

Beläggningar på injektorer vid användandet av konventionella och alternativa drivmedel i dagens motorer

Sammanfattning

I ett pågående forskningsprojekt rörande emissioner från alternativa drivmedel inom Emissionsforskningsprogrammet (EMFO) uppdagades problem med uppbyggnad av beläggningar på injektorerna. De studerade bränslena bestod i grunden av konventionell diesel av MK1 kvalitet med inblandning av varierande mängd alkohol samt rapsmetylester (RME). Ett av bränslena, en syntetisk diesel var tillverkad från naturgas. Som referensbränsle användes konventionell MK1-diesel.

Beläggningarna resulterade i kraftigt höjda utsläpp av partiklar, måttligt höjda nivåer av CO och HC samt sänkta nivåer av NO_x, dock uppmättes endast försumbara effekter på bränsleförbrukningen. Analys av beläggningarna med svepelektronmikroskop visade att de bestod av stora mängder kol och syre. Dessutom visade det sig att beläggningarna var heterogena, med inslag av ljusare och mörkare partier.

Analys av de ljusare partierna visade på höga halter av typiska additivmetaller så som kalcium, zink och fosfor. Dessa beläggningar bestod till största delen av bränd motorolja som sannolikt blandats med bränslet via smörjning av insprutningspumpen. Inget av de studerade bränslena hade tillsatser av rengörande additiv, s.k. detergenter.

Projektutförare

Magnus Lindgren

Inst. för Biometri och Teknik, SLU

Per-Anders Hansson

Inst. för Biometri och Teknik, SLU

Christian Wetterberg

SMP Svensk Maskinprovning AB

Hans Arvidsson

SMP Svensk Maskinprovning AB

Bengt Johansson

Volvo Construction Equipment AB

Linda Johansson

SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut

Lars Rosell

SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut

Projektbeskrivning

Det pågående EMFO-projektet, EMMA 5, syftar till att undersöka effekter av transienta belastningar på energieffektivitet och emissionsbildning från arbetsmaskiner vid användandet av alternativa bränslen. De emissioner som innefattas i första delen av projektet är; kolmonoxid (CO), kolväten (HC), kväveoxid (NO_x) och partiklar (PM), d.v.s. de i lagkraven reglerade komponenterna. Dessutom analyserades även bränsleförbrukning och koldioxid (CO₂). I kommande delar av projektet kommer även ett 20-tal icke reglerade komponenter att undersökas samt partiklarnas antalskoncentration och storleksfördelning.

Följande typer av dieselbränslen ingår i projektet:

1. Konventionell diesel av miljöklass 1, levererad av Preem Petroleum AB. Detta bränsle fungerade även som referensbränsle,
2. Ecopar®, levererad av Oroboros AB. Ett syntetiskt dieselbränsle framställt enligt Fischer-Tropsch teknologi.
3. Agrodiesel 15, levererad av Agrofuel AB. Ett blandbränsle bestående av;
 - 85% MK1 diesel, samma bränslebatch som referensbränslet
 - 10% högre alkohol
 - 5% RME
4. Etamix D3, levererad av Svensk Etanol kemi AB. Ett blandbränsle bestående av;
 - 90% MK1 diesel, samma bränslebatch som referensbränslet
 - 10% alkoholderivat

Dessa fyra bränslen utvärderades i ovanstående ordning, referensbränslet först och Etamix D3 bränslet sist. Det referensbränsle av MK1 kvalitet som användes inom projektet levererades direkt från Preem Petroleum AB till projektutförarna och motsvarade det bränsle som finns att inhandla på pump. Hela bränsleleveransen, inklusive det MK1 bränsle som användes som bas i Agrodiesel 15 och Etamix D3 kom från samma batch. Orsaken till detta var att säkerställa att uppmätta skillnader mellan de olika bränsletyperna skulle bero av de inblandade produkterna och inte vara en effekt av olika MK1-bränslen.

Det i projektet använda referensbränslet hade inte några tillsatser av detergent eller andra tillsatser som håller rent i bränslesystemet och förhindrar uppkomst av beläggningar samt bidrar till att bränslesystemet inte försämras. Eftersom den svenska MK1 dieseln har ansetts vara mycket ren har tillverkarna inte sett något behov av detergent.

En turboladdad 6-cylindrig dieselmotor från Volvo Construction Equipment med ett deplacement på 5.48 liter användes inom projektet. Motorn, som vanligtvis är monterad i en hjullastare, var anpassad för drift med konventionell diesel av MK1-kvalitet. Inom projektet genomfördes inga modifikationer eller inställningar av motorn för att förbättra prestanda eller emissionskaraktäristiken, varken för MK1 eller något av de övriga studerade bränslena. Tekniska data för motorn finns beskrivna i tabell 1.

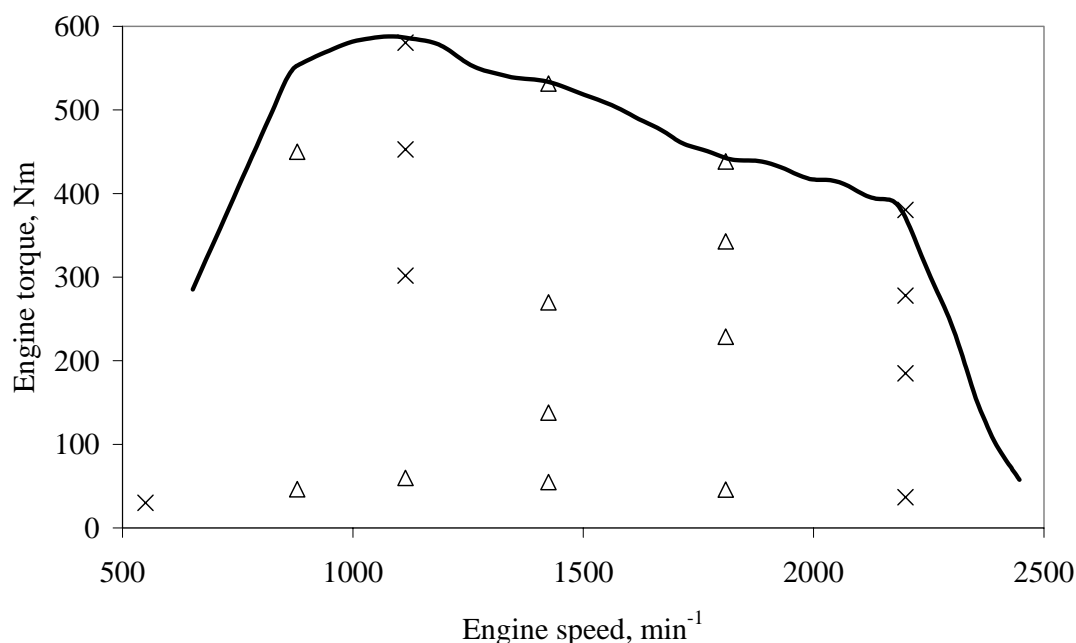
Tabell 1. Tekniska data över studerade motorn

Deplacement	5.48 liter
Cylindrar	6
Maxeffekt	91 kW vid 2150 min ⁻¹
Max moment	624 Nm vid 1100 min ⁻¹
Tomgångsvarvtal	650 min ⁻¹
Max varvtal	2200 min ⁻¹
Årsmodell	1999
Turbo	Ja
Laddluftskylare	Ja
Insprutningspump	Bosch radpump
Avgaskrav	Steg I

Motorn är att betrakta som representativ för arbetsmaskiner.

Mätserie 1

Under våren 2005 genomfördes fullständiga mätserier inklusive upprepning för samtliga fyra bränslen. Mätningarna genomfördes under både statiska och transienta förhållanden. Den statiska testcykeln som redovisas i figur 1 var baserad på de åtta belastningspunkterna som ingår i ISO 8178 C1 standarden och utökad med ytterligare 12 punkter jämt fördelade över motorns arbetsområde.



Figur 1. 20-modes statisk testcykel baserad på ISO 8178 (×) och utökad med ytterligare tolv moder (Δ)

Bränsleförbrukning samt emissioner av CO₂, CO, HC, NO_x och partikelmassa analyserades individuellt för varje belastningspunkt eller mode. Förutom den statiska testcykeln belastades motorn enligt en mängd transienta testcykler. De transienta belastningarna var uppdelade på fem körmönster samt 28 syntetiska transienter. Körmönstren var upprepningar av inspelade belastningsmönster från verkliga

arbetsoperationer med olika arbetsmaskiner. De syntetiska transienterna användes för att studera effekter av specifika förändringar i motorns belastande moment eller varvtal med alla andra variabler konstanta. I tabell 2 finns en sammanställning över samtliga mätserier.

Tabell 2. Belastningsmönster

	Antal
Statiska moder	20
Körmönster	5
Transienter	28
Upprepningar	2

Totalt genomfördes över 2 500 individuella analyser inom mätserie 1. Resultaten från mätserie 1 visade att det endast förekom små skillnader i emissioner mellan de studerade bränslena vilket ställer stora krav på noggrannhet i mätteknik och instrument. Projektutförarna gjorde bedömningen att resultaten inte var tillfredställande och att de uppmätta skillnaderna kunde ha andra förklaringar än skillnader mellan de testade bränslena. För att säkerställa att påvisade effekter var beroende på skillnader mellan bränslena genomfördes en åtgärdsplan för att öka noggrannheten innan samtliga mätningar upprepades.

Åtgärdsplan

Åtgärdsplanen genomfördes under hösten 2005 och avslutades i mars 2006. Målet med åtgärdsplanen var att öka noggrannheten i hela mätsystemet från motorstyrning till emissionsanalys och databearbetning. Efter genomförda förändringar erhöles en mycket god repeterbarhet mellan olika mättillfällen samt stabila mätvärden även under transienta motorbelastningar. Dessutom infördes daglig kalibrering av samtliga mätinstrument, automatisk styrning av laddluftstemperatur, kylvattentemperatur, bränsletemperatur etc.

Mätserie 2

Efter genomförd åtgärdsplan upprepades de i tabell 2 redovisade mätpunkterna för samtliga bränslen. Dessutom genomfördes regelbundna mätningar av en referenspunkt för att säkerställa repeterbarhet inom systemet. Referenspunkten bestod av en statisk belastningspunkt som upprepades före och efter varje mättillfälle. Denna procedur genomfördes vid samtliga bränslen.

Totalt användes motorn under mer än 500 timmar inom detta projekt. Förutom i detta projekt har motorn använts inom 3 andra projekt, dock med färre belastningstimmar. Under dessa andra projekt har inga problem med mätresultat uppdagats.

Verifiering av resultat

Efter avslutad projektetapp, mätning 2, genomfördes ytterligare några referenspunktsmätningar, i första hand med referensbränslet för att verifiera att de emissionsnivåer som rådde vid projektets start kunde återskapas efter avslutad projektetapp. Dessutom genomfördes ett antal referenspunktsmätningar med nya injektorer för samtliga fyra bränslen för att studera eventuell inverkan beroende på försämrade injektorer. De gamla injektorerna besiktigades okulärt samt skickades för analys med svepelektronmikroskop för att avgöra vad eventuella beläggningar bestod av.

Resultat

Repetierbarhet

Efter genomförd åtgärdsplan och före start av mätserie 2 genomfördes ett test av repeterbarheten hos mätsystemet vilket redovisas i tabell 3. Totalt genomfördes 14 upprepningar.

Tabell 3. Uppmätt variation inom mätsystemet

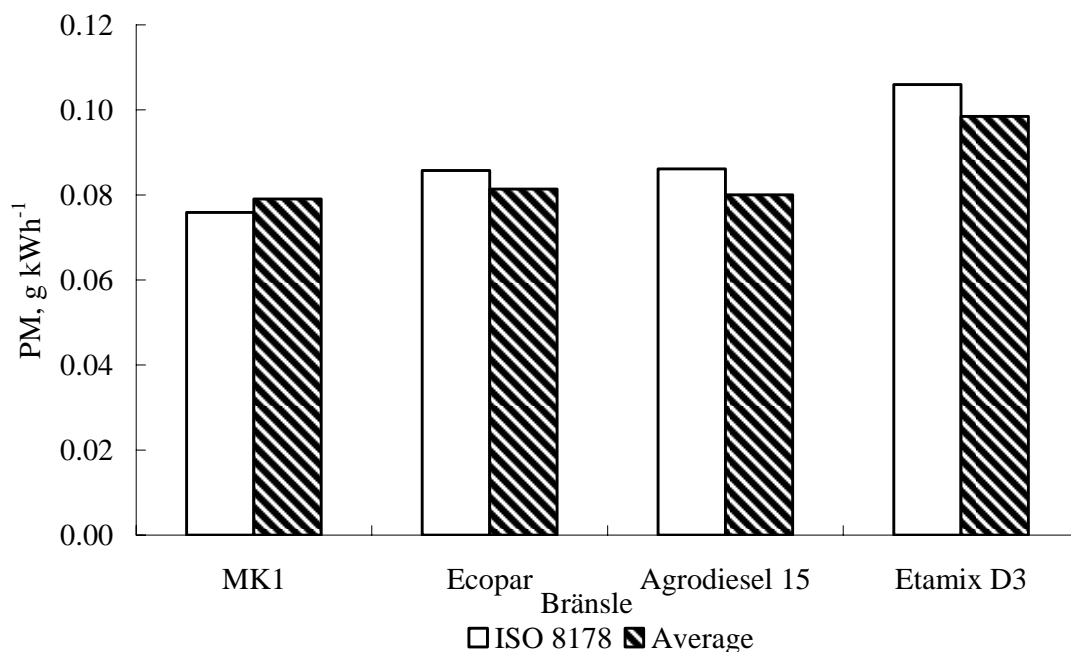
	Enhet	Medel	stdav	cv ^a
Varvtal	min ⁻¹	1 799	0	0.0%
Moment	Nm	343	0	0.0%
Bränsle	g h ⁻¹	13 562	95	0.7%
Effekt	kW	65	0	0.0%
BSFC	g kWh ⁻¹	210	1.5	0.7%
Avgasmängd	kg h ⁻¹	428	2.5	0.6%
CO ₂	g h ⁻¹	42 207	295	0.7%
CO	g h ⁻¹	47	1.0	2.1%
NO _x	g h ⁻¹	279	3.8	1.4%
HC	g h ⁻¹	52	0.8	1.5%
PM	g h ⁻¹	7.6	0.3	4.4%

^a variationskoefficient (standardavvikelse/medelvärde)

Som redovisas i tabell 3 var variationskoefficienten mycket låg för uppmätt bränsleförbrukning och CO₂. Även för övriga gasformiga komponenter var repeterbarheten mycket god. För partiklar var variationen något större men bedömdes som tillfredställande. En del av variationen kan förklaras av skillnader i omgivningsförhållanden d.v.s. lufttryck, lufttemperatur samt relativ fuktighet, då mätningarna genomfördes under två skilda veckor.

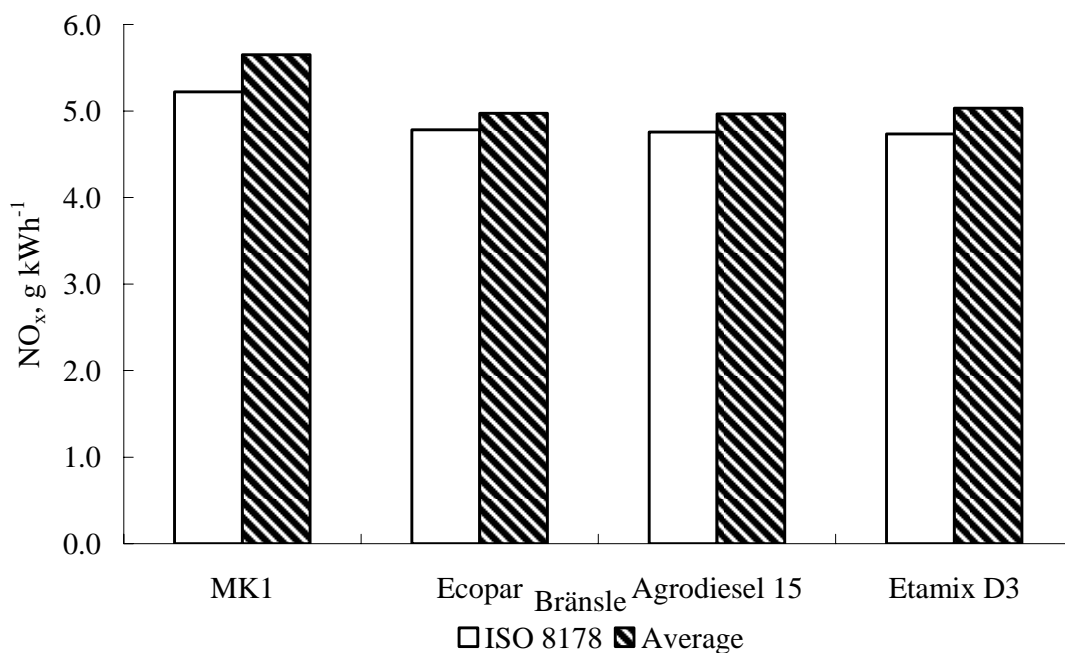
ISO 8178 samt 20-modes medelvärde

Resultaten från de statiska mätningarna under mätserie 2 viktades enligt det schema som beskrivs i standarden ISO 8178 samt som aritmetiskt medelvärde över samtliga 20 punkter. I figur 2 visas uppmätta viktade nivåer av partikelemissioner för samtliga 4 bränslen.



Figur 2. Uppmätta nivåer av partikelemissioner, viktade enligt ISO 8178 C1 samt som 20-moders medelvärde.

I figur 2 kan man se att skillnaderna mellan de olika bränslena är relativt stor. Den största skillnaden i partikelnivåer, ca 40%, uppmättes mellan MK1 bränslet och Etamix D3 bränslet. Dessutom uppvisar resultaten en klar trend med ökade partikelemissioner från MK1 bränslet till Etamix D3 bränslet, vilket var det sista bränslet som utvärderades. För emissioner av NO_x, figur 3, är trenden den omvända.

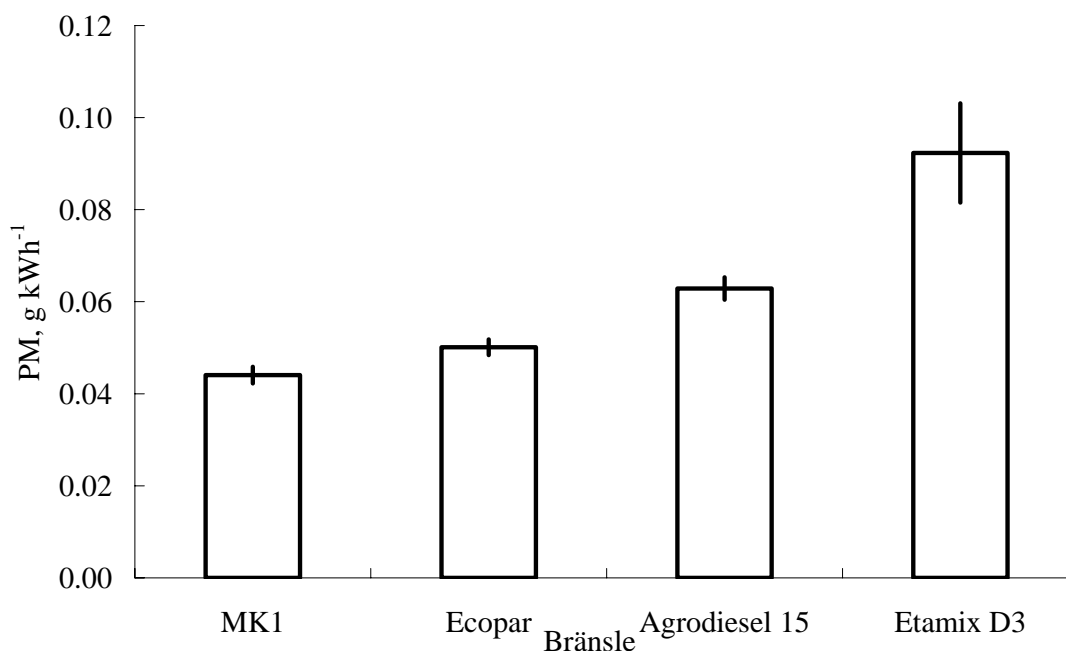


Figur 3. Uppmätta nivåer av NO_x, viktade enligt ISO 8178 C1 samt som 20-moders medelvärde.

Det högsta värde uppmättes för MK1 bränslet vilket även var det första bränslet som studerades, för att sedan sjunka för de övriga bränslena. Skillnaden mellan Ecopar® bränslet, Agrodiesel 15 bränslet och Etamix D3 bränslet är relativt liten, men trenden är fortfarande sjunkande förutom för Etamix D3 bränslet viktat enligt 20-moders medelvärde som uppvisar ett lite högre värde än de två föregående bränslena.

Referenspunkt

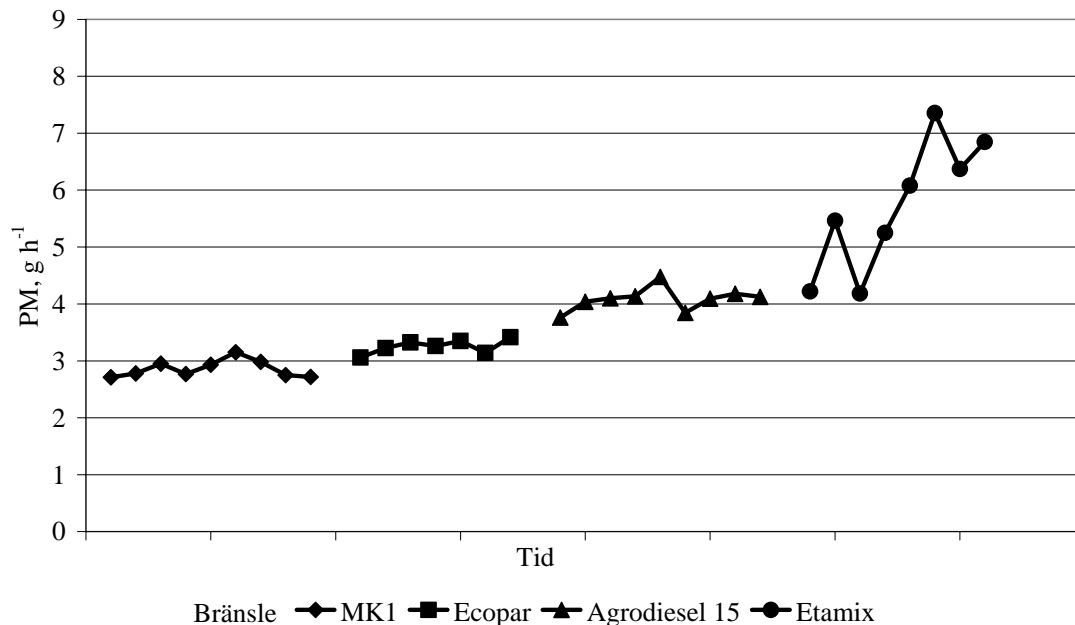
Medelvärdet samt 95% konfidensintervall över uppmätta partikelemissioner från referenspunkterna för samtliga fyra bränslen redovisas i figur 4.



Figur 4. Medelvärde samt 95% konfidensintervall över partikelemissioner från referenspunkter

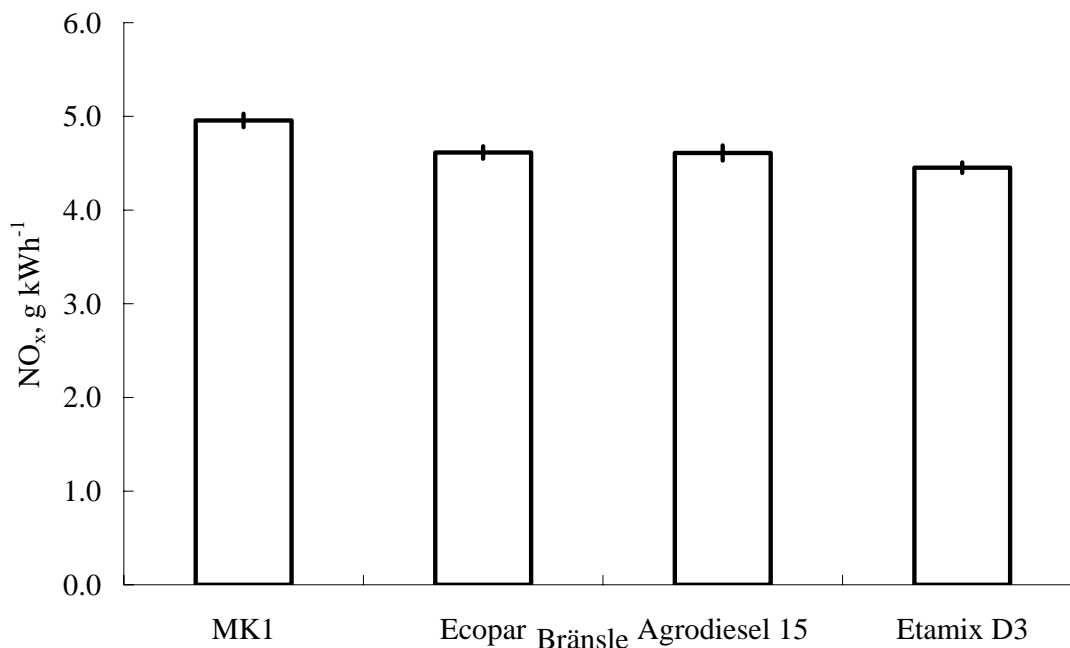
Resultaten i figur 4 visar signifikanta skillnader mellan bränslena med 95% konfidens. Samtidigt uppvisas kraftigt ökade utsläpp av partiklar ju senare i mätserien det aktuella bränslet har studerats, d.v.s. från MK1 bränslet som var först till Etamix D3 bränslet som var sist. Dessutom uppvisar Etamix D3 bränslet en mycket högre variation i upprepning av partikelmätning, 12% jämfört med mindre än 4% för övriga bränslen.

I figur 5 redovisas de individuella partikelmätningarna från samtliga referenspunkter för de fyra bränslena.



Figur 5. Uppmätta partikelemissioner från referenspunkter för samtliga fyra bränslen

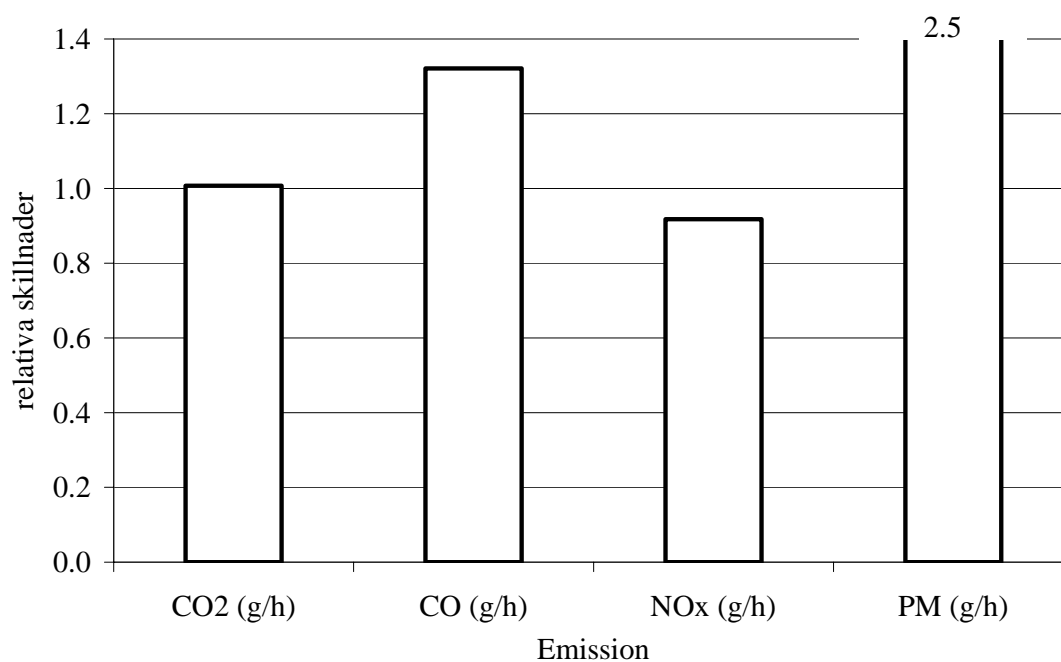
Samma trend som visades i figur 4 syns i figur 5, dessutom visar resultaten i figur 5 att förhållandena var relativt stabila inom de tre första bränslena. Däremot var variationerna för Etamix D3 bränslet mycket stora, en fördubbling av uppmätta partikelemissioner från lägsta till högsta nivå. Referenspunktsmätningarna av NO_x resulterade enbart i mindre variationer inom varje bränsle, mindre än 2% vilket visas i figur 6. Även skillnaderna mellan de olika bränslena är relativt små, mindre än 10%, dock är trenden tydlig även i detta fall, nivåerna sjunker från första till sista bränsle.



Figur 6. Medelvärde samt 95% konfidensintervall över NO_x från referenspunkter

Verifiering av resultat

I figur 7 redovisas resultatet av de verifieringsmätningar som genomfördes efter avslutad projektetapp, mätning 2, för MK1 bränslet. Data är normaliserade till de nivåer som uppmättes under ordinarie mätning, mätning 2.



Figur 7. Relativa skillnader mellan ordinarie mätning och verifieringsmätning för referensbränslet

Resultaten i figur 7 visar att nivåerna av både CO och PM har ökat medan utsläppen av NO_x har minskat. Samtidigt har utsläppen av CO₂ och följaktligen även bränsleförbrukningen endast ökat marginellt. Störst var skillnaden för partiklar som hade ökat med 150%.

Försöken med nya spridare visade att nivåerna av CO sjönk relativt kraftigt med nya spridare jämfört med de nivåer som uppmättes under mätning 2 vilket visas i figur 8.

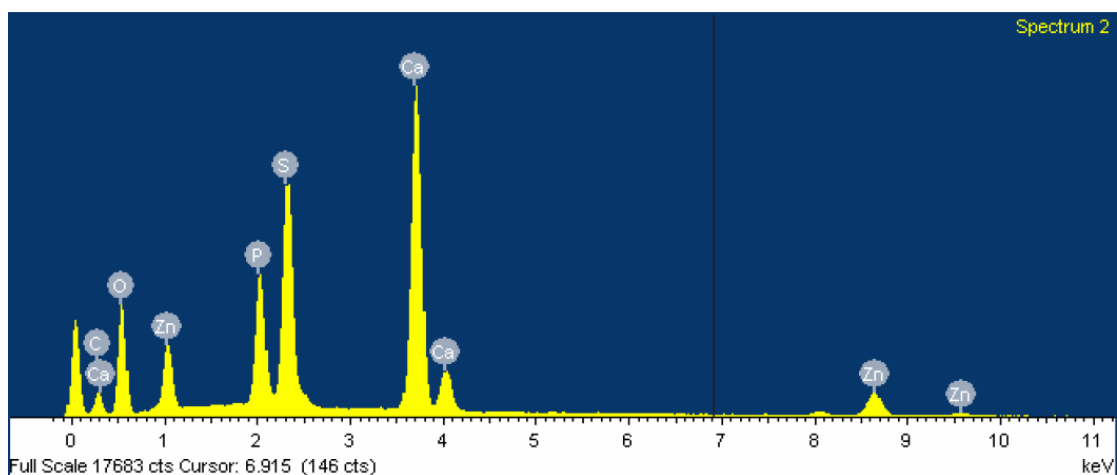
Analys av injektorer

Figur 9 visar hur injektorerna såg ut efter att mätserie 2 hade genomförts för samtliga fyra bränslen. Samtliga injektorer hade betydande mängder beläggningar, framförallt runt munstycket. Dessutom var tre av injektorerna kraftigt nedsmutsade.



Figur 9. Injektorer efter mätserie 2

Analys med svepelektronmikroskop (SEM) visade att beläggningarna bestod av stora mängder kol och syre samt kalcium. Dessutom visade det sig att det fanns olika typer av sot i beläggningarna, vissa sotpartiklar var av ljusare färg än de övriga. Analysen av de ljusare partiklarna påvisade höga halter av kalcium, zink och fosfor vilket visas i figur 10.



Figur 10. SEM-analys av beläggning på injektorer

Diskussion

Trenderna i resultaten från mätserie 2 indikerar samtliga på att en försämrad förbränning har skett från den tidpunkt då mätserie 2 började tills verifieringsmätningarna med gamla spridare genomfördes, d.v.s. emissioner av oförbränt och delvis förbränt bränsle ökade medan utsläppen av NO_x minskade. Vid den okulära besiktningen av injektorerna framkom det att dessa var belagda med kraftiga beläggningar vilket påverkar kvaliteten på bränsleinjektionerna d.v.s. spridningsbilden på insprutningsduschen.

Den okulära besiktningen av injektorerna visade även förekomst av beläggningar på samtliga sex injektorer, vilket indikerar att ett eller flera av de testade bränslena var orsaken. Vid eventuellt motorproblem t.ex. beroende av en defekt kolring, skulle endast en injektor påverkats. En annan orsak kan vara kontaminering av bränslet med motorolja via insprutningspumpen, en konventionell radpump.

Analysen av beläggningar från injektorerna fann stora mängder kol och syre, d.v.s. sotbeläggningar som kan härröra från både bränsle och motorolja. Analysen visade även att beläggningarna inte var homogena utan att det förekom ljusare och mörkare partier. De ljusare partierna visade sig bestå av höga halter kalcium, zink, svavel och fosfor, ämnen som är vanligt förekommande i olika additiv till motorolja.

Liknande problem med beläggningar på injektorerna och kraftigt ökade utsläpp av framförallt partiklar har nyligen dokumenterats i Tyskland. Richter et al. (2005) studerade uppkomst och orsak för beläggningar på injektorer vid användandet av konventionell diesel med varierande halt svavel samt detergent. Orsaken till Richters studie var att man upptäckt igensotade partikelfilter och fordon med synlig svartrök inom en bussflotta med MAN-motorer som använde svavelfritt bränsle.

Vid motortester i laboratorier visade Richter et al. (2005) på en kraftigt ökad mängd partiklar efter redan 100 timmars motorbelastning vid användandet av svavelfritt bränsle utan detergent. Samma test genomfördes med ett dieselbränsle av EN 590 kvalitet, 350 ppm svavel, utan tillsats av detergent. Efter 100 timmars belastning hade partikelmängderna enbart ökat med 4% jämfört med över 100% för det svavelfria bränslet. Tillsats av detergent i svavelfria bränslen reducerade ökningen av partiklar kraftigt, ner till mellan 5 och 15% ökning beroende på använd detergent.

För att ytterligare studera orsaken till de ökade partikelmängderna genomförde Richter et al. (2005) ett antal experiment med en speciell insprutningspump som enbart smörjdes via bränslet. Genom denna konstruktion kunde inte smörjoljan kontaminera bränslet. Resultaten visade på en ökning av partikelutsläppen med endast 11% på 100 timmars belastning, en betydande minskning från de 107% som erhöles med en konventionellt smord insprutningspump. Vidare tyder detta resultat på att även rena svavelfria bränslen utan inblandning av motorolja ger upphov till beläggningar på injektorerna.

Även i Sverige har problem med beläggningar i bränslesystemet uppdagats. Från en mindre direktinsprutad dieselmotor som används i minigrävare har ökad lukt från avgaserna pga. beläggningar på injektorerna dokumenterats. En viktig upptäckt var att motorn levererades till flertalet olika länder, men problemet uppkom endast i Sverige, det enda land som använde svavelfritt bränsle utan rengörande tillsatser. Orsaken var

att motortypen hade relativt stor överföring av motorolja till bränsle via insprutningspumpen.

Även de svenska bränsleleverantörerna har upptäckt att detta kan vara ett problem. Bland annat har Sveriges största oljebolag, Preem, lanserat en ny typ av bränsle under sommaren 2006. Bränslet innehåller aktivt rengörande tillsatser som skall motverka uppkomsten av beläggningar. Preem visar på en kraftigt minskad flödesbegränsning beroende på beläggningar på injektorerna vid användandet av bränsle med detergenter jämfört med konventionellt bränsle.

Resultaten från detta EMFO-projekt samt ovan beskrivna projekt tyder på att det kan förekomma en stor mängd fordon i Sverige som har kraftigt förhöjda utsläpp av framförallt partiklar på grund av beläggningar på injektorerna. Resultaten visar även på att motorns och fordonets prestanda och bränsleförbrukning endast påverkas marginellt vilket leder till att detta är ett problem som inte upptäcks av entreprenörer och andra användare av maskiner och fordon. Endast i de fall då det gått så långt att tydlig svartrök förekommer eller igensatta partikelfilter betraktas det som ett problem av användare trots att det är ett samhällsproblem långt innan dess.

Referenser

Richter, K., W. Gotre, R. Barbour, W. Kuddlich, S. Knittel (2005). Fuel Detergent Benefits in Modern Heavy Duty Diesel Vehicle Operating on S-Free Diesel. 5th International Colloquium Fuels, Technische Akademie Esslingen, Proceedings 2005, W. J. Bartz, (Hrsg.), S.113-120, 2005