



Vestlandsforskning

Boks 163, 6851 Sogndal

Tlf. 57 67 61 50

Internett: www.vestforsk.no

VF-rapport 1/2003

Bruk av hydrogen i transport.

Teknologiske barrierer ved brenselceller

Av

Otto Andersen

VF notat

Notat tittel: Bruk av hydrogen i transport. Teknologiske barrierer ved brenselceller.		Notattnr: 1/2003
		Dato: Januar 2003
		Gradering: Åpen
Prosjekttittel: Systemer for implementering av hydrogenenergi i transportsektoren. Energi- og miljødata for samferdsel.	Tal sider: 14	
Forskarar: Otto Andersen	Prosjektansvarleg: Karl G Høyer	
Oppdragsgjevar: Norges forskningsråd Statens forurensningstilsyn	Emneord: Hydrogen, transport, brenselceller, teknologiske barrierer	
Samandrag: Notatet gir en presentasjon av teknologiske barrierer knyttet til bruk av brenselceller i transport. Foruten å gi en generell omtale av brenselceller, gis det en oversikt over de vanligste typene hydrogenbaserte brenselceller. Dette inkluderer alkalisk brenselcelle (AFC), fosforsyre brenselcelle (PAFC), proton "exchange" membran / polymerisk elektrolytt brenselcelle (PEMFC), smeltet karbonat brenselcelle (MCFC) og fast oksyd brenselcelle (SOFC). Vi har i tillegg valgt å inkludere en type brenselcelle basert på metanol som drivstoff, den såkalte direkte-metanol brenselcellen (DMFC). Reformering ombord i kjøretøyene av metanol til hydrogen for bruk i brenselceller er omtalt spesielt. Effektproblematikk ved bruk av brenselceller i transport kan knyttes til kjøremønster. Det er påpekt at dette kan gi begrensninger ved høy belastning og bruk i tyngre kjøretøy. Rekkeviddeproblematikk knyttet til lagring av drivstoff i kjøretøyene er også omtalt. Dette er relatert til de tre aktuelle måter å lagre drivstoffet ombord i kjøretøy med hydrogenbaserte brenselceller: 1) Benytte metanol som drivstoff, med reformering til hydrogen om bord i kjøretøyet, eller med bruk av direkte metanol brenselcelle, 2) Hydrogen i gassform, eller 3) Lagring av flytende hydrogen. Temperaturproblemene som knyttes til brenselcellekjøretøy, både ved lav og høy utetemperatur er dessuten omtalt. Det påpekes også at selv om brenselceller ofte blir betraktet som utslippsfrie, kan det likevel knyttes noen problemer til forurensende utslipp. I tillegg omtaler notatet kostnadsproblemer og tidsperspektiver for innfasing av brenselcellekjøretøy i transport.		
Andre publikasjoner frå prosjektet:		
ISBN nr: ISSN: 0804-8835	Pris : Kr 100,-	

Forord

Dette er et notat fra et arbeid Norges forskningsråd gir støtte til gjennom det strategiske instituttprogrammet *Systemer for implementering av hydrogenenergi i transportsektoren*. Notatet inngår også i prosjektet *Energi- og miljødata for samferdsel* som Vestlandsforskning har utført på oppdrag fra Statens forurensningstilsyn.

Hovedmålet har vært å gi en oversikt over de viktigste teknologiske barrierer knyttet til bruk av brenselceller i transport.

Otto Andersen har stått for gjennomføringen av arbeidet og utarbeidelsen av notatet.

Karl Georg Høyer har vært faglig hovedansvarlig.

Vestlandsforskning
Sogndal, januar 2003
Karl Georg Høyer

Innhold

1.	Begrensninger	1
2.	Generelt om brenselceller	1
3.	Ulike typer brenselceller	2
3.1.	Alkalisk brenselcelle (AFC)	3
3.2.	Fosforsyre brenselcelle (PAFC)	3
3.3.	Proton ”exchange”, polymerisk elektrolytt, membran brenselcelle (PEMFC).....	4
3.4.	Smeltet karbonat brenselcelle (MCFC)	4
3.5.	Fast oksyd brenselcelle (SOFC)	5
3.6.	Direkte metanol brenselcelle (DMFC)	5
4.	Reformering av metanol til hydrogen	6
4.1.	Dampreformering	6
4.2.	Partiell oksydering	6
5.	Effektproblematikk	7
5.1.	Effekttap ved høy belastning (akselerasjon).....	7
5.2.	Effekttap i tilknyttede systemer	7
5.3.	Tyngre kjøretøy	7
6.	Rekkevidde og lagring av drivstoff i kjøretøy	8
7.	Temperaturproblematikk	9
8.	Utslipp	10
8.1.	Utslipp av vanndamp	10
8.2.	Reformer-utslipp.....	10
9.	Kostnader og tidsperspektiver	12
10.	Referanser	12

Liste over tabeller

Tabell 1	De ulike typer brenselceller som er i bruk eller under utvikling	2
Tabell 2	Forventede direkte utslipp fra personbiler i 2020 (Tallene er relative til bensinmotor i 1998, som er gitt verdien 1).....	10
Tabell 3	Estimerte utslipp av lokal forurensing (VOC, CO og NO _x) fra brenselcelle og bensin (g/km)	11
Tabell 4	Direkte utslipp av CH ₄ og N ₂ O i ulike motorsystemer (g/km)	11
Tabell 5	Samlet direkte utslipp av klimagasser i ulike motorsystemer	11

1. Begrensninger

Dette notatet er begrenset til barrierer ved brenselceller med hydrogen og metanol som drivstoff i kjøretøy. Konvensjonelle fossile brensler, for eksempel bensin, propan og naturgass kan også benyttes som drivstoff for brenselceller, men disse er ikke omtalt her. Notatet er også begrenset til brenselceller for transportformål, som energiomdannere i kjøretøy på vei, bane eller sjø. I denne sammenhengen er fokus satt på selve kjøretøyene. Det innebærer at f.eks. barrierer knyttet til produksjon, lagring og distribusjon av hydrogen, før det når kjøretøyene, ikke er inkludert.

2. Generelt om brenselceller

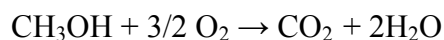
I brenselceller skjer det omdanning av kjemisk energi til elektrisk energi. Gjennom elektrokjemiske reaksjoner ved to elektroder dannes en spenningsforskjell mellom elektrodene. Denne gir en elektronstrøm fra anoden til katoden, som for eksempel kan utnyttes til å drive en elektrisk motor.

I brenselceller skjer det en oksydasjon ved anoden, og en reduksjon ved katoden. Når hydrogen benyttes som drivstoff oksyderes hydrogen ved anoden, og oksygen reduseres ved katoden. Den totale redoksreaksjonen for brenselcellen er da:



Oksydasjon av hydrogen i brenselcellen krever at det benyttes ekstremt ren hydrogen. Problemer oppstår i brenselcellen hvis forurensinger i finnes hydrogengassen. Ekstremt ren hydrogen er svært kostbart å produsere. Ved metanolreforming til hydrogen (se avsnitt 4), vil det selv etter rensing av gassen, finnes forurensinger. Tilstedeværelse av karbonmonoksyd (CO) fører for eksempel til blokkering av katalysesetene på overflaten av platina (Pt)-elektroder, og stopper dermed reaksjonen.

En spesiell type brenselcelle kan benytte metanol (CH₃OH) direkte som drivstoff. I en slik direkte metanol brenselcelle (DMFC) oksyderes metanol til CO₂ ved anoden og oksygen reduseres til vann ved katoden. Den totale redoksreaksjonen for DMFC er:



Reaksjonen i en brenselcelle produserer bare om lag 0,7 Volt. For å få spenningen opp på en anvendbart nivå seriekobles i praksis flere brenselceller. Sammenkoblede brenselceller kalles for en brenselcellestakk ("stack").

3. Ulike typer brenselceller

Det finnes en rekke ulike typer brenselceller. Det er i hovedsak to måter å skille mellom dem: 1) Lavtemperatur eller høyttemperatur brenselceller, og 2) Hva slags elektrolytt¹ som benyttes. Et unntak er for DMFC, hvor metanol inngår direkte i anodereaksjonen. Elektrolytten for denne cellen er ikke bestemmende for typen. Lavtemperatur brenselceller har driftstemperatur under ca. 200 °C og inkluderer alkalisk brenselcelle (AFC), fosforsyre brenselcelle (PAFC), proton "exchange" membran / polymerisk elektrolytt brenselcelle (PEMFC), og DMFC.

Høyttemperatur brenselceller har driftstemperatur i området 600-1000 °C. To typer er utviklet, smeltet karbonat brenselcelle (MCFC) og fast oksyd brenselcelle (SOFC). En oversikt over ulike typer brenselceller er vist i *Tabell 1*, sortert etter status for teknologisk utvikling, fra velutprøvd til lite utviklet.

Tabell 1 De ulike typer brenselceller som er i bruk eller under utvikling

	Alkalisk (AFC)	PAFC (fosforsyre)	PEMFC (proton "exchange" membran / polymerisk elektrolytt)	MCFC (smeltet karbonat)	SOFC (fast oksyd)	DMFC (direkte metanol)
Driftstemperatur (°C)	80-100	150-210	70-130	600-1000	650-1000	60-120
System-virkningsgrad²	50-60 %	35-45 %	ca 45 %	47 %	ca 50 %	-
Aktuelt transport bruksområde	Personbiler, små lastebiler	Buss, store lastebiler, tog, skip	Personbiler, små lastebiler, busser, mindre båter	Tog, skip	Buss, lastebiler, skip, tilleggsforsyning	Lette kjøretøy
Aktuelt effektområde	5-150 kW	50 kW - 11MW	5-250 kW	100 kW - 2 MW	100-250 kW	5 kW
Status for teknologisk utvikling	Velutprøvd i romfart	Kommersielle stasjonære anvendelser	Prototyper for mobile anvendelser	Felt-demonstrasjon	Laboratorie-demonstrasjon	Grunnforskning ³

Kilder: Carrette et al. (2001); Jordanger (2002), Ashley (2002), Kalhammer (1998)

¹ Med elektrolytt menes sammensetningen av det medium som ionene beveger seg i mellom elektrodene. Elektrolytten fungerer som en barriere for ikke-ioniserte molekyler (reaktanter). Elektrolytten kan enten være i fast form eller flytende.

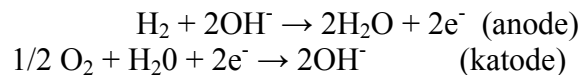
² De angitte virkningsgrader er for produsert elektrisitet i brenselcellen. Tap i tilknyttede systemer er ikke inkludert. For høyttemperatur brenselceller kan betydelig høyere system effektivitet oppnås hvis utnyttelse av produsert varme tas med i beregningene. Jordanger et al. (2002) oppgir en slik systemeffektivitet på 60-80% og 60-70% for henholdsvis MCFC og SOFC.

³ Direkte metanol brenselceller til transportmidler ligger langt fram i tid. Det forskes imidlertid på denne typen brenselceller for bærbare anvendelser.

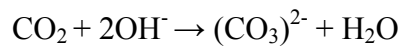
3.1. Alkalisk brenselcelle (AFC)

Alkaliske brenselceller ble først utviklet på 1950-tallet, og er en etablert teknologi innen romfart. AFC ble bl.a. benyttet i Apollo-programmet. En personbil drevet av en AFC ble bygd av K. Kordesch i 1970-årene og ZeTek Power Corp (tidl. Zevco) har utviklet en alkalisk brenselcelle for taxi som kjører i London (De Geeter et al., 1999).

Alkalisk brenselcelle har høyest energiomdannings effektivitet av alle brenselcelletyper (50-60%). Den er imidlertid avhengig av svært rene gasser, og dette er en viktig barriere for denne typen brenselceller. Kaliumhydroksyd (KOH) benyttes som elektrolytt. Anode- og katode reaksjonene i den alkaliske brenselcellen er:



Med KOH som elektrolytt får cellen høy spenning under nullbelastning, og dette har den ulempen at det da dannes karbonater fra reaksjonen med CO₂:

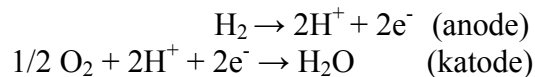


Karbonater er ødeleggende for elektrolytten og dette gir brenselcellen svært kort levetid. For å øke levetiden på denne typen brenselcelle kreves det at elektrolytten må være i flytende form, for ved regelmessige intervaller å kunne pumpes ut av systemet og erstattes med ny elektrolytt. Dette er et problem, ettersom det innebærer høyt forbruk av elektrolytt, samt hyppig vedlikehold. Alternativet til utskifting av elektrolytt er å fjerne CO₂ fra hydrogen- og lufttilførselen. Dette kan gjøres på forskjellige måter, men innebærer økt systemkompleksitet.

3.2. Fosforsyre brenselcelle (PAFC)

PAFC baserer seg på relativt veletablert teknologi, og har vært kommersielt tilgjengelig for stasjonær bruk siden 1993, med bl.a. over 200 anlegg i Japan (Jordanger et al., 2002). Transportsanvendelser er imidlertid svært begrenset, men har vært vurdert som aktuell brenselcelletype for tog (USDOE, 1997). PAFC har også vært utprøvd i busser (Perniceni et al., 2002).

Fosforsyre benyttes som elektrolytt. Anode- og katode reaksjonene i PAFC brenselcellen er:



En ulempe med denne brenselcelletypen er at en del av fosforsyren går tapt ved lengre tids bruk av cellen. Det er derfor nødvendig å tilføre elektrolytten ved jevne mellomrom (Larminie and Dicks, 2000). Siden driftstemperaturen på PAFC cellen er 150-210 °C, kreves kjøling under bruk. Dette kan gjøres på to måter; med luft (evt. gass) eller vann. Det største problemet med luftkjøling er at dette krever stor plass⁴, og dermed reduserer muligheten for nedskalering av volumet på cellen. Vannkjøling på sin side er problematisk p.g.a. at det krever vannrensesystem for å hindre korrosjon i kjølesystemet. Egnert vannkvalitet kan oppnås med rensing ved bruk av ionebytter, men dette innebærer kostnadsøkning, og er begrenset til større systemer, over 100kW (Larminie and Dicks, 2000).

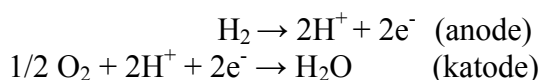
⁴ Dette problemet er ytterligere belyst i avsnitt 7 om temperaturproblematikk

Det største problemet med PAFC celletypen ved bruk i transportmidler er at de er store og tunge, samt at de har lav virkningsgrad (35-45%).

3.3. Proton "exchange", polymerisk elektrolytt, membran brenselcelle (PEMFC)

De første PEMFC ble brukt i Gemini –romfarts programmet på 1960-tallet. De mest kjente anvendelsene av PEM brenselceller i transport er i personbiler og busser fra Ballard, Diamler-Chrysler, Toyota, Ford, GM mfl., og er den typen brenselceller det fokuseres klart mest på i transportanvendelser. Dette inkluderer også maritime anvendelser, hvor bl.a. marinen i USA (U.S. Navy) utvikler PEM brenselceller (Karni et al., 2000). PEM brenselceller er også vurdert som aktuelle for bruk i mindre jernbanelokomotiver (USDOE, 1997).

Denne celletypen benytter en protongjennomtrengelig polymermembran som elektrolytt. Anode- og katode reaksjonene i denne celletypen er:

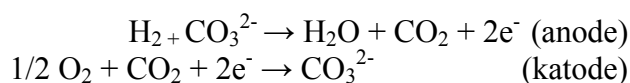


Ekstremt ren hydrogen er nødvendig for at denne type brenselcelle skal fungere. I de fleste systemer finnes imidlertid i praksis små mengder av CO, S eller NH₃ i gasstilførselen (Carrette et al., 2001). Disse substansene vil blokkere katalyseseteene på anoden, og stoppe reaksjonen. Dette problemet er spesielt stort når hydrogenet er produsert ved reformering i kjøretøyet (se eget avsnitt 4). Problemet krever rensing av hydrogengassen før den tilføres brenselcellen. Dette øker imidlertid systemkompleksiteten. En annen måte å fjerne CO fra brenselcellen på er å blande inn små mengder luft eller oksygen i gasstilførselen ("air bleeding", ca. 1 % innhold i gassen). Dette stimulerer oksydasjon av CO til CO₂. Denne metoden krever imidlertid et svært avansert styrings- og kontrollsystem, fordi luft/oksygeninnholdet må nøye overvåkes. Tilsetning av hydrogenperoksyd til gasstilførselen er også blitt vurdert som en metode for å fjerne CO fra gassen (Carrette et al., 2001).

3.4. Smeltet karbonat brenselcelle (MCFC)

MCFC er basert på relativt ny teknologi, og har kun i mindre grad vært utprøvd i transport. Brenselceller av denne typen er tunge og store systemer som i dagens form er mindre egnet for mobile anvendelser. Det er imidlertid en viss interesse for å benytte MCFC i skip (Karni et al., 2000).

I en MCFC benyttes smeltet (eng. "molten") karbonat som elektrolytt. Karbonationer (CO₃²⁻) beveger seg gjennom elektrolytten fra katoden til anoden. Dette er en høytemperatur celle, hvor mulighetene for intern reformering gjør cellen mindre ømfintlig for urenheter som CO og CO₂ i gasstilførselen. Anode- og katodereaksjonene i MCFC brenselcellen er:



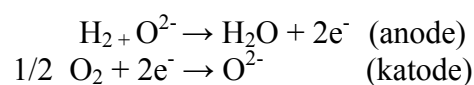
Den høye temperaturen (600-1000 °C) i MCFC cellen bidrar imidlertid til problemer med korrosjon og rask nedbryting av cellematerialene, spesielt elektrodene. Å komme fram til egnede cellematerialer er en mye større barriere for høytemperatursceller enn for celler som har lavere

driftstemperatur. Kravene til korrosjonsmotstand, tetningsevne (for å unngå lekkasjer) og termisk stabilitet er store, og dette bidrar til høye kostnader for denne typen brenselceller.

3.5. Fast oksyd brenselcelle (SOFC)

SOFC brenselcellen er også basert på relativt lite gjennomprøvd teknologi, og har i liten grad blitt utprøvd i transport. Av mobile anvendelser har imidlertid SOFC brenselcellen blitt vurdert som aktuell kandidat for tilleggsforsyning av elektrisitet på skip og tog, f.eks. kjøle/varmeanlegg, belysning, elektrisk utstyr (Larminie and Dicks, 2000). Bilprodusenten BMW arbeider med å utvikle SOFC som en tilleggsforsyner av elektrisitet i personbiler (ibid.).

SOFC brenselceller har et oksyd i fast form, vanligvis zirkonium-oksyd (ZrO_2), som elektrolytt. Anode- og katodereaksjonene i SOFC brenselcellen er:

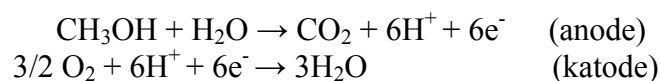


Som for andre høytemperaturceller er det vanskelig å finne materialer for SOFC med god nok termisk stabilitet. Valg av dyre materialer for å hindre korrosjon og nedbrytning av cellematerialene gir høye kostnader for SOFC cellen.

3.6. Direkte metanol brenselcelle (DMFC)

DMFC er trolig den brenselcelletypen som det er knyttet størst teknologiske utfordringer til. Forskning på små DM-brenselceller utføres bl.a. av DiamblerChrysler (Ashley, 2002).

I en DM-brenselcelle blir metanol ledet direkte inn i brenselcellen, uten mellomsteget med reformering til hydrogen først. Anode- og katode reaksjonene i denne celletypen er:



Metanol som tilføres anoden er fortennet med vann. Bare en del av metanolen forbrukes, og resten må oppkonsentreres slik at den kan benyttes på nytt. Dette krever avanserte metanolsensorer som er en kritisk komponent i brenselcellesystemet. Metanolsensorer er vanligvis basert på et elektrokjemisk system som måler den elektriske strømmen fra elektrooksydasjonen av metanol. En viktig barriere for direkte metanol brenselcellen er at metanoloksydasjonen på platinaelektroder er en relativt langsom reaksjon. Sammenliknet med hydrogenoksydasjon er den katalytiske aktiviteten for metanol ikke særlig effektiv for Pt-elektroder. Dette kan forklares ved at det under oksydasjon av metanol dannes CO som et mellomprodukt. CO fører til blokkering av katalysesetene på Pt-elektroden, og stopper videre reaksjon. Dette forsøkes overvunnet ved utvikling av nye typer elektroder for å øke katalyseaktiviteten av Pt for metanoloksydasjon. Ulike metaller som for eksempel rhenium, ruthenium, tinn, osmium, rhodium, bly, vismut, wolfram, molybden forsøkes brukt, i legering med platina (Carrette et al., 2001).

Et hovedproblem i DMFC er at metanol trenger gjennom membranen fra anoden til katoden (metanol "cross-over"). Dette resulterer i at cellen fungerer dårlig. Nye katoder, som tolererer metanol, forsøkes utviklet for å overvinne dette problemet. Et problem med metanoltolerante

katoder, som for eksempel $\text{Mo}_2\text{Ru}_5\text{S}_5$, er imidlertid at disse elektrodene har dårligere katalytisk aktivitet for reduksjon av oksygen, enn tilfellet er for platinakatoder (Carrette et al., 2001).

4. Reformering av metanol til hydrogen

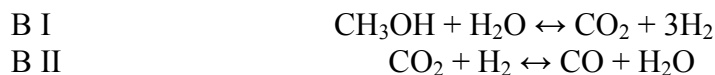
Det finnes to hovedmetoder for å omdanne metanol til hydrogen: 1) Dampreforming og 2) Partiell oksydering. For bruk ombord i kjøretøy er dampreforming foretrukket metode, p.g.a. noe høyere effektivitet (Larminie and Dicks, 2000). De mange enkelttrinn i reformeringen gir stor system-kompleksitet, som bidrar til økt vekt og redusert effektivitetsreduksjon av brenselcellesystemet.

4.1. Dampreforming

Dampreforming av metanol presenteres ofte som en to-trinns reaksjon (I og II) som kan foregå ved to ulike reaksjonsmekanismer (A og B). Den første består av nedbrytning av metanol til CO og hydrogen, med påfølgende reaksjon hvor CO reagerer med vann og produserer CO_2 og hydrogen:



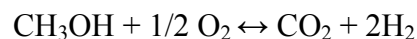
Den andre reaksjonsmekanismen består av at metanol og vann reagerer med hverandre og produserer CO_2 og hydrogen. Deretter reagerer CO_2 og hydrogen med hverandre igjen for å gi termodynamisk likevekt:



Dampreforming av metanol er endoterm, slik at energi må tilføres i form av ekstern varme. Dette gjøres ved at en blanding av metanol og vann fordampes ved oppvarming til ca 300°C i nærvær av katalytt, vanligvis kobber/sinkoksyd -basert.

4.2. Partiell oksydering

Omdanning av metanol til hydrogen ved partiell oksydering skjer ved at metanol fordampes og blandes med oksygen. Først dannes CO, CO_2 og vann. Den videre omdanningen av drivstoffet, med vann og oksygen, fører til produksjon av en hydrogen-rik gassblanding:



Partiell oksydering av metanol er eksoterm og er katalysert av palladium-sinkoksyd.

5. Effektproblematikk

5.1. Effekttap ved høy belastning (akselerasjon)

Ved *akselerasjon* er belastningen på drivsystemet spesielt stor. For å oppnå tilfredsstillende akselerasjon kreves at brenselcelle-systemet gir nok effekt til drivsystemet. Manglende effekt kan utgjøre en begrensning knyttet til *kjøremønsteret* til brenselcellekjøretøy. For at en bil med brenselcelleelektrisk grunnsystem skal kunne nærme seg kjøremønstret som knytter seg til dagens personbil regnes derfor *el-hybridisering* som nødvendig. Et elektrisk batteri kan gi nødvendig elektrisitet til motoren under høye belastninger og oppvarming. El-hybridisering innebærer imidlertid også øket vekt og systemkompleksitet.

5.2. Effekttap i tilknyttede systemer

Effekttapene i brenselcellesystemer er ikke bare knyttet til selve brenselcellestakken, men også i høy grad til de *tilknyttede systemene*.

De fleste brenselcelletyper trenger *kompressorer* som kan gi høyt trykk på lufta, for å øke mengden oksygen som tilføres cellen, slik at den kjemiske reaksjonen drives framover. Kompressorer er imidlertid energikrevende, og ca. en ¼ - del av brenselcellens strømproduksjon kan gå med til å komprimere lufta til det trykket (2-3 atm) som benyttes i mange brenselcellesystem (Kalhammer et al., 1998).

Når lufta komprimeres utvikles i tillegg varme, så *kjøleanlegg* ("intercooler") er nødvendig for de fleste typer kompressorer. En egen systemkomponent som kreves for PEM brenselceller er *luftfukter*. Denne er nødvendig for å holde gasstrømmen fuktig slik at ikke membranen tørker ut. *Filtreringssystemer* for luft, hydrogen og vann kreves også for de fleste brenselcelletypene. Alle disse tilknyttede systemene er med på å gi brenselcellesystemet effekttap.

5.3. Tyngre kjøretøy

Det knytter seg spesielle teknologiske barrierer til bruk av brenselceller i tyngre kjøretøy som buss, lastebil, tog og båt. I tyngre kjøretøy blir kravene til effekt større p.g.a. den høyere belastning som motoren i disse systemene utsettes for.

Busser har effektkrav som stor sett kan dekkes av PEMFC. Det aller meste av utvikling innen bussanvendelser er også basert på denne celletypen. Mercedes-Benz sin PEMFC buss Citaro har for eksempel en effekt på 200kW. Imidlertid har også PAFC vært testet i busser (Perniceni, 2002).

Mindre *lastebiler* (og varebiler) har effektbehov i et område som kan dekkes av PEMFC eller AFC. Eksempler på dette er DiamlerChrysler NECAR 1 med en Ballard 50 kW PEMFC og London Truck med en Zevco 63 kW AFC (hybrid). Større lastebiler krever atskillig mer effekt, og SOFC er vurdert som aktuell brenselcelletypetype og er under utvikling i USA (Davis, 2002).

For *jernbane* er effektkravene spesielt store. Dette utgjør en barriere for utvikling av brenselcellelokomotiver. PEMFC systemer er begrenset oppad til en effekt på ca. 250 kW, og dette er ikke nok for store lokomotiver (Perniceni et al., 2002). Store lokomotiver krever effekt

på 2-5MW (ibid.). De typene brenselceller som kan ha høy nok effekt er PAFC og MCFC, hvorav kun PAFC er utviklet for kommersiell anvendelse, men bare til stasjonær bruk. I tillegg har PAFC relativt lav virkningsgrad, og systemene er store og tunge. For mindre jernbanelokomotiver (f.eks. skiftelokomotiver) er imidlertid også PEM brenselceller blitt vurdert som aktuelle (USDOE, 1997). Sammenkobling av flere 250 kW PEM brenselcellemoduler for å øke effekter er også nevnt som en mulighet på større lokomotiver (Perniceni et al., 2002). Dette vil imidlertid resultere i svært store effekttap.

Brenselceller for *maritime* anvendelser setter store krav til effekt. For mindre båter kan nok PEMFC gi tilstrekkelig effekt, og det foregår noe utvikling av denne celletypen for maritimt bruk. Bl.a. utvikler marinen i USA (U.S. Navy) PEM brenselceller (Karni et al., 2000).

Brenselceller for bruk i fiskebåter er under utvikling i forbindelse med hydrogensatsing på Island. Fiskebåter har motorer med effekt fra ca 300kW og opp i flere megawatt for de største havtrålere. Effekten av PEMFC er ikke høy nok til selv de minste typene fiskebåter. MCFC har effekt som kan dekke effektnivået på de fleste fiskebåter, mens PAFC er den eneste typen med effektnivå som kan dekke behovet til de største båtene. Dette gjelder også for lastebåter og skip, og det er en viss interesse for å benytte MCFC (Karni et al., 2000). SOFC vil ikke kunne gi nok effekt til å være hovedstrømkilde, men er imidlertid vurdert som aktuell kandidat for tilleggsforsyning av elektrisitet på skip, f.eks. kjøle/varmeanlegg, belysning, elektrisk utstyr (Larminie and Dicks, 2000).

6. Rekkevidde og lagring av drivstoff i kjøretøy

Rekkeviddeproblematikk er knyttet til lagring av drivstoff i kjøretøyene. Som for elektriske biler, kan brenselcellebilene bli en annen type kjøretøy enn det vi er vant til. Det gjelder særlig rekkeviddeproblematikken. Elektriske biler har som kjent en mye kortere rekkevidde enn biler drevet av bensin eller diesel. Lagring av elektrisitet i batterier er problematisk p.g.a. batterienes tyngde, som gjør at en stor andel av energibruken går med til å transportere batteriet. Dette gir elektriske biler dårlig rekkevidde. Et tilsvarende problem gjelder for lagring av hydrogen i brenselcellekjøretøy.

Det er i hovedsak tre aktuelle måter å lagre drivstoffet ombord i kjøretøy med hydrogenbaserte brenselceller:

- Benytte *metanol* som drivstoff, med reformering til hydrogen om bord i kjøretøyet, eller med bruk av direkte metanol brenselcelle. Dette innebærer en drivstofflagring som ikke skiller seg vesentlig fra dagens lagring av bensin og diesel, men med noe større krav til korrosjonsmotstand i materialene som er i kontakt med drivstoffet. Ved denne metoden er det mulig å lagre tilstrekkelig drivstoff for å oppnå ønsket rekkevidde. Energieffektiviteten for dampreforming av metanol til hydrogen er imidlertid lav, ca. 35-40%. Resten (65-60%) er varmetap (USDOE, 1997). En del av varmen kan imidlertid nyttegjøres i brenselcellen.
- *Hydrogen i gassform* er den vanligste måten å oppbevare hydrogen på. Hovedproblemet er knyttet til hydrogengassens lave tetthet, som gir store volumkrav. Store drivstofftanker medfører også vektøkning i kjøretøyene, med resulterende økning i drivstofforbruk og redusert rekkevidde. Det er blitt hevdet at ved å benytte en kommersielt tilgjengelig tank med komprimert hydrogengass i akseptabel størrelse for en personbil, vil

brenselcellebilen ha en rekkevidde på kun 190 km (Ashley, 2002). Dette er kort sammenliknet med rekkevidden til bensin- og dieslbiler, som vanligvis er i området 400-500 km.

- Lagring av *flytende hydrogen* kan gi bedre rekkevidde, ved at drivstoffet har større tetthet enn når det er i gassform. Det er imidlertid svært energikrevende å holde hydrogenet flytende. Kryogenisk teknologi for å holde drivstoffet på $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ gir også kjøretøyet ekstra vekt og atskillig større systemkompleksitet. Det knyttes i tillegg nye sikkerhetsspørsmål til lagring av hydrogen ved så ekstremt lave temperaturer (Ashley, 2002).

I tillegg til de tre hovedmetodene for lagring av drivstoff i brenselcellekjøretøy, må det også nevnes at det arbeides med å utvikle teknologier for å lagre hydrogen i metaller, i form av metallhydrider, eller ved kjemisk binding av hydrogenet (kjemiske hydrider). Den største barrieren knyttet til disse teknologiene er at mengden hydrogen som kan lagres per vektenhet, fremdeles er svært lav. I tillegg er det energikrevende å få hydrogenet ut av metallhydridene (skjer gjennom oppvarming). Ytterligere en metode er lansert: lagring av hydrogen i karbon nanofibre. Dette er imidlertid en svært lite utviklet teknologi.

7. Temperaturproblematikk

Temperaturproblemene som kan knyttes til brenselcellekjøretøy kan deles i 2 hovedtyper:

- Problemer ved lav utetemperatur
- Problemer ved høy utetemperatur

Ved parkering av kjøretøyet i *lav utetemperatur* vil brenselcellen kunne fryse. I brenselceller er vann tilstede, bl.a. som et reaksjonsprodukt. Vannet kan fryse ved lave temperaturer, og fryse- og smelteprosessene vil kunne ødelegge den grunnleggende teknologien. I mange cellyper (bl.a. PEMFC og DMFC) vil vannkrystaller f.eks. kunne ødelegge de ultratynne membranene i cellene.

Brenselcellene produserer heller ikke strøm før temperaturen på cellen kommer over $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. For å unngå at brenselcellen fryser må supplerende energi tilføres, for eksempel ved parkering i oppvarmet garasje, eller ved bruk av motorvarmer. Problemet forsøkes også løst ved bl.a. å fjerne vannet når brenselcellen slås av, og ved å benytte spesielle kjølevæsker (Ashley, 2002).

Det knytter seg spesielle kaldstart / kaldkjøringsbarrierer til metanolreformere. Hvert av de mange enkelttrinn i reformeringens komplekse prosess har sine krav til temperatur. Reformeren i DiamblerChryslers nye Commander 2 tar f.eks. en halv time å varme opp (Ashley, 2002). Det er spesielt problematisk å få varmet opp dampen som reformeren bruker til å bryte ned metanol til hydrogen. Problemet forsøkes løst ved utvikling av reformere som benytter katalysator istedenfor damp (ibid.).

Høy utetemperatur kan også gi problemer knyttet til brenselcellekjøretøy. Dette gjelder spesielt for lavtemperaturbrenselceller. For denne type brenselceller kan forskjellen mellom utetemperatur og driftstemperatur være relativt liten. Kravene til presis kjøling blir derfor store, og problemene er størst når temperaturen på lufta som benyttes til kjøling er høy. Kjølelufta kan sies å ha dårlig kjøleende evne under slike forhold, og det er vanskelig å oppnå god nok kjøleeffekt. DiamblerChrysler har f.eks. uttalt at et av de største problemene med

lavtemperaturbrenselceller er at de trenger svært store radiatorer (Ashley, 2002). Dette er også påpekt i 5-lab studien i USA, ved at den lave driftstemperaturen til brenselcellen gjør at varmen som skal fjernes er såkalt ”low grade heat”, som krever stor luftbevegelse eller store radiatoroverflater (USDOE, 1997). Kravet om store radiatorer medfører problemer for tilpassing til en aerodynamisk design, samt at det gir kjøretøyene økt vekt. Begge faktorer bidrar til å begrense energieffektiviteten av brenselcellekjøretøy.

8. Utslipp

Brenselceller er ofte betraktet som ”utslippsfrie”, ved at det eneste som kommer ut av motoren er vann. Så enkelt er det imidlertid ikke. I dette avsnittet påpekes at det kan knyttes en rekke problemer til utslippene fra brenselceller.

8.1. Utslipp av vanndamp

Flere aktuelle brenselcelletyper har en relativt høy driftstemperatur. SOFC og MCFC -cellene har driftstemperaturer opp mot 1000 °C (Kalhammer et al., 1998). I disse brenselcelletypene vil vannmolekylene som frigjøres være i gassform. Når vannmolekyler avkjøles kan de kondensere til vanndamp. Vanndamp kan gi bidrag til dannelse av tåke, og kan dermed i kombinasjon med andre former for luftforurensing være viktig i lokalklimatisk sammenheng. Utslipp av vanndamp fra et stort antall brenselceller i framtida har således et potensiale for å kunne medføre økt forekomst av smog. Dette vil i så fall kunne ha vesentlige helse- og miljøkonsekvenser.

For å hindre vanndamputslipp er en mulighet å la kondensering av vannet skje i kjøretøyet, evt. med påfølgende oppsamling av kondensat. Dette vil imidlertid øke systemkompleksitet og vekt, og bidra til dårligere systemeffektivitet. I den nye brenselcelle-bilen fra Honda, som nylig er tatt i bruk i California, er det for eksempel valgt å ikke samle opp vannet, men la det slippe ut som vanndamp (Garza, 2002).

8.2. Reformer-utslipp

Ved reformering av metanol til hydrogen, samt i direkte metanol brenselcellen vil kjøretøyene slippe ut CO₂. Men det vil også skje noe utslipp av NO_x, HC og partikler. Forventede direkte utslipp fra personbiler med brenselcelle og metanolreformering (FCMET) i 2020, sammenliknet med konvensjonelle bensin- og dieslbiler (KONVBENS og KONVDIESEL) er vist i *Tabell 2*.

Tabell 2 Forventede direkte utslipp fra personbiler i 2020 (Tallene er relative til bensinmotor i 1998, som er gitt verdien 1)

	CO ₂	NO _x	HC	PM ₁₀
KONVBENS	0,32-0,59	0,15-0,51	0,25-0,51	0,30-0,76
KONVDIESEL	0,32-0,45	0,64-1,36	0,21-0,27	0,74-2,41
FCMET	0,77	0,11-0,13	0,09-0,10	0,04-0,05

Kilde: Kruse et al. (2002)

Som det framgår av *Tabell 2* kan det knyttes en problematikk til utslippene fra brenselcellemotorer med metanolreformering. De direkte utslippene forventes å være gjennomgående lavere enn for bensin og diesel, kanskje med unntak av CO₂. Det må imidlertid

understrekes at det knytter seg stor grad av usikkerhet til de forventede utslippene. Beregningene viser også at det er store innbyrdes variasjoner for ulike motortyper.

Utslippene fra reformering av metanol til hydrogen, er størst ved kaldstart, dvs. kjøring før brenselcellen har nådd optimal driftstemperatur. Da kan også CO og VOC slippes ut (Thomas et al., 2000). Slike kjørebetingelser, basert på faktiske kjøreforhold, og ikke laboratorietester er tatt med i de estimerte lokale utslippene vist i *Tabell 3*. Disse inkluderer effektene av unormal kjøring ("off-cycle operation") og den gjennomsnittlige effekten av svikt i kjøretøyenes systemer for utslippskontroll.

Tabell 3 Estimerte utslipp av lokal forurensing (VOC, CO og NO_x) fra brenselcelle og bensin (g/km)

	VOC	CO	NO _x
KONVBENS	0,472	4,721	0,440
FCMET	0,014	0,003	0,001

Kilde: Thomas et al. (2000)

Samlet illustrerer de to estimatene av utslipp vist i *Tabell 2* og *Tabell 3* at det er store variasjoner i forholdet mellom forskjellige utslipp i de ulike motorsystemene. Det skjer også utslipp av metan (CH₄) og lystgass (N₂O) fra reformering av metanol til hydrogen. I en studie utført av General Motors (GM) er de forventede utslippene av CH₄ og N₂O fra brenselcellebil med metanolreformering beregnet. I *Tabell 4* er de sammenliknet med tilsvarende utslipp fra konvensjonelle bensin- og dieslbiler og el-hybridbiler med komprimert naturgass (HYBCNG).

Tabell 4 Direkte utslipp av CH₄ og N₂O i ulike motorsystemer (g/km)

	CH ₄	N ₂ O
KONVBENS	0,020	0,0174
KONVDIESEL	0,010	0,0099
FCMET	0,012	0,0035
HYBCNG	0,124	0,0087

Kilde: Choudry et al. (2002)

Tabellen viser at metansutslippene fra brenselcellemotorer med metanolreformering er forventet å ligge i samme størrelsesområde som tilsvarende utslipp fra dieselmotorer. Det forventede utslipp av lystgass er lavere enn for de andre motortypene, men utslippet kan likevel komme til å ha klimamessig betydning. I GM-studien er det også beregnet det samlede direkte utslippet av klimagassene CO₂, CH₄ og N₂O i ulike motorsystemer (*Tabell 5*).

Tabell 5 Samlet direkte utslipp av klimagasser i ulike motorsystemer

	Samlet utslipp (g CO ₂ -ekvivalenter/km)
KONVBENS	185
KONVDIESEL	146
FCMET	112

Som *Tabell 5* viser er det samlede utslipp av klimagasser fra brenselcellemotor med metanolreformering forventet å være lavere enn for diesel og bensinmotor, men vil allikevel

kunne gi betydelige bidrag. Her må det imidlertid kommenteres at dette er utslippsberegninger som er begrenset til såkalt "Tank-to-Wheel", dvs at det ikke differensieres mellom fossil og biologisk metanol. I sammenlikning med metanol fra naturgass gir metanol produsert fra biologisk råmateriale betydelig lavere total-utslipp ("Well-to-Wheel") av klimagasser.

9. Kostnader og tidsperspektiver

Kostnadene framtrer i dag som en vesentlig barriere for brenselcelleteknologien. Det er tre ulike aspekter ved vurdering av kostnader i forbindelse med en overgang til brenselcelleteknologi. Det første er selve drivsystemet (inkludert brenselcelle og eventuell reformer), det andre hele kjøretøyet, og det tredje er brensllet. I denne sammenheng er fokus på kostnadene ved drivsystemet.

For at motorer basert på brenselcelledrift skal kunne ligge på samme kostnadsnivå som forbrenningsmotorer kreves at kostnadene på selve brenselcellesystemet reduseres kraftig. En vurdering som er gjort av Ashley (2002) kommer fram til at prisen på brenselcellemotorer er syv ganger så høy som en gjennomsnittlig forbrenningsmotor.

Brenselcellefabrikanten Ballard gjorde i 1997/1998 et estimat om at kostnadene måtte ned på USD 20-35/kW for brenselceller generelt (Ahlvik, 2002). Dette tilsvarer et kostnadsnivå på ca. USD 50/kW for hele drivsystemet for en personbil (Ahlvik, 2002). Ballard's Mark 902 PEMFC ble lansert i oktober 2001, til en pris av USD 3000/kW. Dette innebærer en faktor på 100 forskjell mellom dagens nivå og antatt konkurransedyktig pris på brenselceller. Det nasjonale hydrogenforbundet i USA har på den annen side estimert at kostnadene på brenselcellesystemer spesielt for busser må være lavere enn USD 500/kW (Mauro, 1998).

Hvis metanol benyttes som drivstoff kommer kostnadene til reformer i tillegg. Sett i forhold til brenselcellen, er det knyttet enda større usikkerhet til kostnadene på reformer (Kalhammer et al., 1998). Azar et al. (2000) benytter et estimat på USD 25 /kW i ekstra kostnader for metanolreformer. Det er trolig derfor enda større kostnadsbarrierer knyttet til brenselceller med metanolreformer som må overvinnes, før denne løsningen kan bli konkurransedyktig.

Dette sier noe om tidsperspektivet for et konkurransedyktig prisnivå. Det er trolig langt fram i tid før brenselcellene vil kunne nå et slikt nivå ved vanlige kommersielle anvendelser. Samtidig er det store variasjoner i estimatene for kostnadene på brenselcellene. Det bidrar til usikkerhet omkring hvor mye en brenselcellebil vil komme til å koste i ordinær produksjon.

10. Referanser

Ahlvik, P. (2002): Personlig meddelelse. 12.10.2002. Peter Ahlvik, Ecotrafic, Stockholm.

Ahlvik, P. and Brandberg, Å. (2001): *Well-To Wheel Efficiency for Alternative Fuels from Natural Gas or Biomass*. Publication nr. 85, Ecotrafic, Stockholm.

Ashley, S. (2002): Fuel cells start to look real. *Automotive Engineering International Online*. Society of American Engineers. (<http://www.sae.org/automag/features/fuelcells/index.htm>).

- Azar, C., Lindgren, K. and Andersson, B. (2000): *Hydrogen or methanol in the transportation sector?* KFB-Rapport 2000:35., Kommunikationsforskningsberedningen, Stockholm.
- Carrette, L., Friedrich, K.A. and Stimming, U. (2001): Fuel Cells – Fundamentals and Applications. *Fuel Cells. From Fundamentals to Systems*, 1(1), s. 5-39.
- Choudry, R. m.fl. (2002): GM Well-to-wheel analysis of energy use and greenhouse gas emissions of advanced fuel/vehicle systems - A European study. L-B-Systemtechnik GmbH, Daimlerstrasse 15, 85521 Ottobrunn, Tyskland.
- Davis, P.B. (2002): *Fuel Cells for Transportation Applications*. Presentation at Solid State Energy Conversion Alliance Workshop March 21, 2002, Washington, DC.
- De Geeter, E., Mangan, M., Spaepen, S., Stinissen, W. and Vennekens, G. (1999): Alkaline fuel cells for road traction. *Journal of Power Sources*, 80, p. 207-212.
- Garza, M. (2002): City gets “clean” car. *Los Angeles Daily News*, 2.12.2002.
- IPCC (2001): *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Jordanger, E., Møller-Holst, S., Maurstad, O. og Brevik, D.A. (2002): *Hydrogen som energibærer. Energi- og utslippsregnskap for utvalgte energikjeder*. Rapport TR A5713, SINTEF Energiforskning AS, Trondheim.
- Kalhammer, F.R., Prokopius, P.R., Roan, V.P. and Voecks, G.E. (1998): *Status and Prospects of Fuel Cells as Automobile Engines*. A Report of the Fuel Cell Technical Advisory Panel. State of California Air Resources Board, Sacramento, California.
- Karni, Z. m.fl. (2000): *Comparative life cycle costs of fuel cells and other propulsion systems*. Report R&DC-310-99. John J. McMullen Associates, Alexandria, Virginia.
- Kruse, B., Grinna, S. og Buch, C. (2002): *Hydrogen. Status og muligheter*. Bellona rapport nr. 6-2002. Bellona, Oslo.
- Larminie, J. and Dicks, A. (2000): *Fuel Cell Systems Explained*. Wiley & Sons, West Sussex, England.
- Mauro, R.L. (1998): Gaining Perspective on Fuel Cells. *NHA News*, Volume 3, Number 3, Summer 1998. US National Hydrogen Association.
- NHF (2002): *H₂ – info*. Nr. 2, 2002. Norsk Hydrogen Forum (www.hydrogen.no).
- Perniceni, B., Steele, B. And Venturi, M. (2002): *Feasibility study on fuel cell locomotive*. Report prepared for the European Commission DGXII Contract No. JOE3-CT98-2002.

Thomas, C.E., James, B.D., Lomax Jr., F.D. and Kuhn Jr., I.F. (2000): Fuel options for the fuel cell vehicle: hydrogen, methanol or gasoline? *International Journal of Hydrogen Energy*, 25, 551-567.

USDOE (1997): *Scenarios of U.S. Carbon Reductions. Potential Impacts of Energy Technologies by 2010 and Beyond*. Interlaboratory Working Group on Energy-Efficient and Low-Carbon Technologies: Lawrence Berkeley National Laboratory, Oak Ridge National Laboratory, Argonne National Laboratory, National Renewable Energy Laboratory, Pacific Northwest National Laboratory. Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, U.S. Department of Energy.