

Uwagi o pośrednich metodach pomiaru emisji cząstek stałych

Jerry MERKISZ, Ireneusz PIELECHA, Jacek PIELECHA

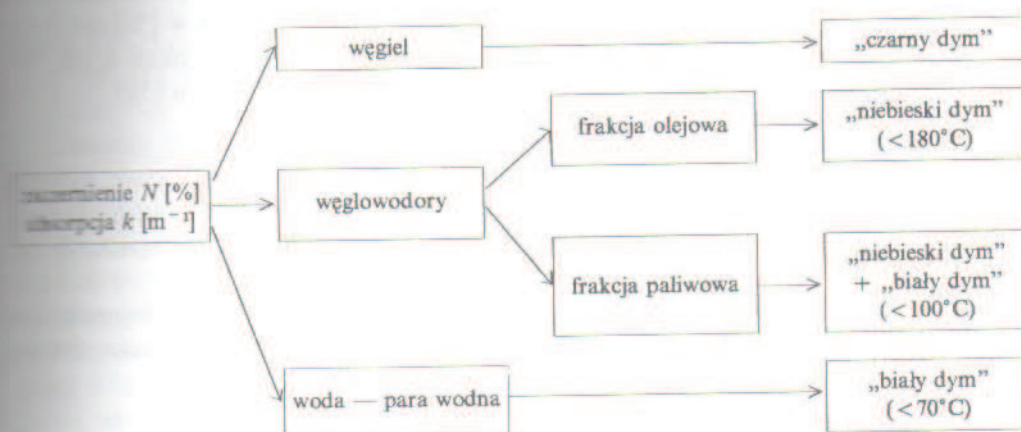
Instytut Silników Spalinowych i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Politechnika Poznańska

W pracy przedstawiono związki pomiędzy stopniem zaciemnienia spalin N , współczynnikiem absorpcji światła k , ilością części węglowej cząstek stałych PM_C oraz zadymieniem spalin określonym na podstawie skali Boscha. Badania przeprowadzone zostały na doładowanym silniku czopieniem samoczynnym stosowanym do napędu pojazdów dostawczych. Wyniki badań potwierdzają możliwość szacunkowego określenia emisji cząstek stałych poprzez pomiar zaciemnienia spalin.

1. Wprowadzenie

Z uwagi na fakt, że nie opracowano dostatecznie prostych, tanich i szybkich metod określających poziom emisji cząstek stałych, zastępczo lub uzupełniająco wykonuje się pomiar zadymienia spalin. Mają na to wpływ następujące czynniki [9]:

- historycznie pomiar zadymienia spalin obowiązywał przed wprowadzeniem pojęcia cząstek stałych,
- sadza jest zasadniczym elementem cząstek stałych (PM — *Particulate Matter*),
- pomiar zadymienia wykonuje się według normy ECE R24 oraz w teście swobodnego przyspieszania na biegu luzem (tzw. *free acceleration*).



Rys. 1. Rodzaje dymu i przyczyny jego powstawania [14]

Fig. 1. Kinds of smoke and reasons of its rising up [14]

Pomiary zadymienia D , pomimo że nie utożsamiają się z emisją cząstek stałych, a są jedynie wskaźnikiem zawartości w spalinach sadzy (rys. 1), znalazły zastosowanie ze względu na łatwość wykonania pomiarów i mniej skomplikowaną budowę samych przyrządów pomiarowych. Zasada działania dymomierzy oparta jest na metodach filtracyjnej lub optycznej (rys. 2).



Rys. 2. Metodyka pomiarów związków toksycznych silnika spalinowego [14]

Fig. 2. Measurements method of emission of IC engine [14]

Stopień zaczerzenia spalin N określa ilość światła pochłoniętego przez cząsteczki sadzy i inne zanieczyszczenia znajdujące się w spalinach, wyrażone w [%] (od 0 do 100) na skali przyrządu pomiarowego lub współczynnikiem ekstynkcji k [m^{-1}]¹. Zależność między tymi wielkościami wyrażona jest za pomocą wzoru [3]:

$$k = -\frac{1}{L} \ln \left(1 - \frac{N}{100} \right) \quad (1)$$

gdzie: L — określa długość komory przepływowej (mierzonego słupa spalin) w dymomierzu i podawane jest w [m].

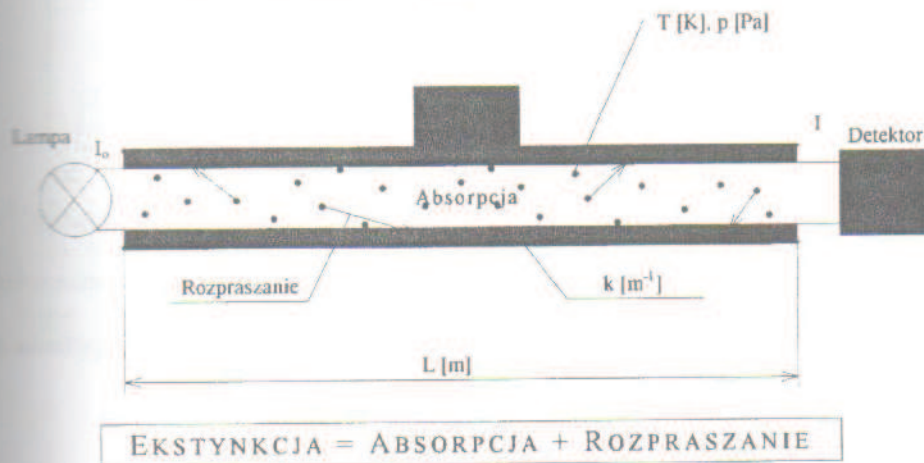
Według dyrektywy CEE 92/55 obowiązują następujące maksymalne dopuszczalne wartości współczynnika absorpcji spalin przy swobodnym przyspieszeniu silnika, nieruchomego pojazdu [2]:

¹ Często, ze względu na nieznaczny udział rozpraszania, współczynnik ekstynkcji k określa się mianem współczynnika absorpcji (rys. 3).

- dla silników wolnossących — $k = 2,5 \text{ m}^{-1}$,
- dla silników turbodoładowanych — $k = 3 \text{ m}^{-1}$.

Wartości te wyrażone w jednostkach tradycyjnego dymomierza Hartridge'a i Boscha wynoszą:

- $k = 2,5 \text{ m}^{-1}$, co odpowiada 66 jednostkom skali Hartridge'a i 4,75 jednostkom skali Boscha,
- $k = 3 \text{ m}^{-1}$, co odpowiada 72 [j.s.H.] i 5,1 [j.s.B.].



Rys. 3. Zasada pomiaru zaczernienia spalin N i współczynnika ekstynkcji k [14]

Fig. 3. Measurement of blackening of exhaust gases and extinction coefficient k [14]

Stopień zadymienia spalin jest związany z objętościowym natężeniem przepływu spalin (z wielkością silnika — jego pojemnością skokową) oraz prędkością obrotową:

$$\dot{Q} = \frac{V_{ss} \cdot n}{120} \quad (2)$$

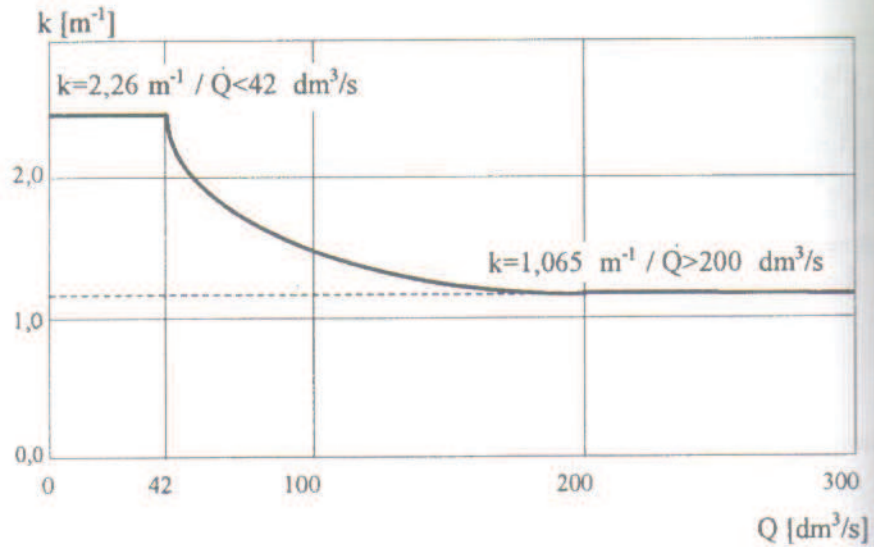
- gdzie: \dot{Q} — objętościowe natężenie przepływu spalin [dm^3/s],
 V_{ss} — pojemność skokowa silnika [dm^3],
 n — prędkość obrotowa [min^{-1}].

Oznacza to, że ze wzrostem pojemności silnika, maksymalnie dopuszczalny stopień zadymienia spalin musi maleć. W przepisach dotyczących emisji spalin pojazdy dzieli się na dwie kategorie:

- 1) samochody osobowe i lekkie dostawcze o masie poniżej 3,5 tony — określono, że dla tych pojazdów objętościowe natężenie przepływu nie przekracza $80 \text{ dm}^3/\text{s}$ (rys. 4),
- 2) pojazdy o masie powyżej 3,5 tony.

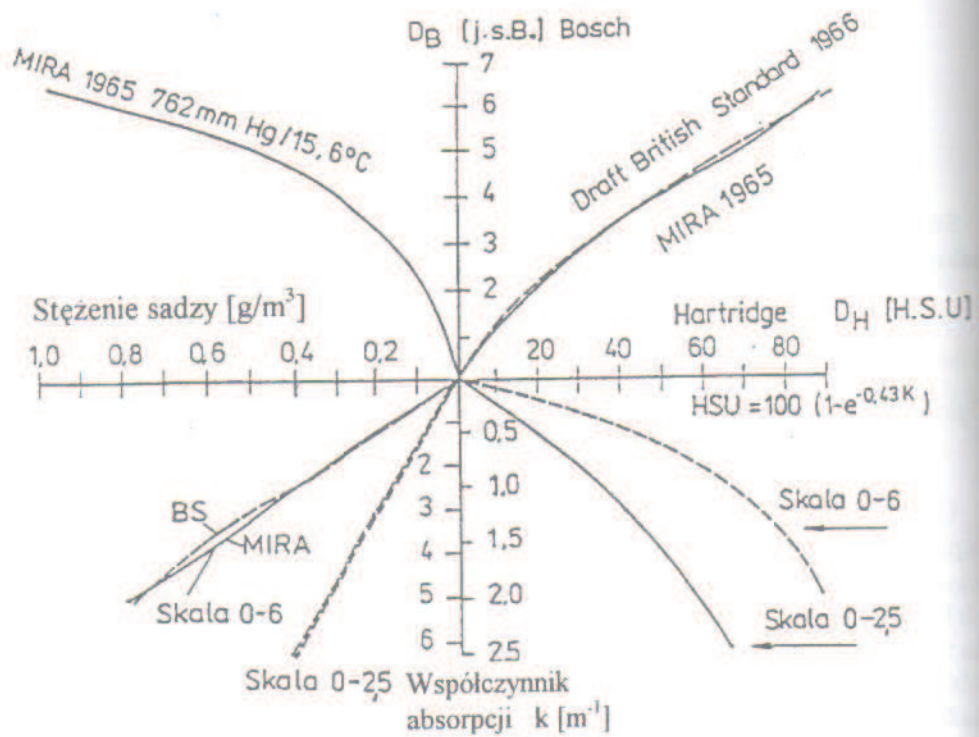
Pomiary stopnia zadymienia spalin przeprowadza się dla różnych warunków pracy silnika:

- ustalonych — w różnych punktach charakterystyki pełnej mocy i charakterystyk obciążeniowych silnika,



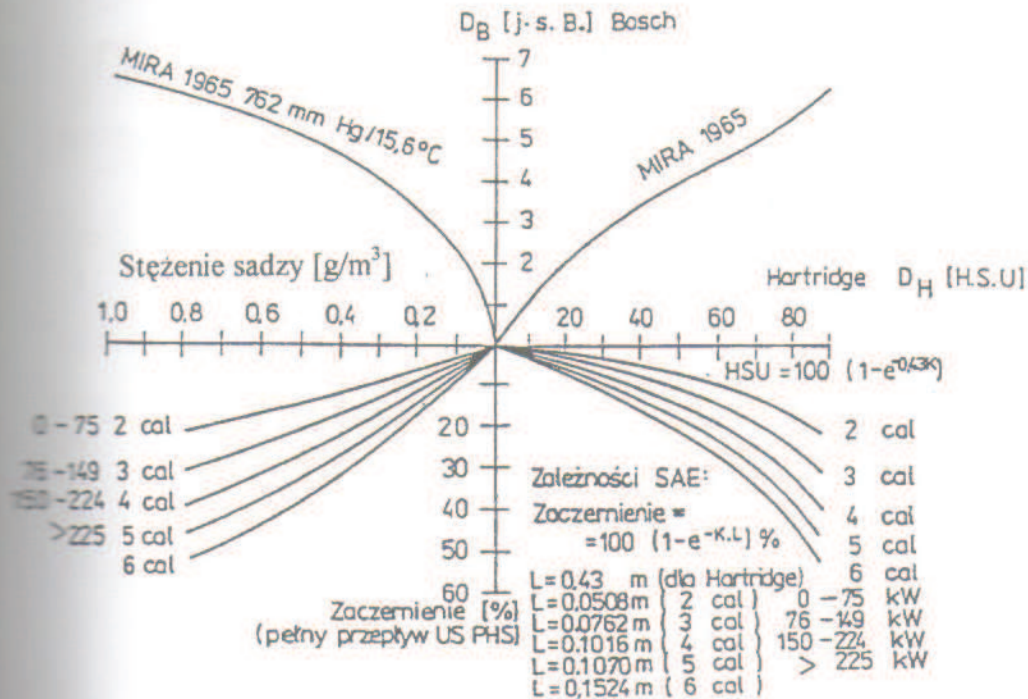
Rys. 4. Krzywa dymienia granicznego wg ECE R24 w układzie: współczynnik absorpcji światła k w funkcji objętościowego natężenia przepływu \dot{Q} [2]

Fig. 4. Limits of smoke emission according to ECE R24 in the plane of: absorption coefficient k + volumetric flow rate \dot{Q} [2]



Rys. 5. Zależność pomiędzy stężeniem sadzy i współczynnikiem absorpcji k a dymieniem według Boscha i Hartridge'a D_H [2]

Fig. 5. Dependence of soot concentration and absorption coefficient on Bosch index D_B and Hartridge index D_H [2]



Rys. 6. Zależność pomiędzy stężeniem sadzy a dymieniem określanym przez zaczerzenie (SAE) oraz według D_B i D_H [2]

Fig. 6. Dependence of soot concentration on smoke index according to SAE and D_B and D_H [2]

- podczas szybkiego zwiększania prędkości obrotowej nieobciążonego silnika (od prędkości biegu jałowego do prędkości maksymalnej),
- podczas szybkich zmian obciążenia silnika.

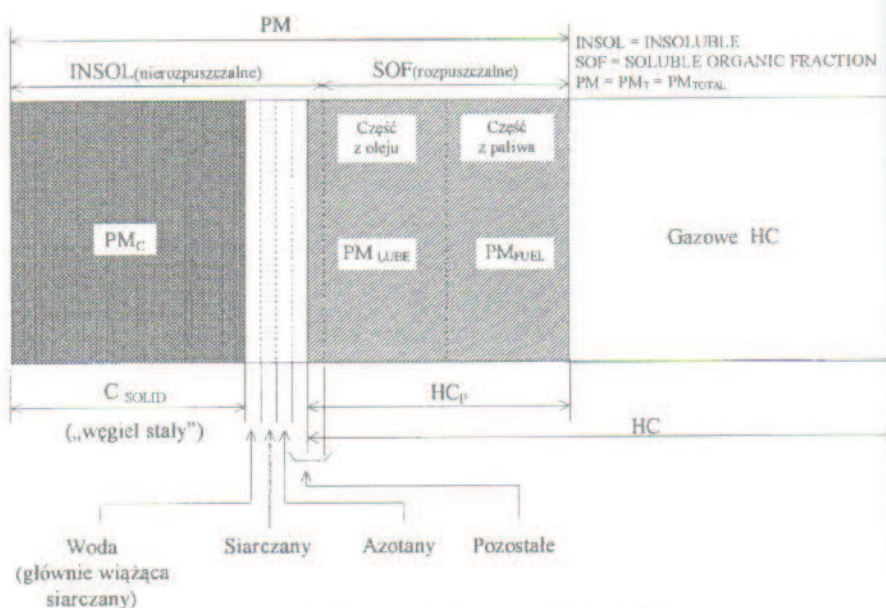
Zależności pomiędzy stężeniem sadzy w spalinach i współczynnikiem absorpcji k , a dymieniem określanym przez zaczerzenie N oraz według skali Boscha D_B i Hartridge'a D_H przedstawiono na rysunkach 5 i 6.

2. Urządzenia do pomiaru emisji cząstek stałych i zadymienia spalin

2.1. Dynamiczny pomiar emisji cząstek stałych

Urządzeniem umożliwiającym praktycznie ciągły pomiar głównych składników cząstek stałych (C i HC — rys. 7) jest dynamiczny analizator cząstek firmy AVL.

Zasada działania tego analizatora podobna jest do typowych analizatorów optycznych typu NDIR (*Non-Dispersive Infrared* — analizator niedispersyjny na podczerwień). Wykorzystują one jedną z metod spektrometrycznych, polegającą na pomiarze fotometrem całkowitej absorpcji promieniowania w wąskim paśmie długości fal, charakterystycznych dla danego związku. Metoda ta odznacza się dużą



Rys. 7. Schemat budowy cząstki stałej [7]

Fig. 7. Scheme of particulate matter [7]

czułością i szybkością uzyskiwania wyników. Promienie elektromagnetyczne (o długości fali poniżej 4 μm), przechodząc przez komorę pomiarową (rys. 3), w której znajdują się spaliny, są absorbowane przez cząstki stałe (rys. 8) [1].

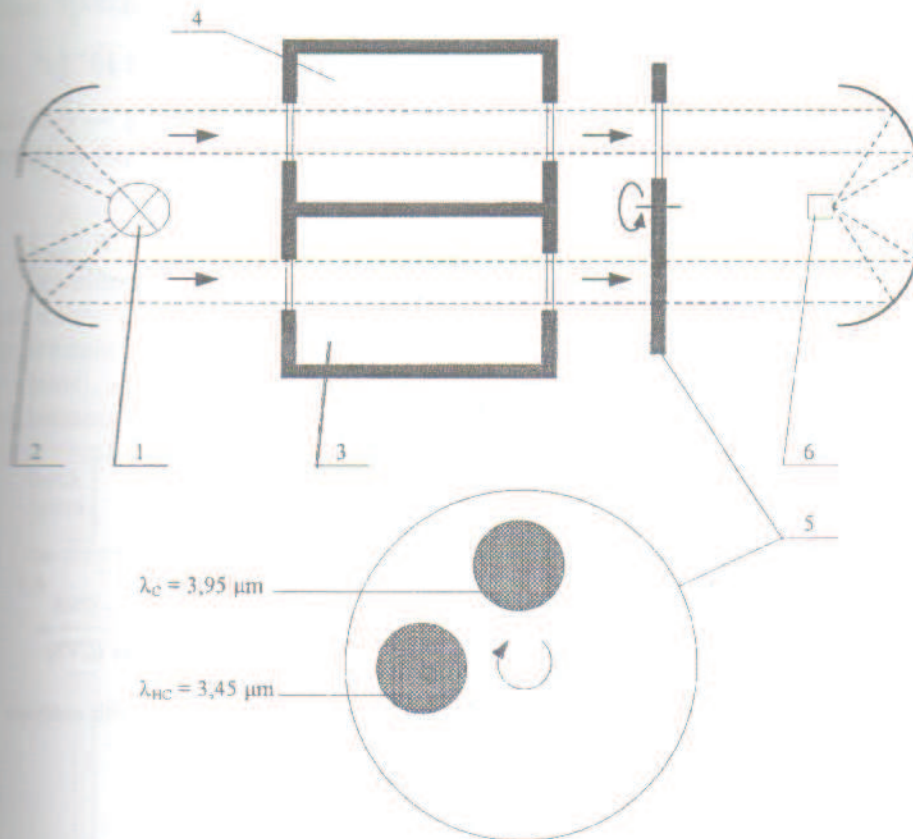
Filtry interferencyjne zamontowane są na obrotowej przysłonie świetlnej, dzięki czemu możliwy jest pomiar dwóch wielkości: zawartość czystego węgla C oraz węglowodorów HC praktycznie w tym samym czasie. Pomiar analizatorami serii AVL 480 jest realizowany co 0,05 sekundy, dodatkowo jednak wymiana gazu w komorze pomiarowej przedłuża pomiar do 0,3 sekundy.

Absorpcja promieniowania podczerwonego przez cząstki stałe jest zależna od długości komory pomiarowej. Zależność tę przedstawia równanie:

$$\frac{I_s}{I_p} = \exp(-R \cdot m_s \cdot L) \quad (3)$$

gdzie: I_p — natężenie światła dla gazu wzorcowego,
 I_s — natężenie światła dla spalin,
 R — współczynnik absorpcji na jednostkę masy [$\text{m}^{-1}\text{kg}^{-1}$],
 m_s — masa cząstek stałych w komorze pomiarowej [kg],
 L — długość komory pomiarowej [m].

W celu zwiększenia dokładności pomiaru długość komory pomiarowej powinna być możliwie duża. Za pomocą systemu zwierciadeł promienie podczerwone są kilkakrotnie kierowane do przestrzeni pomiarowej.



Wg. 8. Schemat działania dynamicznego analizatora PM AVL DPA 480: 1 — źródło promieniowania podczerwonego, 2 — zwierciadła, 3 — kuweta pomiarowa (spaliny), 4 — kuweta wzorcowa (powietrze), 5 — wirująca przesłona z filtrami interferencyjnymi, 6 — detektor [1]

Fig. 8. Scheme of operation of analyse PM AVL DPA 480 [1]

Węgiel C pochłania promieniowanie fali o długości $\lambda = 3,95 \mu\text{m}$, natomiast pomiar HC dokonywany jest przy zastosowaniu filtra interferencyjnego o $\lambda = 3,45 \mu\text{m}$.

Analizator DPA 480 mierzy zawartość węgla C [mg/m^3] i całkowitą emisję węglowodorów HC_{tot} [mg/m^3] z wykorzystaniem grzanej drogi gazowej. Pozostałe wielkości, czyli PM₃₀, PM₇₀, HC₃₀ i HC₇₀ (wartości liczbowe 30 i 70 oznaczają temperaturę odniesienia dla oznaczenia cząstek stałych PM i węglowodorów HC), obliczane są według wzorów [1]:

$$\text{PM}(t) = C + \text{HC}_{\text{kond}}(t) \quad (4)$$

$$\text{HC}(t) = \text{HC}_{\text{tot}} - \text{HC}_{\text{kond}}(t) \quad (5)$$

przy czym

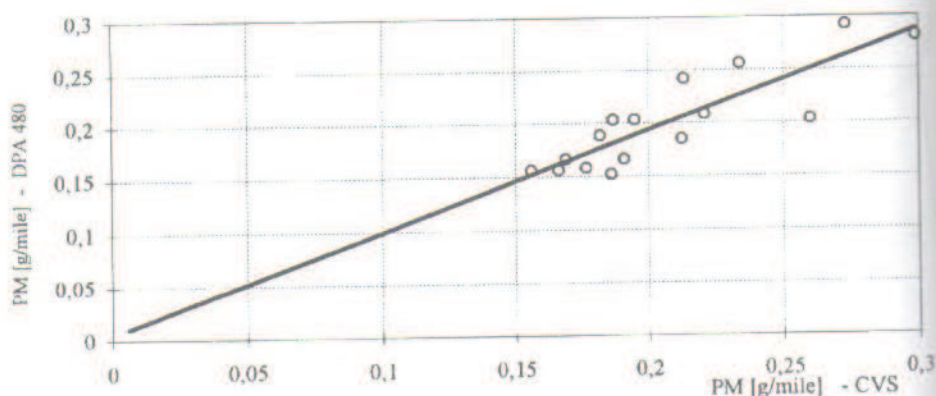
$$\text{HC}_{\text{kond}}(t) = f_{\text{kond}}(t) \cdot \text{HC}_{\text{tot}} \quad (6)$$

$$f_{\text{kond}}(t) = A(t) + B(t) \cdot \ln(\text{HC}_{\text{tot}}) \quad (7)$$

$$A(t) = 0,3247 - 2,45436 \cdot 10^{-3} \cdot t + 5,66882 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 - 1,02371 \cdot 10^{-6} \cdot t^3 \quad (8)$$

$$B(t) = 0,02364 + 5,3372 \cdot 10^{-3} \cdot t - 2,0284 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 + 2,6571 \cdot 10^{-5} \cdot t^3 - 1,0742 \cdot 10^{-8} \cdot t^4 \quad (9)$$

W porównaniu z metodą grawimetryczną pełnoprzeplywową (CVS — *Constant Volume Sampling* — układ rozrzedzający spaliny powietrzem o stałym natężeniu przepływu) otrzymuje się wyniki z korelacją 5 do 15% (rys. 9).



Rys. 9. Korelacja pomiędzy pomiarem cząstek stałych metodą pełnoprzeplywową (CVS) a AVL DPA 480 [1]

Fig. 9. Correlation between measurement of PM with use of CVS vs measurement with analyser AVL DPA 480 [1]

2.2. Dymomierz absorpcyjny AVL 438 Opacimeter

W Unii Europejskiej podstawowymi przepisami określającymi wartości zanieczyszczenia spalin jest norma ECE R24, która dotyczy dopuszczenia do eksploatacji silników ZS samochodów osobowych, ciężarowych oraz silników o innym zastosowaniu. Urządzeniem pomiarowym spełniającym wymogi wymienionej regulacji prawnej jest dymomierz absorpcyjny AVL 438 (rys. 10). AVL 438 realizuje próbkowanie na podstawie części strumienia spalin. Zasada działania polega na pobraniu spalin przez sondę z układu wylotowego pojazdu, następnie przesłaniu ich przewodem do ogrzanej komory pomiarowej, przez którą przechodzi strumień światła wytwarzany przez lampę, a odbierany przez detektor.

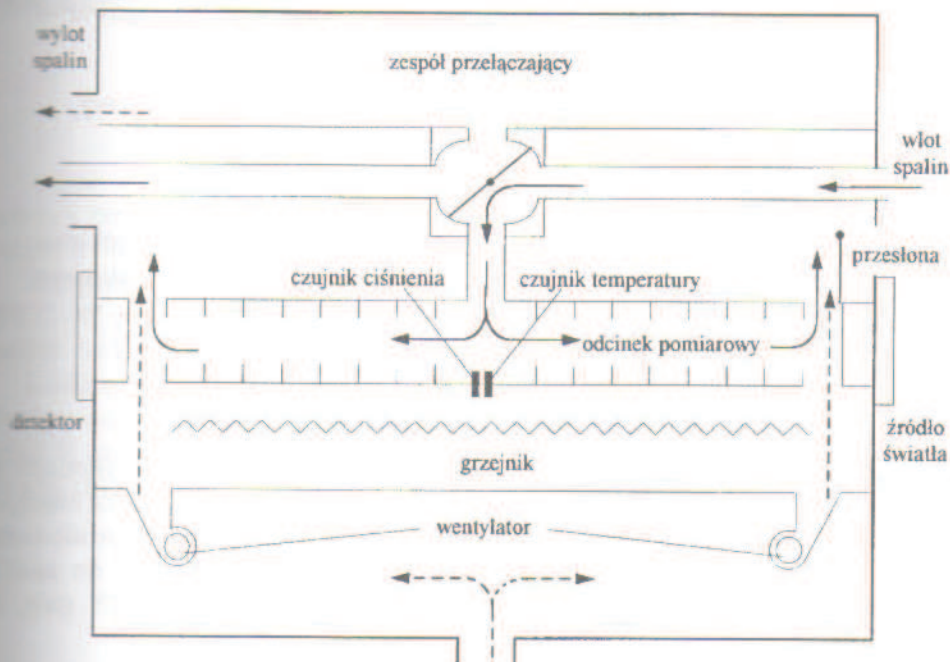
Zaczerzenie badanych spalin powoduje osłabienie natężenia wiązki promienia. Zadymienie spalin może być wyrażone przez ich zaczerzenie N [%] lub współczynnik absorpcji k [m^{-1}], a wartość tych wielkości wyznacza się ze wzorów [9]:

$$\frac{I}{I_0} = e^{-k \cdot L \cdot \frac{T_0 \cdot P}{T \cdot P_0}} = \left(1 - \frac{N}{100}\right) \quad (10)$$

$$N = 100 \cdot \left(1 - e^{-k \cdot L \cdot \frac{T_0 \cdot P}{T \cdot P_0}}\right) \quad (11)$$

- gdzie: I_0 — natężenie światła źródła światła,
 I — natężenie światła w detektorze,
 k — współczynnik absorpcji,
 L — długość pomiarowa [m],
 T_0 — temperatura odniesienia ($T_0 = 273$ K),
 T — temperatura otoczenia,
 p_0 — ciśnienie odniesienia ($p_0 = 1,013 \cdot 10^5$ Pa),
 p — ciśnienie otoczenia.

Zgodnie z wymaganiami dotyczącymi pomiarów zawartymi w normie ECE R24, dymomierz absorpcyjny AVL 438 jest wyposażony w grzaną komorę pomiarową. Ogrzewanie jej do temperatury równej 100°C uniemożliwia tworzenie się kondensatu po zimnej, wewnętrznej stronie komory, a także przeciwdziała zmianie składu spalin i ogranicza wahania ich gęstości.



Rys. 10. Dymomierz absorpcyjny AVL 438 — zasada działania [14]

Fig. 10. Scheme of operation of smokemeter AVL 438 [14]

Zwiększenie dokładności i stabilności pomiaru umożliwia system kondycjonowania temperaturowego, który umożliwia pobór próbki do temperatury 700°C . Gdy temperatura spalin wynosi poniżej 100°C , zostają one ogrzane. Kondycjonowanie temperaturowe pozwala na utrzymanie stałych warunków pomiaru w komorze pomiarowej (temperatura, wilgotność) niezależnie od stanu obciążenia badanego silnika i miejsca poboru próbki.

Dla zapewnienia prawidłowych pomiarów musi być przeprowadzona kompensacja zera, względnie kalibracja. W tym celu następuje symulacja zacinienia o warto-

ści 0% (czyste światło w komorze pomiarowej), zacinienie o wartości 100% (wyłączone źródło światła w komorze pomiarowej) oraz sprawdzenie liniowości przyrządu pomiarowego za pomocą automatycznie przestawianej przesłony znajdującej się w komorze pomiarowej. Analizator AVL 438 posiada również regulację stałego ciśnienia poboru próbek. Dzięki regulacji przy stałym ciśnieniu w komorze pomiarowej utrzymywane jest stałe natężenie przepływu spalin, tj. około 100 dm³/min. Sytuacja ta stwarza możliwość otrzymania podobnych warunków pomiaru dla kolejnych prób.

Przez zastosowanie odpowiedniej sondy pobierającej spaliny można uzyskać najmniejszą wartość natężenia przepływu równą 30 dm³/min przy obrotach biegu jałowego. Takie wykonanie regulacji stałociśnieniowej zapewnia niezmiennie wartość ciśnienia w układzie wylotowym.

Dymomierze absorpcyjne AVL 438 oferowane są na rynku w dwóch wersjach: jako urządzenie podstawowe oraz dymomierz z możliwością kondycjonowania próby spalin. AVL 438 w wersji podstawowej wyposażony jest w [14]:

- ogrzewaną komorę pomiarową,
- czujniki ciśnienia i temperatury umieszczone w komorze pomiarowej,
- osłonę powietrzną elementów optycznych,
- automatyczną kompensację i kalibrację,
- pobór próby na końcu układu wylotowego.

Dymomierz z możliwością kondycjonowania próby spalin zawiera dodatkowo:

- urządzenie pozwalające przeprowadzić kondycjonowanie temperaturowe,
- regulację przepływu,
- pobór próby bezpośrednio za kolaniem przewodu wylotowego.

2.3. Analizator spalin DIGAS 465

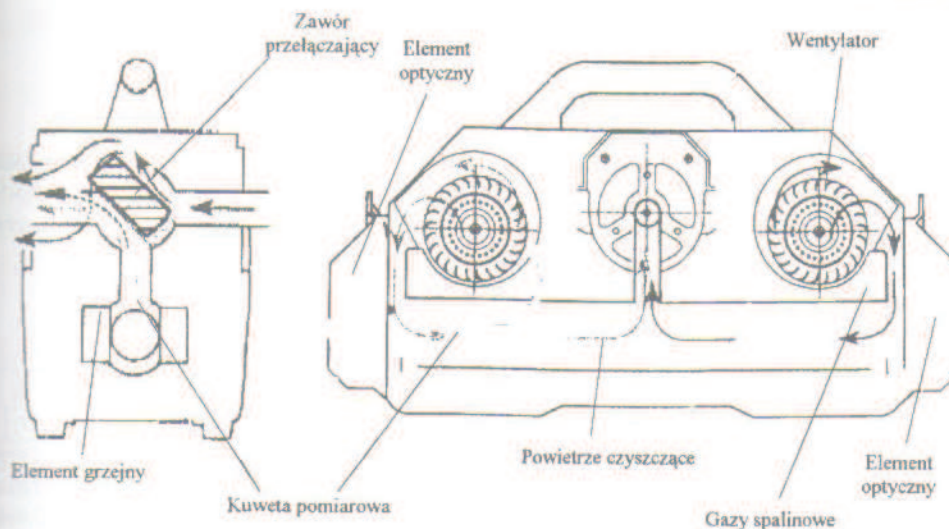
Jako pomiar wstępny dla wszystkich rodzajów silników ZS wykonuje się test tzw. *free acceleration*, czyli pomiar zacinienia spalin i współczynnika absorpcji na biegu luzem przy swobodnym przyspieszaniu. Pomiar ten może być realizowany za pomocą analizatora DiGas 465 (rys. 11). Urządzenie służy także do analizy składników spalin przede wszystkim silników ZI oraz wyjątkowo ZS (tab. 1) takich jak: HC, CO, CO₂, O₂.

T a b e l a 1. Parametry pomiarów realizowanych przez AVL DiGas 465 [14]

Measurement parameters of AVL DiGas 465 analyser [14]

Pomiar	Zakres	Dokładność
współczynnik absorpcji k	0...99,99 m ⁻¹	0,01 m ⁻¹
zacinienie N	0...100%	0,1%
liczba obrotów n	250...7200 min ⁻¹	1 min ⁻¹
temperatura oleju t	0...120°C	1°C

Zasada działania dymomierza DiGas 465 polega na odebraniu części spalin przez sondę z rury wylotowej pojazdu, następnie przesłaniu ich przewodem do grzanej



Rys. 11. Schemat analizatora DiGas 465 [14]

Fig. 11. Scheme of structure of analyser DiGas 465 [14]

komory pomiarowej, przez którą przechodzi strumień światła wytwarzany przez lampę, a odbierany przez detektor (pomiar zacinienia spalin; rys. 3).

Temperatura spalin (mierzona na wejściu do komory) nie powinna przekraczać 200°C . W przypadku przekroczenia tej temperatury, zawór przełączający zamyka wejście do komory pomiarowej.

Kalibrowanie systemu pomiarowego następuje automatycznie przed testem. Ogrzewana komora zapobiega kondensacji pary i zanieczyszczeniu systemu pomiarowego. Komora pomiarowa jest podgrzewana do temperatury $100 \pm 2^{\circ}\text{C}$, a długość jej wynosi $0,430 \pm 0,005$ m.

3. Badania własne

3.1. Cel i zakres badań

Głównym celem pracy było ustalenie możliwości stosowania zastępczych metod określania emisji cząstek stałych, poprzez ustalenie związków i zależności pomiędzy zacinieniem N , zadymieniem D [j.s.B.] i emisją cząstek stałych.

Badania zostały przeprowadzone na czterocylindrowym doładowanym silniku o zapłonie samoczynnym z pośrednim wtryskiem paliwa do komory wirowej (typu Ricardo).

W badaniach wykorzystano następującą aparaturę do określenia zależności pomiędzy emisją cząstek stałych a zadymieniem i zacinieniem spalin:

- 1) do pomiaru stopnia zacinienia spalin N i współczynnika absorpcji światła k :
 - AVL Opacimeter 438;
 - AVL DiGas 465;

- 2) do pomiaru zawartości cząstek stałych:
 - DPA 480 (*Dynamic Particular Analyser*);
- 3) do pomiaru stopnia zadymienia spalin D_B :
 - dymomierz filtracyjny Boscha.

Zależności pomiędzy poszczególnymi wielkościami (N , k , PM , PM_C oraz D_B) zostały opracowane na podstawie przeprowadzonych testów: test 13-fazowy — ECE R49 oraz symulacji testu jezdnego ECE R83 (tab. 2). Ponadto porównano zostały zależności uzyskane z obu typów przeprowadzonych testów.

T a b e l a 2. Przebieg testu symulującego test ECE R83
Simulation test of the ECE R83 test

Nr fazy [i]	n [obr/min]	p_s [bar]	M_0 [Nm]	u_i [-]
1	750	0,1	1,9	0,272
2	1250	3,0	57,5	0,014
3	1500	0,1	1,9	0,016
4	1750	3,0	57,5	0,023
5	2250	0,1	1,9	0,075
6	2250	2,0	38,4	0,157
7	2250	5,0	95,9	0,047
8	2750	5,0	95,9	0,053
9	3250	0,1	1,9	0,085
10	3250	3,0	57,5	0,064
11	3250	5,0	95,9	0,032
12	4000	7,0	134	0,025

Uwaga: obcy napęd silnika dla $u_i=0,137$

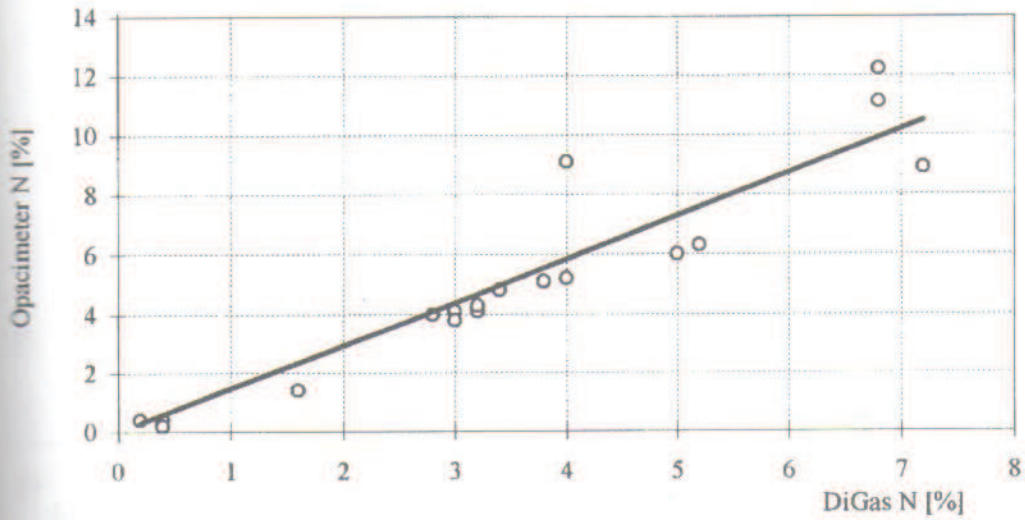
3.2. Wyniki badań

Przedstawiono zależność pomiędzy wynikami zaczernienia spalin N uzyskanymi za pomocą różnych urządzeń pomiarowych (rys. 12). Otrzymane wyniki charakteryzują się rozrzutem 10 do 25% (odchyłki wyników są większe dla większych wartości zaczernienia). Przyjmując, że Opacimeter 438 jest urządzeniem o wyższej klasie dokładności, DiGas podaje wartości zaniżone o wartość 30%.

Wyniki pomiarów N [%], k [m^{-1}], D_B [j.s.B.] oraz PM_C [mg/m^3] przedstawione zostały w postaci funkcji korelacyjnych dla przeprowadzonego testu 13-fazowego (rys. 13–17) i dla symulacji testu ECE R83 (rys. 18–20).

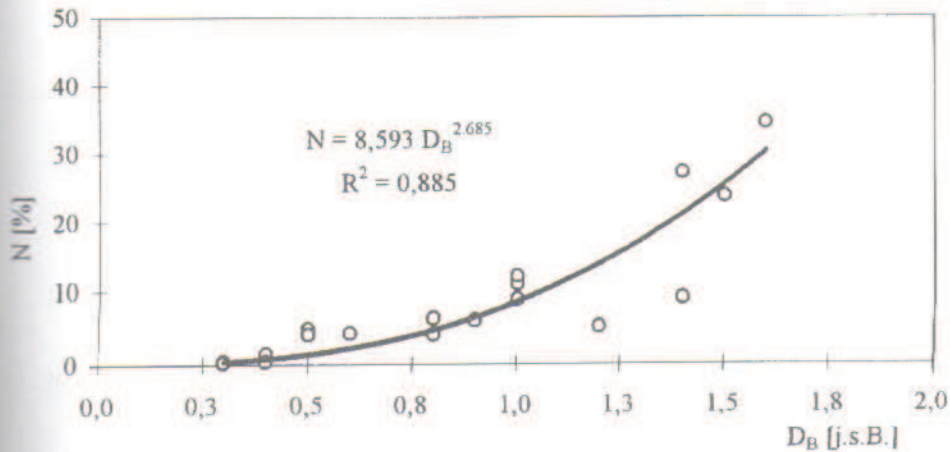
Wyniki korelacji połączonych testów: 13-fazowego ECE R49 oraz ECE R83 (zbiór wszystkich punktów pomiarowych uzyskanych w wyniku przeprowadzonych badań) przedstawiono na rysunkach 21–26.

Dla małych wartości zadymienia spalin, poniżej $D_B=1$ j.s.B. empiryczne zależności najdokładniej odzwierciedlają zależność pomiędzy zadymieniem a częścią węglową PM . Dla wartości zadymienia powyżej $D_B=1$ j.s.B. różnice pomiędzy określanymi wielkościami są znaczne. Wstępne określanie emisji cząstek stałych, poprzez pomiar zaczernienia spalin odnosi się do zakresu zaczernienia nie przekraczającego



Rys. 12. Korelacja pomiędzy pomiarem zacinienia spalin mierzonym za pomocą analizatorów Digas 465 oraz Opacimeter [14]

Fig. 12. Correlation between measurement of analyser DiGas 465 and Opacimeter [14]



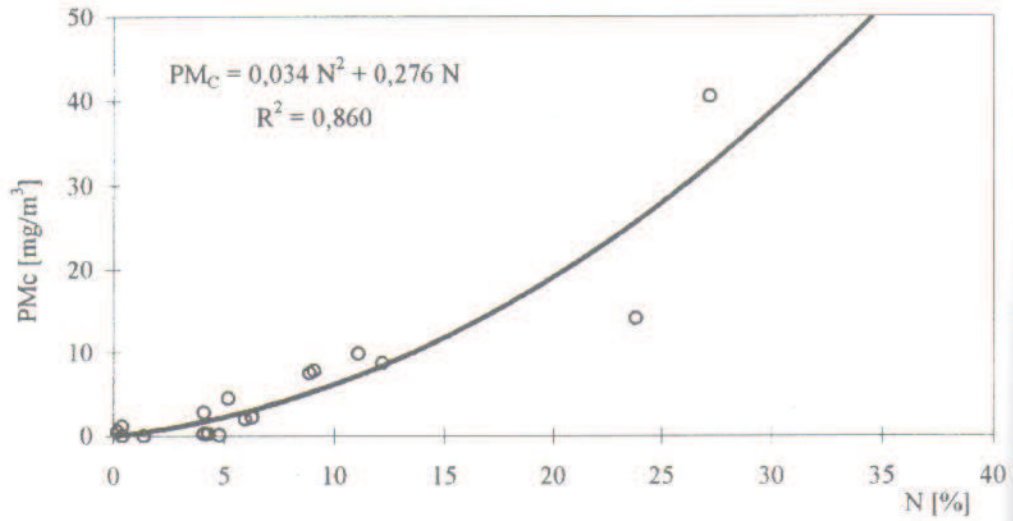
Rys. 13. Zależność stopnia zacinienia spalin N od stopnia zadymienia spalin D_B w teście 13-fazowym

Fig. 13. Dependence of N on D_B in 13-phase test

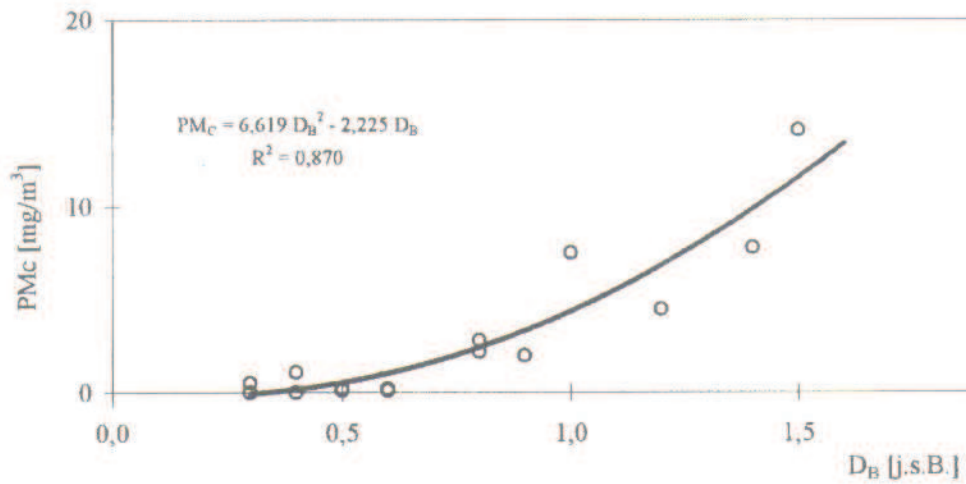
$N = 15\%$. Przy wyższych wartościach zacinienia obserwuje się znaczne różnice pomiędzy wyznaczoną zależnością.

Powyższe zależności empiryczne mają zastosowanie jedynie dla małych obciążeń silnika, dla których zadymienie nie przekracza podanej wyżej wartości.

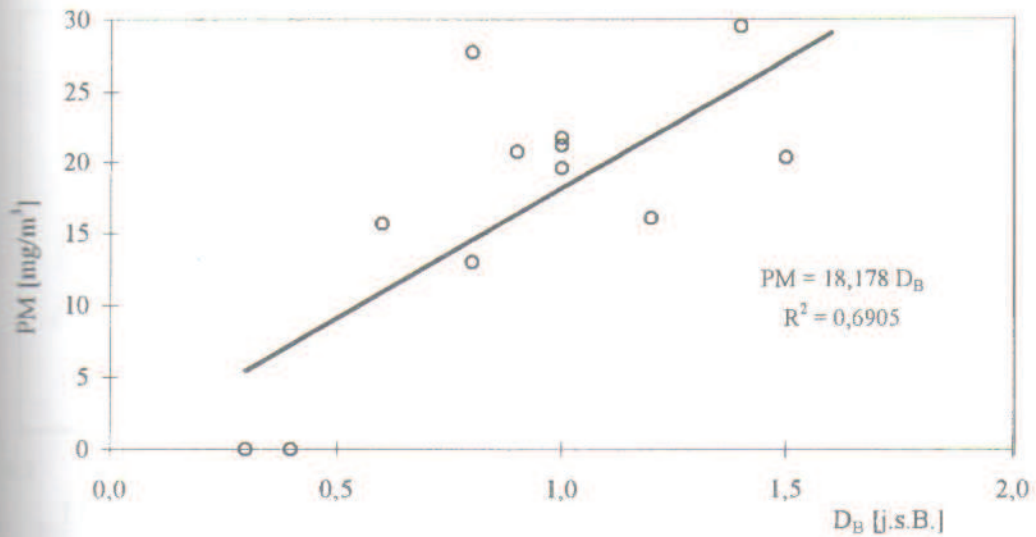
Istniejące korelacje pomiędzy ilością węgla PM_C a stopniem zadymienia spalin D_B , przedstawiono w tabeli 3.



Rys. 14. Zależność emisji węgla PM_C od stopnia zaczernienia spalin N w teście 13-fazowym
 Fig. 14. Dependence of PM_C emission on N in 13-phase test

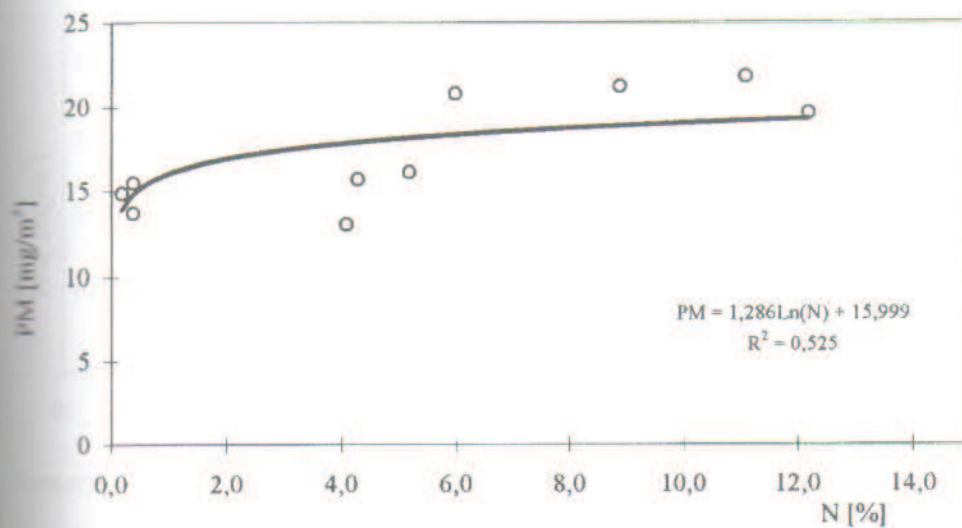


Rys. 15. Zależność emisji węgla PM_C od stopnia zadymienia spalin D_B w teście 13-fazowym
 Fig. 15. Dependence of PM_C emission on D_B in 13-phase test



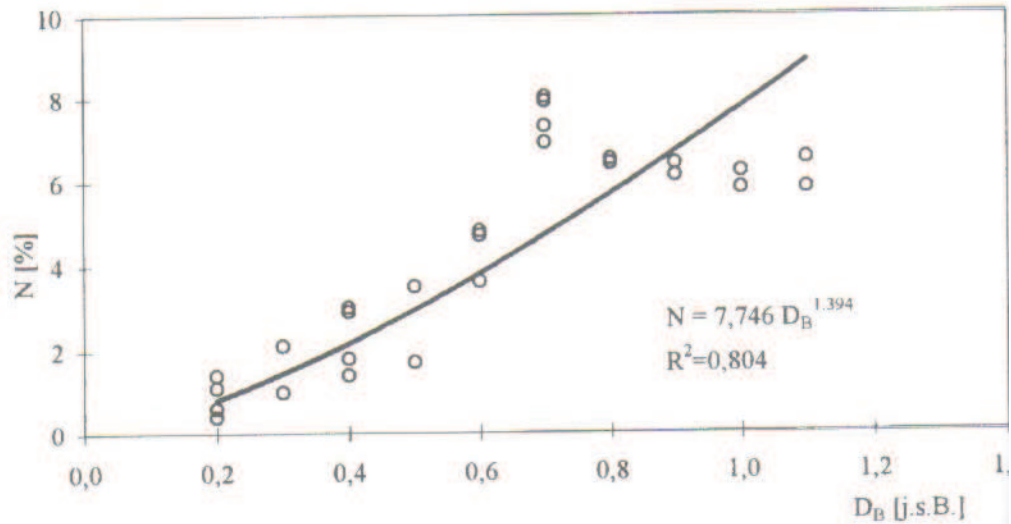
rys. 16. Zależność ilości cząstek stałych PM od stopnia zadymienia spalin D_B w teście 13-fazowym (uwzględniono tylko fazy testu na obciążeniach częściowych, bez biegu luzem)

Fig. 16. Dependence of PM on D_B in 13-phase test (in which idle running is excluded)



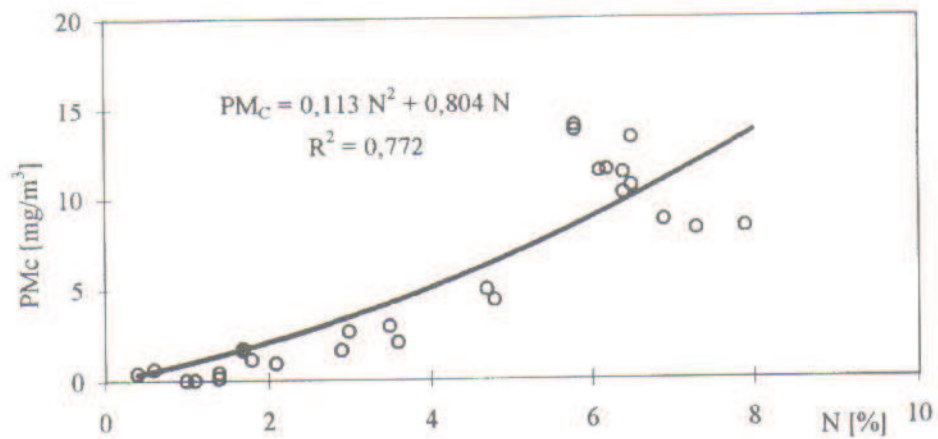
rys. 17. Zależność emisji cząstek stałych PM od stopnia zaczernienia spalin N^B w teście 13-fazowym (uwzględniono tylko fazy testu na obciążeniach częściowych)

Fig. 17. Dependence of PM on N in 13-phase test (only partial load)



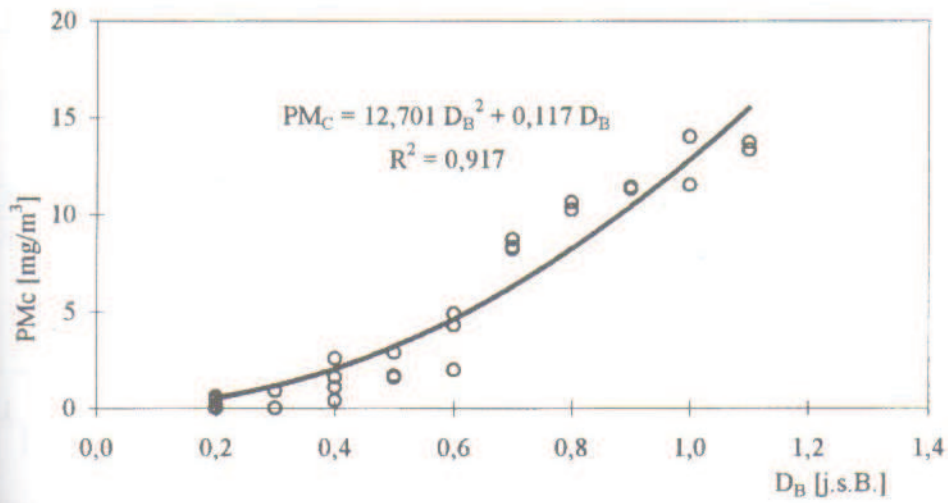
Rys. 18. Zależność od stopnia zaczernienia spalin N od stopnia zadymienia spalin D_B dla symulacji testu ECE R83

Fig. 18. Dependence of N on D_B in simulation of ECE R83 test

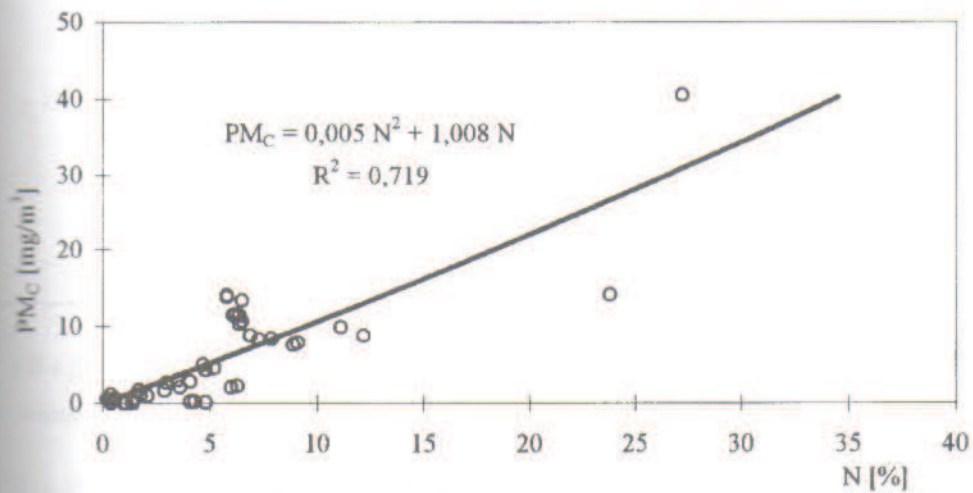


Rys. 19. Zależność emisji węgla PM_C od stopnia zaczernienia spalin N w symulacji testu ECE R83

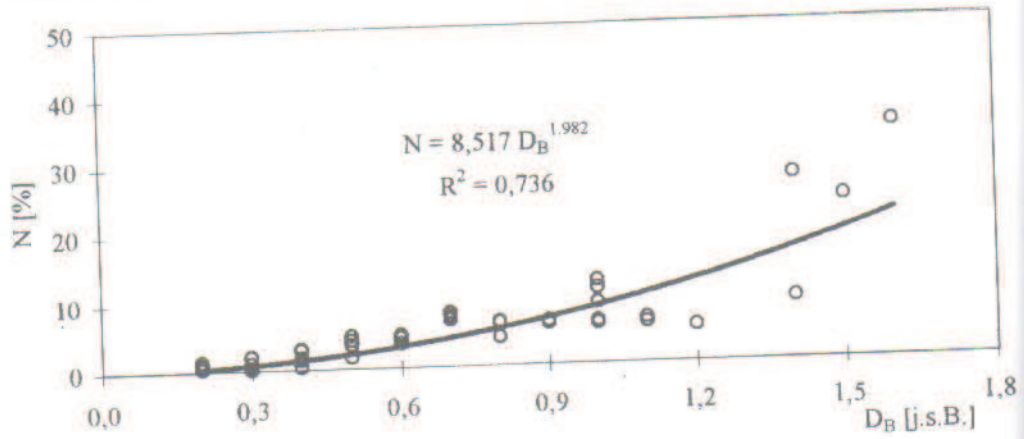
Fig. 19. Dependence of PM_C on N in simulation of ECE R83 test



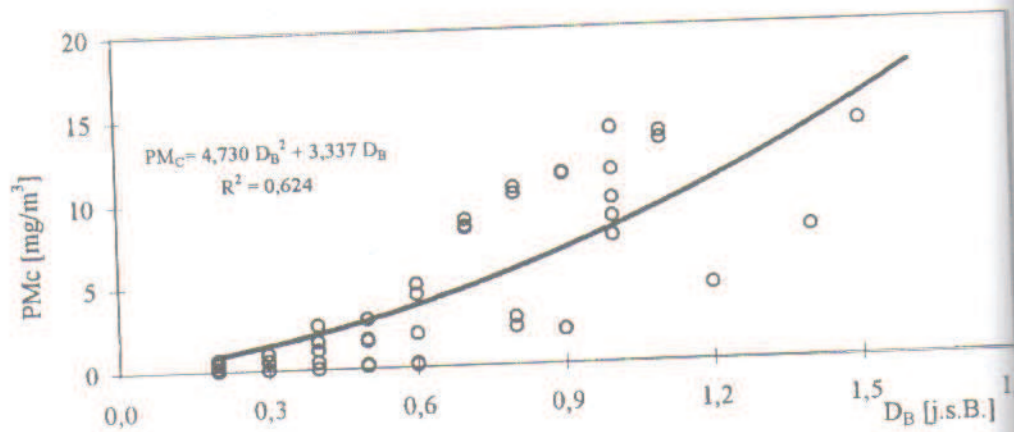
Rys. 20. Zależność emisji węgla PM_C od stopnia zadymienia spalin D_B w symulacji testu ECE R83
 Fig. 20. Dependence of PM_C on D_B in simulation of ECE R83 test



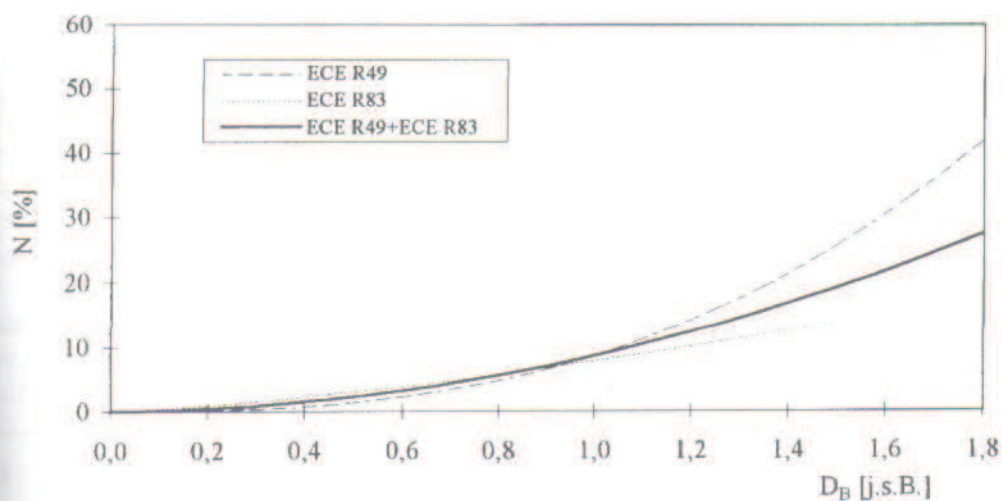
Rys. 21. Zależność emisji węgla PM_C od stopnia zaczernienia spalin N dla danych z obu testów
 Fig. 21. Dependence of PM_C emission on N for both tests



Rys. 22. Zależność stopnia zaczernienia spalin N od stopnia zadymienia spalin D_B dla danych z obu testów
 Fig. 22. Dependence of N on D_B for both tests

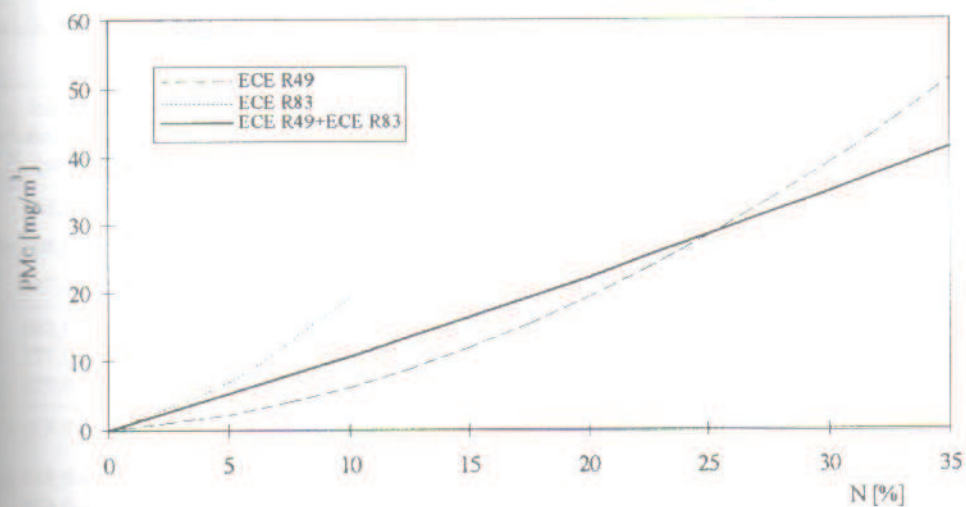


Rys. 23. Zależność emisji węgla PM_C od stopnia zadymienia spalin D_B dla danych z obu testów
 Fig. 23. Dependence of PM_C emission on D_B for both tests



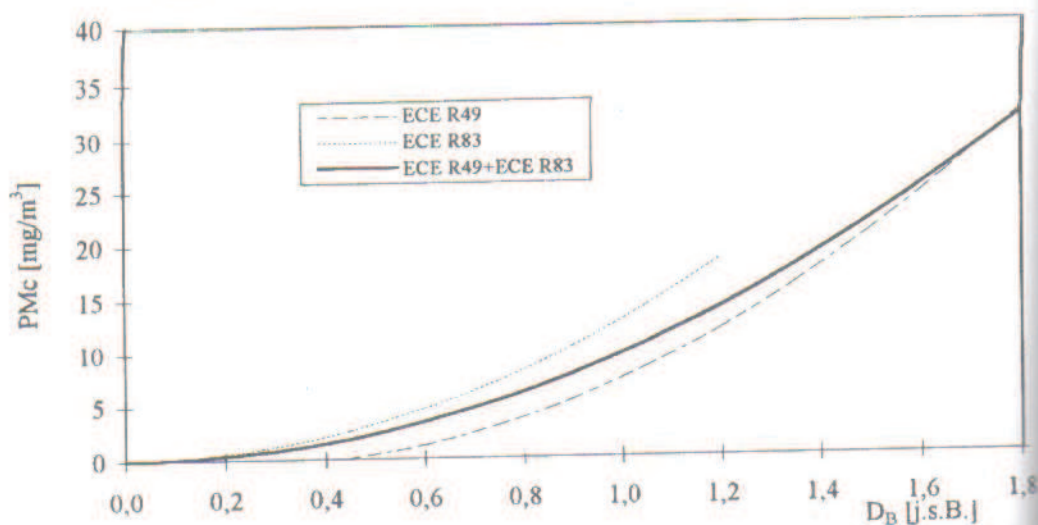
Rys. 24. Korelacja stopnia zaczernienia spalin N od stopnia zadymienia spalin D_B dla różnych testów

Fig. 24. Correlation of N vs D_B for different test applied



Rys. 25. Zależność emisji węgla PM_C od stopnia zaczernienia spalin N dla przeprowadzonych testów

Fig. 25. Dependence of PM_C emission on N for different test applied



Rys. 26. Zależność emisji węgla PM_C od stopnia zadymienia spalin D_B dla przeprowadzonych testów
 Fig. 26. Dependence of PM_C emission on D_B for different test applied

T a b e l a 3. Zależności korelacyjne wraz ze współczynnikami korelacji dla przeprowadzonych testów
 Correlations between test applied

Typ zależności	Rodzaj testu	Wzór korelacyjny	Wartości współczynników korelacji
$N=f(D_B)$	ECE R49	$N=8,593 D_B^{2,685}$	$R^2=0,885$
	ECE R83	$N=7,746 D_B^{1,394}$	$R^2=0,804$
	ECE R49+ECE R83	$N=8,517 D_B^{1,382}$	$R^2=0,736$
$PM_C=f(N)$	ECE R49	$PM_C=0,034 N^2+0,276 N$	$R^2=0,860$
	ECE R83	$PM_C=0,113 N^2+0,804 N$	$R^2=0,772$
	ECE R49+ECE R83	$PM_C=0,005 N^2+1,008 N$	$R^2=0,719$
$PM_C=f(D_B)$	ECE R49	$PM_C=6,619 D_B^2-2,225 D_B$	$R^2=0,870$
	ECE R83	$PM_C=12,701 D_B^2+0,117 D_B$	$R^2=0,917$
	ECE R49+ECE R83	$PM_C=4,730 D_B^2+3,337 D_B$	$R^2=0,624$
$PM=f(D_B)$	ECE R49	$PM=18,178 D_B$	$R^2=0,691$
$PM=f(N)$	ECE R49	$PM=1,2864 \ln(N)+15,999$	$R^2=0,526$

4. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań i analizy wyników stwierdzono zasadność wstępnego oszacowania emisji cząstek stałych przez pomiar zaczernienia lub zadymienia spalin. Potwierdzenie przewidywanej zależności pomiędzy wynikami

pomiarów otrzymano porównując zależności zadymienia i zaczernienia spalin, o czym świadczy wartość współczynnika korelacji.

W skład cząstek wchodzi zarówno część węglowa jak również kondensat węglowodorowy, który jest niemierzalny powyższymi metodami badawczymi. W wyniku przeprowadzonych badań, zdołano z dobrym skutkiem wyróżnić zależność części węglowej cząstek stałych w funkcji zadymienia lub zaczernienia spalin. Zależności te pozwalają wstępnie oszacować wartość emisji cząstek stałych na podstawie zaczernienia spalin.

Otrzymane zależności empiryczne mogą być zastosowane do wstępnego określania emisji cząstek stałych dla małych obciążeń silnika, dla tych stanów pracy, w których dymienie nie przekracza $D_B = 1$ j.s.B., lub zaczernienie nie jest większe niż 15%.

Wykaz oznaczeń

CEE	<i>Communauté Economique Européenne</i> — Europejska Wspólnota Gospodarcza (EWG)
CO	<i>carbon monoxide</i> — tlenek węgla
CO ₂	<i>carbon dioxide</i> — dwutlenek węgla
CVS	<i>Constant Volume Sampling</i> — stała objętość próbki (układ rozrzedzający spaliny powietrzem o stałym natężeniu przepływu)
β	stopień dymienia silnika
β_B	stopień dymienia w jednostkach skali Boscha
β_H	stopień dymienia w jednostkach skali Hartridge'a
ECE	<i>Economic Commission for Europe</i> — Europejska Komisja Gospodarcza (agenda ONZ)
HC	<i>hydrocarbons</i> — węglowodory
I	natężenie światła
k	<i>absorption coefficient</i> — współczynnik absorpcji
L	długość komory pomiarowej
λ	długość fali
m_p	masa cząstek stałych
n	prędkość obrotowa wału korbowego silnika
τ	<i>opacity</i> — zaczernienie filtra
NDIR	<i>Non-Dispersive Infrared</i> — analizator niedyspersyjny na podczerwień
O ₂	<i>oxygen</i> — tlen
p	ciśnienie
PM	<i>Particulate Matter</i> — cząstki stałe
PM _T	<i>Total Particulate Mass</i> — całkowita masa PM
PM _C	część węglowa cząstek stałych
Q	objętościowe natężenie przepływu
α	współczynnik absorpcji na jednostkę masy
r	współczynnik korelacji

SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i> — Stowarzyszenie Inżynierów Samochodowych w USA
T, t	temperatura
t	time — czas
V_{ss}	pojemność skokowa silnika
ZI	silnik o zapłonie iskrowym
ZS	silnik o zapłonie samoczynnym

Literatura

- [1] Application of the DPA 480/DPL 482, ALV List GmbH, Graz 1991.
- [2] AVL Consulting and Information: Current and Future Exhaust Emissions Legislation. AVL List GmbH. Graz 11.1997.
- [3] CHRISTIAN R., KNOPF F., JASCHEK A., SCHINDLER W.: *A New Method of Measuring Filter Smoke Number with Increased Sensitivity*. MTZ 54/1993.
- [4] CISEK J., SZLACHTA Z., ZABLOCKI M.: *Influence of the Exhaust Dilution Ratio Determination Method on the Particulate Matter Emission of Diesel engine*. 23rd International Scientific Conference on Combustion Engines KONES'97. Bielsko-Biała 1997.
- [5] IDZIOR M., MERKISZ J., PIELECHA I., PIELECHA J.: *Possibilities of toxic compound emission reduction by the change in parameters of Diesel supercharging*. 23rd International Scientific Conference on Combustion Engines KONES'97. Bielsko-Biała 1997.
- [6] JONES B., STOLLERY D., CLIFTON J., WYLIE T.: *In-Service and Particulate Measurements*. SAE Paper nr 970748.
- [7] KLINGENBERG H., WITZENHAUSEN K., FRANKE H.-U.: *Variation of Diesel Particles in the Exhaust Pipe. Determination of their Size Distributions and of the Three-dimensional Co-ordinates of Individual Particle Agglomerates*. 17. Internationales Wiener Motorensymposium. VDI Verlag 1996.
- [8] KÖNIG A., RICHTER T.: *Lean NOx. Results from a European Research Project on Lean Nitrogen Oxide Removal*. 17. Internationales Wiener Motorensymposium. VDI Verlag 1996.
- [9] MERKISZ J.: *Emisja cząstek stałych przez silniki spalinowe o zapłonie samoczynnym*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1997.
- [10] PISCHINGER S., DUVINAGE F., WEBER S.: *the 4-Cylinder DI-Diesel Engine with 1 Liter Displacement — Vision or Reality?* 17. Internationales Wiener Motorensymposium. VDI Verlag 1996.
- [11] SHIBATA H., SEKIGUCHI K., KAZUYA Y.: *Study of White Smoke reducing Techniques of DI Diesel Engines*. SAE Paper nr 970314.
- [12] TRITTHART P., CARTELLIERI W.P.: *Diesel Particulate Emissions — Experiences and Results*. World Car Conference, California 21–24 January 1996.
- [13] WALSH M.: *Global Trends in Diesel Emissions Control — A 1997 Update*. SAE Paper nr 970179.
- [14] Materiały firm: AVL, Beckmann, Bosch, Horiba, OBR SM Bielsko-Biała, Pierburg, Ricardo, Schenck

Remarks on indirect methods of measurement of particulate matter emission

S u m m a r y

The paper presents correlation between the measured opacity value N , absorption coefficient k , the carbon mass of particulates PM_C and the smoke level defined according to the Bosch scale. Test stand examinations have been performed turbocharged diesel engine purposed for driving of vans. Result of investigations conformed principle valutional define particulate matter emission by measurement opacity value.