, at blandinger og emulsioner fortsat er umodne teknologier. Det vil kræve målrettet forskning og udvikling at finde frem til de rette kombinationer af cosolventer, emulgatorer og cetantalsforbedrende additiver til blandingsbrændstoffer med alkohol, som uden risiko for utilsigtede virkninger kan anvendes direkte i eksisterende motorer og køretøjer. Men der er potentiale for at opnå store reduktioner i partikeludledningen på eksisterende motorer, hvilket i mange tilfælde kan være langt mere rentabelt end at udstyre de samme motorer med partikelfiltre og andet efterbehandlingsudstyr. Derfor har blandingsbrændstoffer sandsynligvis de bedste muligheder for anvendelse på områder hvor partikelfiltre endnu ikke er blevet lovpligtige. I Danmark kunne dette fx være på ældre arbejdskøretøjer, i dieseltog og i skibe. I andre lande, særligt mindre udviklede, vil der være et langt større marked for brændstoffer der kan reducere partikeludledningen, hvilket kan retfærdiggøre en satsning med at udvikle og markedsføre additivpakker til blandinger og emulsioner.

12. Litteraturliste

Artikler om blandinger

1. An experimental investigation on effects of methanol blended diesel fuels to engine performance and emissions of a diesel engine. Murat Ciniviz, Hüsein Köse, Eyüb Canli and Özgür Solmaz. Selcuk University, Turkey.
2. Formulation of stable mixtures of diesel fuels with methanol. Azev V.S., Gerasimova G.N, Luneva V.V. Chemistry and Technology of Fuels and Oils. (1985)
3. Ethanol-diesel fuel blends – a review. Alan C. Hansen, Qin Zhang, Peter W.L. Lyne. Bioresource Technology vol. 96 pp. 277-285. (2004)
4. Advances in diesel-alcohol blends and their effects on performance and emissions of diesel engines. Satish Kumar, Jae Hyun Cho, Jaedeuk Park, Il Moon. Elsevier – renewable and sustainable energy reviews vol. 22 pp 46-72. (2013)
5. Properties of diesel-alcohol blends. L. Hajba, Z. Eller, E. Nagy, J. Hancsok. Hungarian Journal of Industrial Chemistry Vol. 39 pp. 349-352 (2011).
6. Stability of diesel-bioethanol blends for use in diesel engines. Magin Lapuerta, Octavio Armas, Reyes Garcia-Contreras. Fuel vol. 86, pp. 1351-1357. (2007).
7. Exhaust emissions with ethanol or n-butanol diesel fuel blends during transient operation: A review. Evangelos G. Giakoumis, Constantine D. Rakopoulos, Athanasios M. Dimaratos, Dimitrios C. Rakopoulos. Renewable and Sustainable Energy Reviews vol. 17, pp. 170-190. (2013).
8. Review Paper: Ethanol-diesel fuel blends – a review. Alan C. Hansen, Qin Zhang, Peter W.L. Lyne. Elsevier - Bioresource Technology pp 277-285. (2004).
9. E-diesel – Demonstration test in Denmark. Urban Löfvenberg, Akzo Nobel Surface Chemistry. 2002
10. Emission measurement and calculations of two trucks – one with diesel and one with a diesel ethanol mixture. Ken Friis Hansen, Flemming Bak, Michael Grouleff Jensen. Danish technological Institute, 2002.

Artikler om emulsioner

11. A comprehensive review on the application of emulsions as an alternative fuel for diesel engines. Biplab K. Debnath, Ujjwal K. Saha, Niranjana Sahoo. Renewable and Sustainable Energy Reviews vol. 42, pp. 196-211. (2013).
12. Nanoemulsions: formation, structure, and physical properties. Mason TG, Wilking JN, Meleson K, Chang CB, Graves SM, Journal of Physics: Condensed Matter, 2006, 18(41): R635-R666

13. A novel emulsifier for ethanol-diesel blends and its effect on performance and emissions of diesel engine. Jilin Lei, Lizhong Shen, Yuhua Bi, Hong Chen. *Fuel*, vol. 93, pp. 305-311. (2012)
14. Multicylinder C.I. Diesel engine tests with unstabilized emulsion of water and ethanol in diesel fuel. Angelo de Vita. SAE 890450. (1989)
15. Use of alcohol-in-diesel fuel emulsions and solutions in a medium-speed diesel engine. Quentin A. Baker, Southwest Research Institute. SAE 810254 (1981)

Andre artikler

16. Methanol as an alternative transportation fuel in the US: Options for sustainable and /or energy-secure transportation. L. Bromberg and W.K. Cheng. Sloan Automotive Laboratory, Massachusetts Institute of Technology. (2010).
17. Progress in the production and application of n-butanol as a biofuel. Chao Jin, Mingfa Yao, Haifeng Liu, Chia-fon F. Leed, Jing Ji. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 4080–4106. (2011)
18. Combustion process investigation in a high speed diesel engine fuelled with n-butanol diesel blend by conventional methods and optical diagnostics. S.S. Merola*, C. Tornatore, S.E. Iannuzzi, L. Marchitto, G. Valentino. *Renewable Energy* vol. 64 pp. 225-237 (2014)
19. Biomass Energy Data Book. Stacy C. Davis and Susan W. Diegel (Oak Ridge National Laboratory), Robert G. Boundy (Roltek, Inc.). (2014)

13. Potential savings for omitting the dehydration unit at an ethanol plant

It is very difficult to calculate a difference in consumption figures between hydrous and anhydrous ethanol as the difference strongly depends on the way the dehydration is integrated in the remaining plant, which differs from supplier to supplier.

Vogelbusch suggests, as a first attempt, to use data from an efficient stand-alone dehydration unit, which dehydrates ethanol from typically 94 – 96%vol ethanol to dehydrated ethanol (5000 - 3000 ppm water). For typical American plants (or plants designed by US technology providers) this values will be quite accurate.

Vogelbusch plants might need less steam, but when looking at the resulting price difference, the results is a sound basis for further investigations.

CAPEX

Price for a stand-alone dehydration plant for 250 000 liters-per-day of alcohol (~80,000 m³/y) will be in the range of 3.5 – 4.0 Mio € when installed as a stand-alone plant, when integrated in the rectification system, the costs might be reduced to approx. 2.5 – 3.0 Mio. €.

As requirements for the capital recovery factor CRF differs among investors in the range from 0.15 to 0.3 the yearly capital costs could typically be (3.0 Mio. € and CRF of 0.25) 750,000€/y or close to 9€/m³

OPEX

The additional consumption of utilities for the dehydration unit will be approximately:

Steam (approx. 6 – 9 barg):	450 – 500 kg / 1000 l Alcohol	at a cost of 20€/ton
Cooling water (DT = 15K):	17 – 19 m ³ / 1000 l Alcohol	at a cost of 0.1€/ton
Electricity (400V / 50 Hz):	2 -3 kWh / 1000 l Alcohol	at a cost of 0.1€/kWh
Instrument air (7 barg):	10 Nm ³ / 1000 l Alcohol	at a cost of 0.015€/Nm ³

Cost of utilities depends on local conditions, and the figures used should be verified for a specific site.

The combined OPEX costs will be close to 12€/m³ ethanol

Cost of dehydrating ethanol

The total cost for dehydration will sum up to around 20€/m³ ethanol but will of course depend on local conditions and the possibility of process integration.

14. Report on engine test of diesel blended with methanol, ethanol and n-butanol