



Kravene til emissionen af SO_2 og NO_x fra skibe skærpes i de kommende år. Fremtidige krav forventes også at regulere partikelemissionen fra skibsmotorer.

Karakterisering af partikler fra marine dieselmotorer

Kravene til emissionen af SO_2 og NO_x fra skibe skærpes i de kommende år. Fremtidige krav forventes også at regulere partikelemissionen fra skibsmotorer. Det arbejder motorproducenterne allerede nu på at imødekomme.

Fuglsang, K.¹, Rosenørn, T.¹, Lieke, K.², King, S.M.^{2,3}, Køcks, M.⁴, Dirscherl, K.⁵, Markussen J.B.¹, Hemmersam, A.⁴, Poulsen, M.⁴, Bilde, M.², Pedersen, J.B.⁶ og Larsson, D.⁶

¹ FORCE Technology

² Københavns Universitet, Kemisk Institut

³ Nu: Haldor Topsøe A/S

⁴ Teknologisk Institut

⁵ Dansk Fundamental Metrologi

⁶ MAN Diesel & Turbo SE

Der er i disse år stor fokus på at reducere indholdet af små, sundhedsskadelige partikler i udeluften. I takt med at den fælleseuropæiske regulering har haft succes med at reducere udledningen af disse skadelige partikler fra landbaserede køretøjer, udgør bidraget af partikler fra skibe en stigende andel af indholdet af små partikler ($\text{PM}_{2.5}$) i udeluften i Danmark. Regulering af luftemissioner fra skibe er indført, men vil i de

kommande år indebære store reduktioner for stofferne SO_2 og NO_x . Fra 2015 skal udslippet af SO_2 fra skibe i SECA (kystnære) områder reduceres fra 1% til 0,1%, og fra 2016 reduceres emissioner af NO_x fra nye skibe med 80% i forhold til før 2011-niveau.

Det forventes, at der inden for en kort årrække ligeledes vil blive indført krav til reduktion af partikelemissionen fra skibe. Motorproducenterne undersøger derfor allerede nu de muligheder, der er for at reducere partikelemissionen, så fremtidige skibsmotorer kan opfylde kravene til NO_x -reduktion.

MAN Diesel & Turbo udvikler bl.a. totakts-skibsmotorer og har på Teglholmsgade i København en testmotor opstillet, til brug for forsøg med motorstyring og test af nye motorkomponenter. I perioden 2010-2012 har MAN Diesel & Turbo indgået et samarbejde med tre danske GTS-institutter samt Københavns Universitet (KU) i innovationskonsortiet NaKIM ("Nano- og mikropartikler – karakterisering, innovative anvendelser og miljørigtig teknologi") med det formål at karakterisere parti-

kelemissionen fra MAN's nye to-taktsmotorer. NaKIM (www.nakim.dk) er støttet af Forsknings og Innovationsstyrelsen, Rådet for Teknologi og Innovation. Det har desuden været væsentligt i projektet at vurdere de metoder, der bedst kan karakterisere størrelse, antal og sammensætning af partikler fra marine dieselmotorer. FORCE Technology, Teknologisk Institut, Dansk Fundamental Metrologi og Københavns Universitet har bidraget til projektet med en lang række karakteriseringsmetoder, som er blevet sammenlignet og vurderet.

En af de rensningsteknikker, som med fordel kan anvendes til reduktion af såvel SO_2 som partikler, er skrubberteknikken. I en skrubber bliver røggassen "vasket", og afhængig af formålet med skrubberen kan man "vaske" røggassen med havvand eller ferskvand, evt. tilsat et pH-regulerende stof. Skrubberteknikken anvendes også af MAN Diesel & Turbo i forbindelse med

NO_x -reduktion med den såkaldte EGR-teknik (Exhaust Gas Recirculation). EGR bruges til at nedbringe forbrændingstemperaturen og derved NO_x -emissionen. EGR-skrubberens formål er at rense den recirkulerede røggas for SO_2 og SO_3 samt fjerne store partikler, så man minimerer risikoen for korrosion og øget slitage i brændkammeret. Der er i denne undersøgelse udført målinger før og efter en EGR-skrubber.

MAN Diesel & Turbos testmotor

Samtlige målinger er udført på en MAN Diesel & Turbo totakts-testmotor, som er placeret i MAN Diesel & Turbos test-facilitet på Teglholmsgade i København. Testmotorens specifikation er vist i tabel 1.

Ved alle de her beskrevne test er der enten anvendt gasolie (GO) med et indhold på 0,002% svovl, eller heavy fuel olie (HFO), med et indhold på 0,5% - 0,75% svovl. HFO er det hyppigst anvendte brændstof til marine totaktsmotorer. HFO kan have et svovlindhold helt op til 3,5%.

Ved de gennemførte test blev testmotoren kørt under to principielt forskellige betingelser: Normal motordrift og højtryks-EGR (Exhaust Gas Recirculation) drift. I forbindelse med målingerne under EGR-drift skal det understreges, at den del af røggassen der renses i EGR-skrubberen sendes tilbage ind i motoren for at reducere NO_x , og derfor er det ikke muligt ud fra her rapporterede resultater at vurdere, om EGR-skrubberen vil ændre den mængde partikler, der udledes til atmosfæren fra motoren.

MAN B&W 4T50ME-X	
Effekt (max)	7080 kW
MEP (Mean Effective Pressure)	20 bar
Omdrejningshastighed	123 rpm
Cylindre:	
Antal	4
Diameter	500 mm
Slaglængde	2200 mm

Tabel 1. Testmotorens specifikationer.

Dräger

Sikkert gennem labyrinten af farlige stoffer



Let antændelige stoffer

Arbejde med farlige stoffer kræver den største opmærksomhed. Dette skilt gør opmærksom på let antændelige stoffer. Dräger tilbyder løsninger indenfor bærbar gasdetektion, stationær gasdetektion samt flugtapparater.

Benyt dig af vores mangeårige erfaring indenfor området sikkerhed på arbejdspladsen!

www.draeger.dk

Dräger. Teknik for Livet.



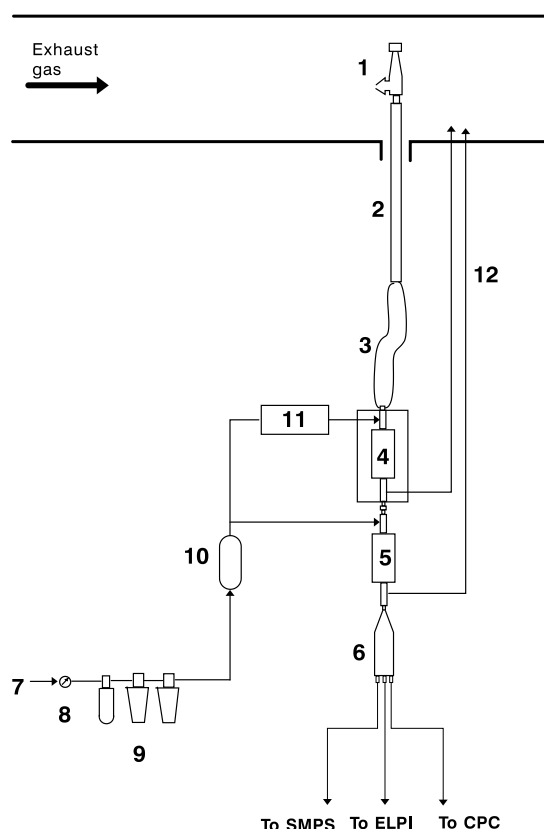


Metode	Anvendelsesområde	Bemærkning
ELPI (Electrical Low Pressure Impactor)	Partikler i området 7 nm – 10.000 nm	Kan måle partikler i aerosoler ved omgivende temperatur, og til måling i røggas kræves derfor udstyr til konditionering og fortynding af prøven. Partikler kan opsamles på folier i et antal størrelsesfraktioner og efterfølgende karakteriseres i laboratoriet.
SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer)	Partikler i området 3 nm – 1000 nm	Kan måle størrelsesfordeling af partikler i aerosoler ved omgivende temperatur. Til måling i røggas kræves derfor fortyndings- og konditioneringsudstyr.

Tabel 2. Metoder til karakterisering af partikelstørrelse og antal i røggassen fra MAN Diesel & Turbo's testmotor.

Metoder

Som led i NaKIM-projektet anvendte vi en række forskellige metoder til partikelkarakterisering i forbindelse med målinger på MAN Diesel & Turbo's testmotor. De væsentligste metoder for denne artikel er kort beskrevet i tabel 2. Det målte antal partikler betegnes ofte som PN (Particle Number), og PN er en vigtig parameter til beskrivelse af mængden af ultrafine partikler, dvs. partikler med en diameter, der er mindre end 100 nm.

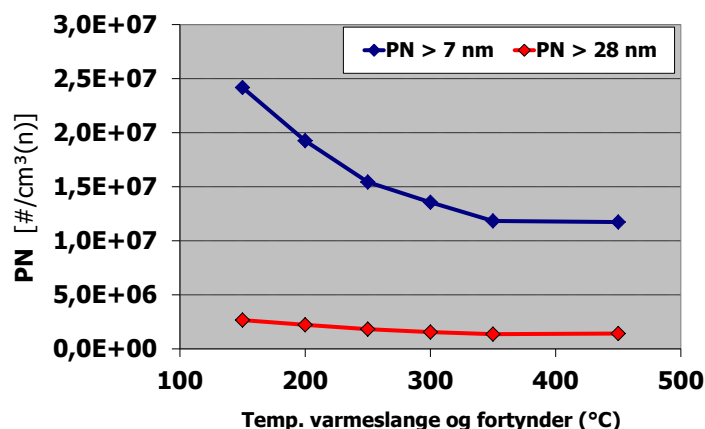


Figur 2. Måleopstilling inkl. fortyndingsudstyr anvendt til måling efter turbolader.

1. Cyklon, cut size (D_{50}) = 10 μm
2. Probe (180°C)
3. Opvarmet slange af rustfrit stål (maks. 450°C)
4. Opvarmet ejektorfortynder mrk. Dekati D1000, T_{Dil1} (maks. 450°C). Dilution ratio D1 = 10 (temperaturafhængig)
5. Unheated diluter Dekati D1000 ejector type, T_{Dil2} , Dilution ratio D2 = 10.
6. Manifold af stål
7. Trykluft
8. Reduktionsventil
9. Filtrering til fjernelse af vand, olietåge og partikler i trykluften
10. HEPA-filter
11. Opvarmning af trykluft Dil1 (justerbar op til 450°C)
12. Overskudsluft fra diluter 1 og 2

Temperaturen i prøvetagningssystemet er afgørende for resultatet

Som det fremgår af tabel 2, er det nødvendigt at måle røggassens partikler ved stuetemperatur. Dette er i projektet gjort ved at fortynde røggassen i to trin som vist i figur 2. Indtil det første fortyndingstrin holdes røggassen opvarmet, således at vand eller semi-volatile forbindelser ikke kondenserer. Der tilsættes i det første fortyndingstrin opvarmet, ren og tør trykluft svarende til en fortynding på ca. 10 gange. Herefter sker der i trin 2, en uopvarmet fortynding med samme fortyndingsforhold. Den totale fortyndingsfaktor afhænger af tryk og temperaturer, men er kendt og konstant for de valgte værdier. Fortyndingssystemet er opbygget efter samme princip, som det der benyttes i PMP (Particle Measurement Project) programmet til måling af partikler i røggas fra landbaserede dieselmotorer [1]. I PMP-programmet har man valgt at fordampe alle oliedråber og semi-volatile forbindelser for at opnå en mere reproducerbar måling af partikelantallet. For at opnå dette opvarmer man i prøveudtagsprobe og -slinger, samt i det første fortyndingstrin, røggassen til 350°C.



Figur 3. Antallet af partikler fra MAN Diesel & Turbo's testmotor, målt efter turbolader vha. ELPI og under stigende temperatur i opsamlings- og fortyndingssystemet.

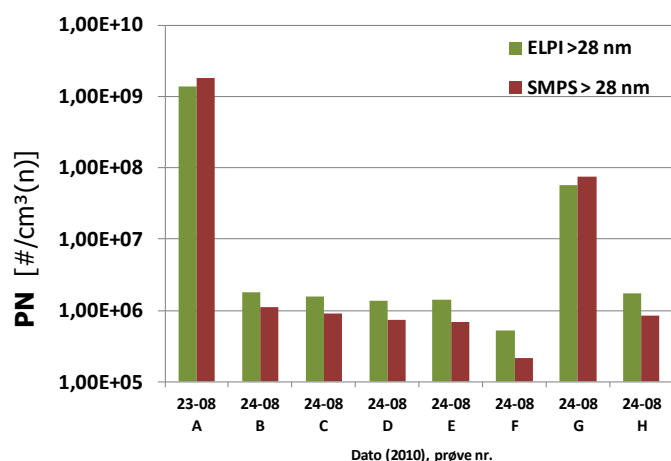
For at teste, hvordan temperaturen i opsamlingssystemet i figur 2 påvirker måleresultaterne, blev røggastemperaturen i fortyndingssystemet varieret fra 150°C til 450°C under måling på partikler fra skibsmotoren.

Som det fremgår af figur 3, reduceres antallet af partikler væsentligt, når temperaturen i prøvetagningssystemet øges fra 150°C til 350°C. Dette skyldes, at den øgede temperatur i prøvetagningssystemet i stigende grad fordamper oliepartikler og andre semi-volatile forbindelser, som findes i den kondenserede fase i røggassen. Resultaterne støtter den anbefaling, der er givet i PMP-protokollen for landbaserede køretøjer [1]. Det

konkluderes, at denne temperaturindstilling har meget stor betydning for målingerne på skibsmotoren. Da det må forventes, at der i udstødningen fra en forbrænding af heavy fuel oil kan opstå højere indhold af semi-volatile partikler (såsom forbindelser fra smøreolie) end i udstødningen fra en forbrænding af dieselolie, skal der tages nøje hensyn til temperaturforholdene under prøvetagning og fortynding.

Sammenligning af målemetoder

Partikelantal og -størrelse blev målt vha. både ELPI- og SMPS-instrumenterne. De to instrumenter anvender forskellige ækvivalensdiametre, idet ELPI anvender aerodynamisk diameter, og SMPS anvender elektrisk mobilitet. En sammenligning af de to målemetoder for partikler > 28 nm er vist i figur 4.

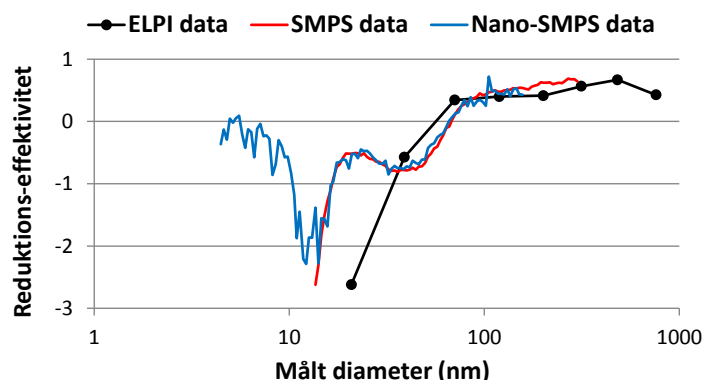


Figur 4. Resultater af parallelmåling af partikelantal (PN > 28 nm) vha. henholdsvis ELPI og SMPS.

EGR-skrubbertest: Der både reduceres og dannes partikler

Som nævnt udvikler MAN Diesel & Turbo en motor, der vha. EGR (Exhaust Gas Recirculation) reducerer NO_x-emissionen fra motoren. På MAN Diesel & Turbo's teststand Teglhølm er der udført en række test før og efter en EGR-skrubber-testopstilling. Et eksempel på resultatet af en test, hvor EGR benyttes ses i figur 5. Her vises reduktionseffektiviteten i skrubberen som funktion af partikelstørrelsen. Reduktionseffektiviteten er et udtryk for fraktionen af partikler af en given størrelse, der fjernes i skrubberen. En negativ reduktionseffektivitet betyder, at der er flere partikler af en given størrelse efter skrubberen end før skrubberen, altså at skrubberen danner partikler af denne størrelse ved brug. Figur 5 viser en typisk test af EGR-skrubbersystemet, hvor der observeredes en reduktion i antallet af partikler større end 100 nm, og en samtidig produktion af partikler med en diameter på mindre end 50-100 nm. En mulig grund, til at skrubbersystemet på samme tid fjernede større partikler og dannede små partikler, kan findes i måden systemet opererede på og i måden det var opbygget. EGR-skrubberen opererede ved relativt højt tryk (2-3 bar) og temperatur (80°C til 110°C), og desuden blev EGR-skrubbersens vaskevand recirkuleret, hvilket vil medføre en opkoncentrering af bl.a. natriumsulfat i skrubbevandet, som dannes ved, at der løbende tilsættes NaOH for at fjerne SO_x fra røggassen. Disse salte kan overføres til røggassen via dråber, som dannes i skrubberen og efterlader meget små saltpartikler ved fordampning i måleudstyrets fortyndingssystem. Det er dog væsentligt, at EGR-skrubberen samtidig reducerer antallet af partikler, som er > 100 nm. Denne fjernelse af store partikler over skrubberen kan omregnes til en massebaseret reduktion på 40%-50% ud fra de målte partikelantal med ELPI og SMPS. Dette er lavere end

den massereduktion på 70%-80%, der blev målt ved brug af gravimetrisk filteropsamling ifølge en metode, der er tilpasset standarden ISO 8178. En del af forskellen skyldes sandsynligvis, at ELPI og SMPS er antalsbaserede målinger, som tæller partikler med størrelser fra 3 nm op til 10 µm, hvorimod ISO 8178 er en gravimetrisk metode, der måler massen uden en øvre grænse for partikelstørrelse.



Figur 5. Sammenligning af resultater fra målinger med ELPI og SMPS under test af EGR-skrubber. En reduktionseffektivitet < 0 betyder, at skrubberen danner partikler ved den givne partikelstørrelse.

Resultaterne i såvel figur 4 som figur 5 illustrerer en god overensstemmelse mellem resultaterne fra SMPS- og ELPI-instrumenterne. Figur 5 viser, at der for partikler < 28 nm dog er en vis afvigelse mellem de to målemetoder. Dette forklares ved, at de to instrumenters forskellige ækvivalensdiametre, især for de mindste partikler, kan give forskellige resultater, specielt når der – som her – vil kunne forekomme forskellige partikeldensiteter før og efter skrubberen.

Konklusion

Det konkluderes, at de to målemetoder stemmer godt overens, når antallet og størrelsesfordeling for partikler > 28 nm måles. Desuden konkluderes det, at prøvetagningens temperatur er særdeles væsentlig for det opnåede resultat. Hvis man – som ved måling af partikelantallet fra landbaserede køretøjer – vil sikre, at man kun måler antallet af faste partikler i røggassen (solids) i udstødningen fra skibsmotorer, er det vigtigt at sikre en temperatur på mindst 350°C i prøvetagnings- og fortyndingssystemet.

Det er ved måling på EGR-skrubber vist, at der i røggassen, som føres tilbage til forbrændingskammeret, kan genereres ultrafine partikler i skrubbersystemet, samtidig med at der findes en betragtelig reduktion i partikelmassen. At der på samme tid kan genereres ultrafine partikler i røggassen og reduceres partikelmasse over skrubberen kan forklares ved, at partiklernes masse er helt domineret af partikler > 100 nm. Det skal bemærkes, at partikeldannelsen formodes at skyldes EGR-skrubbersens særlige driftsbetingelser (højt tryk og temperaturændring) i kombination med, at EGR-skrubbersens vaskevand recirkuleres og derfor opkoncentrerer salte såsom natriumsulfat.

E-mail

Karsten Fuglsang: kfu@force.dk

Referencer

1. Anderson, J. et al. (2010). Particle Measurement Programme (PMP). Heavy-duty Inter-laboratory Correlation Exercise (ILCE_HD) Final Report.