

Jerzy MERKISZ¹
Maciej ANDRZEJEWSKI²
Jacek PIELECHA³

METODY OBLICZANIA WSPÓŁCZYNNIKA KOREKCJI WILGOTNOŚCI I ICH WPŁYW NA EMISJĘ TLENKÓW AZOTU

W artykule przedstawiono rezultaty z badań emisyjnych samochodów osobowych z silnikami ZI i ZS oraz pojazdów ciężarowych w warunkach drogowych. Testy wykonywano na odcinku kilkunastu kilometrów podczas jazdy na odcinkach o różnej charakterystyce. Do pomiarów stężenia tlenków azotu wykorzystano mobilny analizator do badań toksyczności SEMTECH-DS firmy SENSORS. Dla każdego pojazdu wykonano po cztery przejazdy, a następnie uśredniono wartość emisji tlenków azotu. Dla poszczególnych wartości obliczono współczynnik korekcji wilgotności według metod: 1065.670, 86.1342-94 SI, 86.1342-94 Diesel oraz 86.1370-2007 NTE. Uzyskane dane posłużyły do opracowania zależności charakteryzujących wpływ metody obliczania współczynnika korekcji wilgotności na emisję tlenków azotu.

INFLUENCE OF THE CALCULATION METHOD OF THE HUMIDITY CORRECTION FACTOR ON THE NITROGEN OXIDES EMISSIONS

The article presents the results of exhaust emission tests of passenger car with SI engine, passenger car with CI engine and heavy duty vehicle in road conditions. The tests were carried out in sections of about a dozen kilometers in length in city traffic conditions. The SEMTECH-DS mobile analyzer from SENSORS was used to measure the concentration of exhaust emissions. For every vehicle made four rides, and then averaged the value of nitrogen oxides emissions. For each value was calculated the humidity correction factor by methods: 1065.670, 86.1342-94 SI, 86.1342-94 Diesel and 86.1370-2007 NTE. The data obtained were used for the analysis of relationships characteristic of the influence of the calculation method of the humidity correction factor on the NO_x emissions.

¹ Politechnika Poznańska, Instytut Silników Spalinowych i Transportu, 60-965 Poznań, ul. Piotrowo 3.
Tel. +48 61 665-22-07, Fax. +48 61 665-22-04. E-mail: Jerzy.Merkisz@put.poznan.pl

² Politechnika Poznańska, Instytut Silników Spalinowych i Transportu, 60-965 Poznań, ul. Piotrowo 3.
Tel. +48 61 665-20-04, Fax. +48 61 665-22-04. E-mail: Maciej.Andrzejewski@doctorate.put.poznan.pl

³ Politechnika Poznańska, Instytut Silników Spalinowych i Transportu, 60-965 Poznań, ul. Piotrowo 3.
Tel. +48 61 665-21-18, Fax. +48 61 665-22-04. E-mail: Jacek.Pielecha@put.poznan.pl

1. WPROWADZENIE

Współczynnik korekcji wilgotności (K_h) jest wykorzystywany w pomiarach chwilowego stężenia tlenu oraz dwutlenku azotu (sumarycznie zwanych tlenkami azotu i oznaczanych jako NO_x). Uwzględnia się go w obliczeniach emisji drogowej (podawanej w g/km) oraz jednostkowej ($\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$) tlenków azotu z pojazdów.

Wyróżnia się cztery metody służące do obliczania współczynnika K_h , określone w przepisach amerykańskiego kodeksu federalnego (CFR – *Code of Federal Regulations*) [1–4]:

- 1) CFR40 §86.1342-94 SI,
- 2) CFR40 §86.1342-94 Diesel,
- 3) CFR40 §86.1370-2007 NTE,
- 4) CFR40 §1065.670.

Pierwsze przepisy dotyczą badań pojazdów napędzanych silnikami o zapłonie iskrowym. Drugie są stosowane w przypadku silników o zapłonie samoczynnym. Paragraf 86.1370-2007 z oznaczeniem NTE (*Not-To-Exceed*) dotyczy badań pojazdów ciężarowych napędzanych silnikami ZS o dużej objętości skokowej (silniki HDD – *Heavy-Duty Diesel*). Procedura badawcza NTE to dodatkowe wymogi wprowadzone przez amerykańską Agencję Ochrony Środowiska (U.S. EPA – *United States Environmental Protection Agency*) jakie musi spełnić silnik HDD w trakcie badań homologacyjnych (ich celem jest uzyskanie certyfikatu dopuszczającego nowy typ pojazdu lub silnika do ruchu po drogach publicznych). Procedura ta służy do kontroli emisji substancji szkodliwych w spalinach podczas pracy silnika w pełnym zakresie prędkości obrotowej oraz dla typowych obciążeń spotykanych w trakcie eksploatacji pojazdów ciężarowych. Paragraf 1065.670 kodeksu CFR określa ogólne przepisy dotyczące procedury testowania silników ZI oraz ZS [3].

2. METODY OBLICZANIA WSPÓŁCZYNNIKA KOREKCJI WILGOTNOŚCI

Emisję drogową oraz jednostkową tlenków azotu koryguje się poprzez uwzględnienie współczynnika K_h , którego wartość oblicza się z następujących zależności:

- 1) według CFR40 §86.1342-94 – dotyczy silników ZI [1, 2]:

$$K_h = \frac{1}{[1 - 0,0329(H - 10,71)]}, \quad (1)$$

gdzie: H – wilgotność bezwzględna ujmująca zawartość wody w suchym powietrzu [$\text{g H}_2\text{O}/\text{kg}_s.\text{pow.}$].

- 2) według CFR40 §86.1342-94 – dotyczy silników ZS [1, 2]:

$$K_h = \frac{1}{[1 - 0,00182(H - 10,71)]}, \quad (2)$$

3) według CFR40 §86.1370-2007 – dotyczy silników ZS w teście NTE [2]:

$$Kh = 9,953 \cdot X_{H_2O} + 0,832 \quad \text{dla } H \geq 10,72 \text{ g}_{H_2O} / \text{kg}_{\text{s. pow.}} \quad (3)$$

$$Kh = 9,953 \cdot X_{H_2O} + 0,8855 \quad \text{dla } H \leq 7,14 \text{ g}_{H_2O} / \text{kg}_{\text{s. pow.}} \quad (4)$$

$$Kh = 1 \quad \text{dla } 7,14 < H < 10,72 \quad (5)$$

gdzie: X_{H_2O} – ułamek molowy wody w suchym powietrzu.

4) według CFR40 §1065.670 dla silników ZI i ZS [3]:

$$Kh = 9,953 \cdot X_{H_2O} + 0,832 \quad (6)$$

Przy obliczaniu wilgotności bezwzględnej uwzględnia się m.in. ciśnienie atmosferyczne oraz wilgotność względną [3]:

$$H = \frac{6,211 \cdot R_H \cdot P_s}{P_{\text{atm}} - P_s \cdot R_H / 100} \quad [\text{g}_{H_2O} / \text{kg}_{\text{s. pow.}}], \quad (7)$$

gdzie: R_H – wilgotność względna [%],

P_s – ciśnienie pary nasyconej [kPa],

P_{atm} – ciśnienie atmosferyczne [kPa].

$$P_s = \exp \left[\frac{16,78 \cdot t_{\text{próbki}} - 116,9}{t_{\text{próbki}} + 237,3} \right] \quad [\text{kPa}], \quad (8)$$

$$X_{H_2O} = \frac{P_s}{P_{\text{otocz}}}, \quad (9)$$

gdzie: P_{otocz} – ciśnienie otoczenia [kPa].

3. OBIEKTY BADAWCZE

W badaniach wykorzystano zarówno pojazdy napędzane silnikami o zapłonie iskrowym (Fiat Panda), jak i o zapłonie samoczynnym (BMW 320d, autobus miejski Solaris Urbino 18 oraz Urbino 18 Hybrid). Pojazdy te spełniają różne normy emisji spalin (tab. 1, rys. 1).

Pomiarów emisyjności w warunkach drogowych dokonano w warunkach ruchu miejskiego w Poznaniu. Pojazdy A i B były badane na trasie o długości około 12 km (rys. 2a). Natomiast badania autobusów wykonano na trasie ich regularnego kursowania w

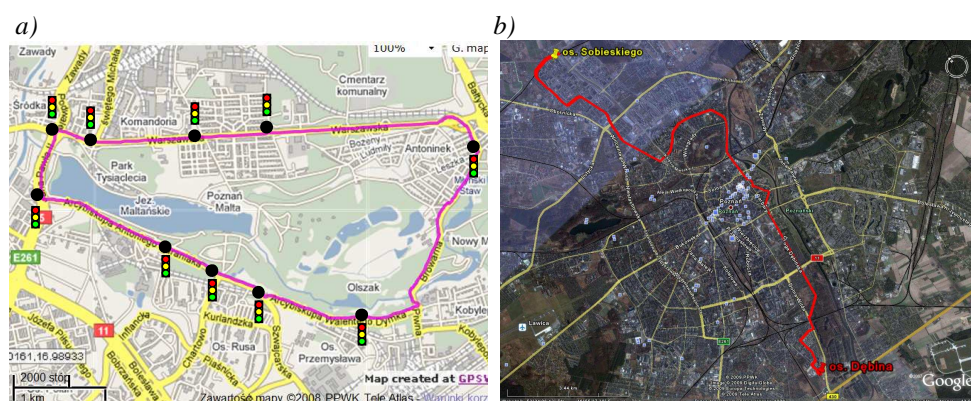
komunikacji miejskiej (trasa os. Sobieskiego – os. Dębina; długość trasy około 16,5 km; rys. 2b).

Tabela 1. Dane techniczne badanych pojazdów

Parametr	Pojazd A	Pojazd B	Pojazd C1	Pojazd C2
	Fiat Panda	BMW	Solaris Urbino 18 Diesel	Solaris Urbino 18 Hybrid
Typ silnika (rodzaj)	Fiat 1,1 8V Fire (ZI)	BMW 2,0 R4 (ZS)	DAF PR228 (ZS)	Cummins ISBe5 250B (ZS) + Allison Ep50
Objętość skokowa silnika [cm ³]	1108	1995	9200	6700
Norma	Euro 3	Euro 4	Euro V	Euro V
Skrzynia przekładniowa	manualna, 5-biegowa	manualna, 6-biegowa	automatyczna Voith Diwa 5	automatyczna Allison Ev
Masa pojazdu [kg]	850	1490	16 700	17 800



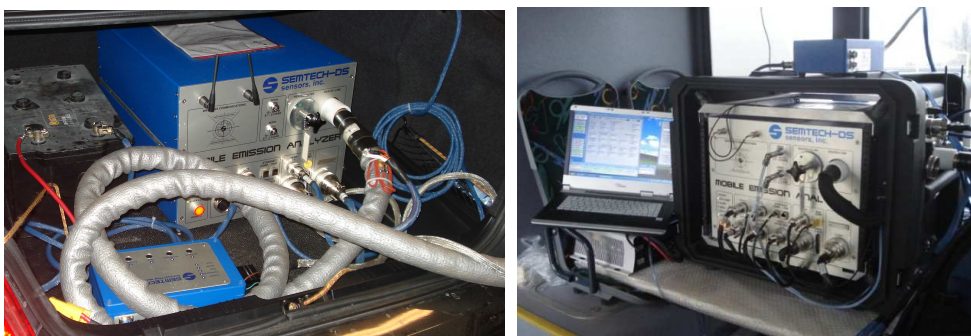
Rys. 1. Pojazdy wykorzystywane do badań z zamontowaną aparaturą pomiarową (widoczny przepływomierz spalin)



Rys. 2. Trasa przejazdu podczas badań emisyjności: a) pojazdu A i B, b) pojazdu C1 i C2

4. APARATURA POMIAROWA

Do pomiarów stężenia substancji szkodliwych w spalinach wykorzystano mobilny analizator do badań toksyczności SEMTECH-DS firmy SENSORS (rys. 3). Umożliwił on pomiar zużycia paliwa oraz stężenia związków szkodliwych, mierząc jednocześnie masowe natężenie przepływu spalin [5].



Rys. 3. Mobilny analizator do badań toksyczności spalin SEMTECH-DS firmy SENSORS

Oprogramowanie służące do obsługi urządzenia SEMTECH-DS do obliczeń współczynnika korekcji wilgotności wykorzystuje różne metody. Oprócz tego umożliwia ono symulowanie wielu parametrów w trakcie analizowania wyników pomiarów. Na potrzeby niniejszych badań w celach porównawczych symulowano temperaturę otoczenia o wartościach -10 oraz 30°C . Ponadto podczas obróbki danych pomiarowych symulowano dwa rodzaje oleju napędowego (dot. pojazdu B, C1 oraz C2; tab. 2).

Tabela 2. Rodzaje paliw i ich właściwości

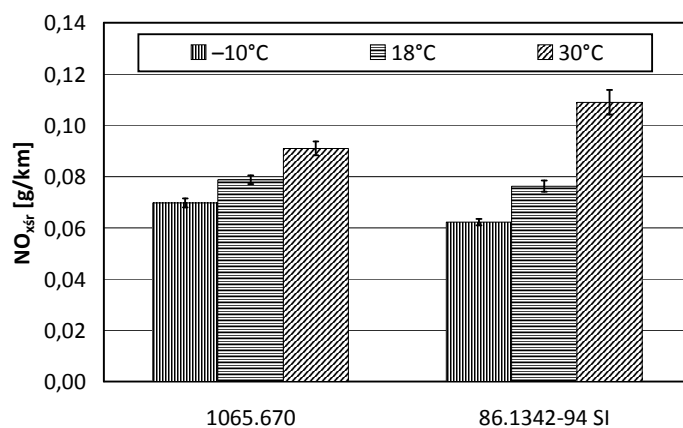
Właściwość	Pojazd A	Pojazd B, C1 oraz C2	
	benzyna – P0	olej napędowy – P1	olej napędowy – P2
Gęstość [kg/dm^3]	0,75	0,85	0,85
Współczynniki molowe:			
C	1	1	1
H	1,85	1,93	1,8
O	0	0	0
N	0	0	0

5. WYNIKI BADAŃ

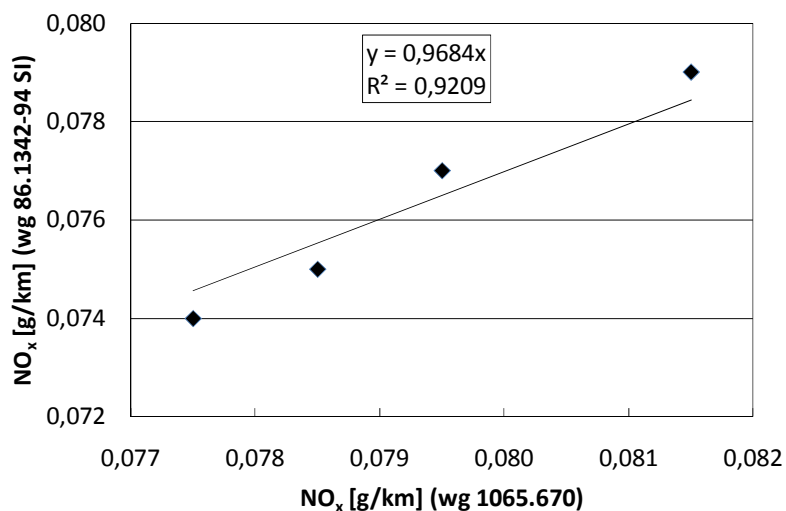
5.1. Emisja tlenków azotu z pojazdu A

W trakcie badań pojazdu A temperatura otoczenia utrzymywała się na poziomie około 18°C . Porównano wyniki pomiarów uzyskane w tej temperaturze z wynikami dla symulowanej temperatury -10 oraz 30°C . Zaobserwowano dla obu metod obliczania współczynnika korekcji wilgotności wzrost emisji drogowej tlenków azotu wraz ze

wzrostem temperatury otoczenia (rys. 4). W celach porównawczych sporządzono zależności liniowe pomiędzy metodami obliczania współczynnika Kh (rys. 5). W temperaturze -10°C oraz badawczej emisja NO_x , przy wykorzystaniu do obliczeń metody 1065.670, jest odpowiednio o około 10,8% oraz 3,2% większa. Natomiast w temperaturze 30°C większa emisja występuje w przypadku metody 86.1342-94 SI (wzrost emisji aż o około 19,8%).



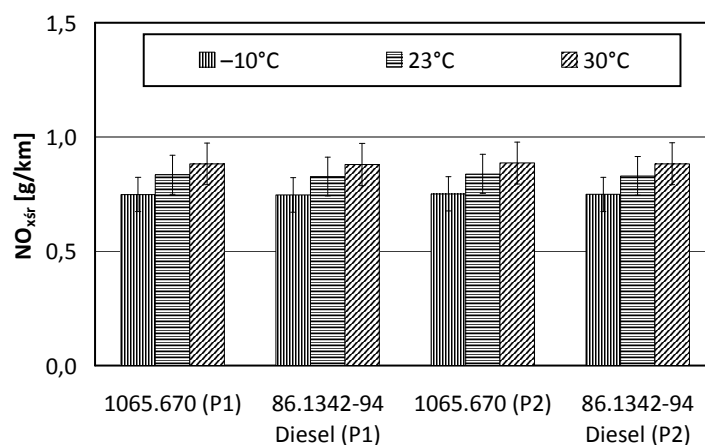
Rys. 4. Średnia z czterech przejazdów emisja drogowa tlenków azotu (z zaznaczoną niepewnością pomiaru) z pojazdu A w poszczególnej temperaturze



Rys. 5. Zależność pomiędzy emisją drogową obliczoną według metody 1065.670 oraz 86.1342-94 SI (pojazd A, temp. 18°C)

5.2. Emisja tlenków azotu z pojazdu B

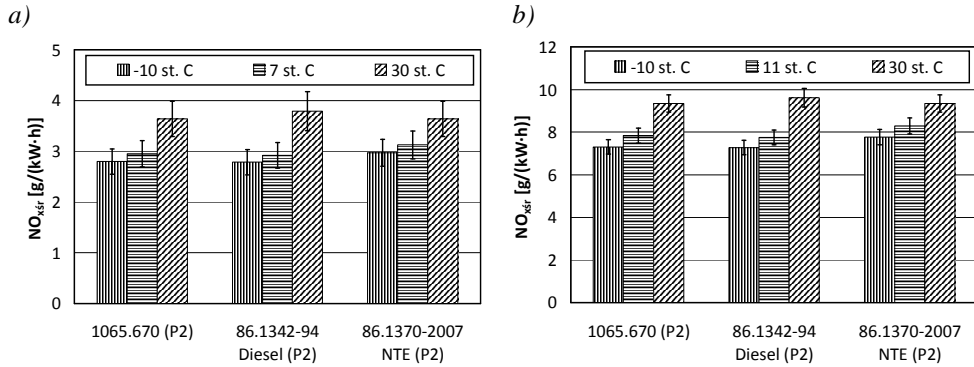
W trakcie badań pojazdu B temperatura otoczenia utrzymywała się na poziomie około 23°C. Wyniki pomiarów uzyskane w tej temperaturze porównano, podobnie jak w przypadku pojazdu A, z wynikami dla symulowanej temperatury –10 oraz 30°C. Ponadto dla tego pojazdu symulowano dwa rodzaje oleju napędowego (tab. 2). W przypadku obu metod obliczania współczynnika korekcji wilgotności dotyczących tego pojazdu także zaobserwowano wzrost emisji drogowej NO_x wraz ze wzrostem temperatury otoczenia (rys. 6). Dla paliwa P1 w temperaturze –10°C oraz 30°C emisja tlenków azotu obliczona przy wykorzystaniu metody 1065.670 jest o około 0,3% większa, natomiast w temperaturze badawczej jest ona większa o około 1%. Dla paliwa P2 różnice w emisji dla porównywanych metod są identyczne jak w przypadku paliwa P1.



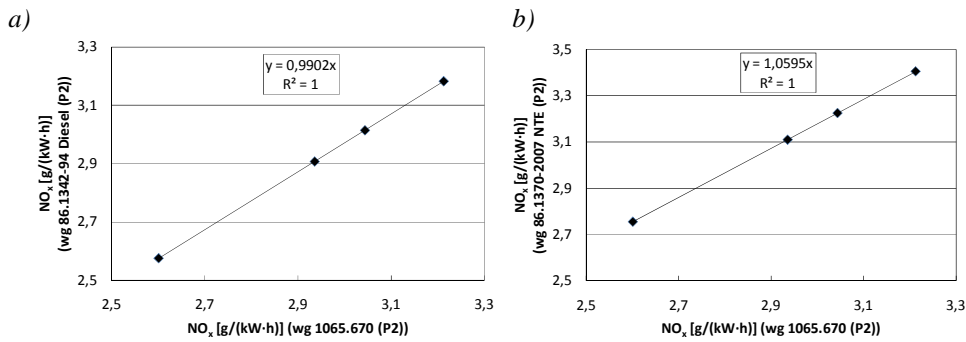
Rys. 6. Średnia z czterech przejazdów emisja drogowa tlenków azotu (z zaznaczoną niepewnością pomiaru) z pojazdu B w poszczególnej temperaturze

5.3. Emisja tlenków azotu z pojazdu C1 oraz C2

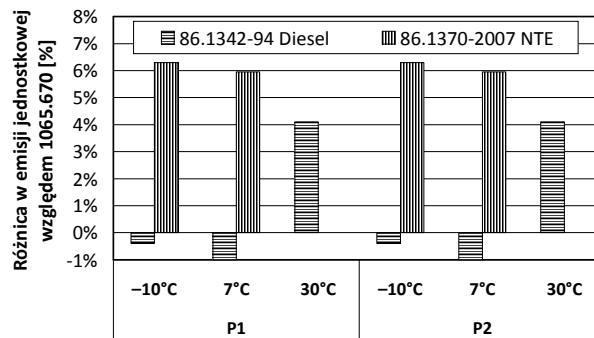
Dla pojazdu C1 oraz C2, podobnie jak dla pojazdu B, w czasie analizy danych pomiarowych symulowano dwa rodzaje oleju napędowego (tab. 2). Wartość średnia temperatury otoczenia dla czterech przejazdów w przypadku pojazdu C1 wynosi około 7°C. Natomiast pojazd C2 pokonywał trasę w temperaturze otoczenia około 11°C. Dla obu autobusów biorących udział w badaniach obliczono emisję jednostkową tlenków azotu korzystając z trzech metod wyznaczania współczynnika korekcji wilgotności. Emisja ta, podobnie jak dla pojazdu A i B, wzrasta wraz ze wzrostem temperatury otoczenia (rys. 7). Różnice procentowe w wartości emisji, obliczonej z uwzględnieniem poszczególnych metod wyznaczania współczynnika korekcji wilgotności oraz dla różnej temperatury, przedstawiono na rys. 9 i 10. Punktem odniesienia jest emisja NO_x skorygowana o współczynnik Kh obliczony według metody 1065.670.



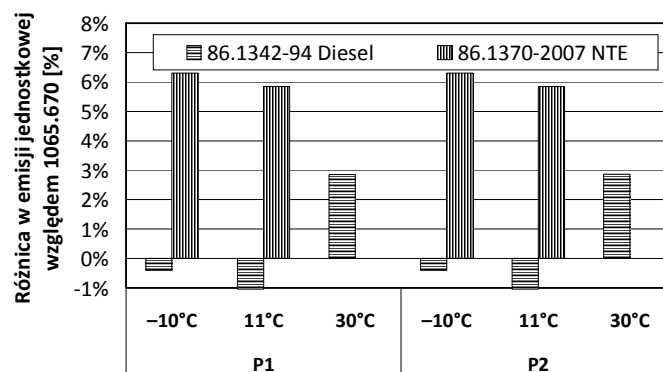
Rys. 7. Średnia z czterech przejazdów emisja jednostkowa NO_x (z zaznaczoną niepewnością pomiaru) w poszczególnej temperaturze: a) pojazd C1, b) pojazd C2



Rys. 8. Zależność emisji NO_x uwzględniającej współczynnik Kh obliczony według metod (pojazd C1, temp. 7°C, paliwo P2): a) 1065.670 oraz 86.1342-94 Diesel, b) 1065.670 oraz 86.1370-2007 NTE



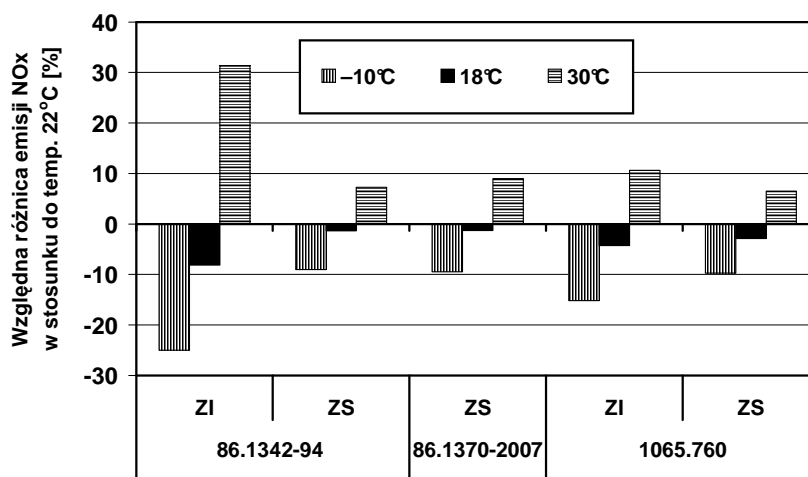
Rys. 9. Różnice w wartości emisji jednostkowej NO_x w zależności od zastosowanej metody obliczania współczynnika Kh (pojazd C1) i przyjętego paliwa do badań



Rys. 10. Różnice w wartości emisji jednostkowej NO_x w zależności od zastosowanej metody obliczania współczynnika Kh (pojazd C2) i przyjętego paliwa do badań

6. PODSUMOWANIE

Zastosowanie różnych metod obliczania współczynnika korekcji wilgotności wykazuje znaczne różnice w wartości emisji NO_x. W badaniach wykazano zwiększanie obliczeniowej emisji tlenków azotu wraz ze wzrostem temperatury otoczenia niezależnie od stosowanych metod obliczania współczynnika wilgotności (rys. 11). Z analizy wyników pomiarów przeprowadzonych dla dwóch rodzajów oleju napędowego wynika, że jego rodzaj nie wpływa na wartość emisji. Interesująca jest zależność pomiędzy metodą 1065.670 a 86.1370-2007 NTE w temperaturze 30°C – w tym przypadku obliczona emisja jednostkowa ma taką samą wartość.



Rys. 11. Zmiany obliczeniowej emisji tlenków azotu od rodzaju metody i przyjętej temperatury do obliczania wskaźnika wilgotności

Różnice wynikające z rys. 11 mają głównie znaczenie przy braku uwzględnienia wpływu temperatury otoczenia na wynik emisji tlenków azotu. Brak tego uwzględnienia w skrajnych temperaturach ujemnych może wpływać znacząco na wynik pomiaru (różnice dochodzące do 30%). Przyjmując, że różnica wartości temperatury otoczenia (-10°C) i temperaturą referencyjną (22°C) wynosi 32°C , nie jest to wynik zastanawiający. W przypadku temperatury większej od referencyjnej różnice te mogą być jeszcze większe, gdyż również wzrost 30-procentowy obserwuje się dla różnicy temperatury tylko o 8°C (symulacja emisji tlenków azotu w temperaturze 30°C).

W świetle zauważalnych różnic w poziomie emisji dla różnych metod wyznaczania współczynnika Kh wydaje się konieczne przeprowadzenie kolejnych badań w celu weryfikacji zauważonych zależności pomiędzy wszystkimi metodami. Należy przeprowadzić analizę dotyczącą wpływu zarówno temperatury pomiaru, a także uwzględnić wilgotność powietrza. Wymagana byłaby również analiza pierwiastkową, uwzględniającą wpływ poszczególnych czynników na wynik obliczeń.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] Dyrektywa 2007/46/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 5 września 2007 r. ustanawiająca ramy dla homologacji pojazdów silnikowych i ich przyczep oraz układów, części i oddzielnych zespołów technicznych przeznaczonych do tych pojazdów („dyrektywa ramowa”). OJ L 263/1, 9.11.2007.
- [2] http://law.justia.com/us/cfr/title40/40cfr86_main_02.html
- [3] http://law.justia.com/us/cfr/title40/40cfr1065_main_02.html
- [4] Regulation (EC) No 715/2007 of the European Parliament and of the Council of 20 June 2007 on type approval of motor vehicles with respect to emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 5 and Euro 6) and on access to vehicle re-pair and maintenance information. OJ L 171/1, 29.6.2007.
- [5] SENSORS SEMTECH-DS On Board Vehicle Emissions Analyzer. User Manual, October 2008.