

Maciej BAJERLEIN  
Łukasz RYMANIAK  
Dariusz MICHALAK

PTNSS–2013–SC–126

## Analysis of bus sustainability with regard to air-conditioning systems and energy consumption

*Abstract: The paper presents a contrastive analysis of the co-relation between various air-conditioning systems and energy consumption in a bus with regard to its sustainability. Entire air-conditioning systems as well as their single parts were compared in the light of energy consumption expressed as the amount of fuel consumed by the bus. For example, the analysis included a comparison of mechanic and electric compressors. Fuel consumption was estimated with carbon balance method. Additionally, the paper presents the results of SORT 1 test conducted on a bus at stop while the combustion engine powered the air-conditioning system. Portable Emissions Measurement Systems (PEMS) were used in order to detect toxic compounds concentrations and the degree of exhaust flow. Moreover, during the tests the temperature values inside the bus were recorded in order to assess the efficacy of each air-conditioning system or its single part that were used for comparison. All results were referred to the degree of city bus sustainability.*

Keywords: air-conditioning system, exhaust emission, sustainability

### Wpływ zastosowania różnych rozwiązań układów klimatyzacji na energochłonność autobusu miejskiego

*Streszczenie: W artykule przedstawiono wpływ zastosowania układów klimatyzacji różnej konstrukcji na ekologiczność i energochłonność autobusu miejskiego. Porównane zostały nowoczesne systemy, które charakteryzują się zastosowaniem innowacyjnych rozwiązań. Między innymi zbadano wpływ wykorzystania sprężarki napędzanej mechanicznie oraz sprężarki napędzanej silnikiem elektrycznym. Energochłonność określono na podstawie zużycia paliwa obliczonego metodą carbon balance. W pracy zaprezentowano również wyniki badań ekologiczności autobusów przeprowadzonych w teście jezdnym SORT 1 oraz podczas postoju pojazdu, gdzie jednostka spalinowa obciążana była przez włączenie układu klimatyzacji. W pomiarach wykorzystany został mobilny analizator spalin należący do grupy PEMS (Portable Emissions Measurement Systems). Urządzenie mierzyło stężenia związków szkodliwych oraz masowe natężenie przepływu gazów wylotowych. Ponadto podczas pomiarów rejestrowano temperatury wewnątrz pojazdu w celu określenia skuteczności działania danego rozwiązania.*

Słowa kluczowe: układ klimatyzacji, emisja spalin, ekologiczność pojazdów

### 1. Wprowadzenie

Stosowanie układu klimatyzacji w pojeździe ma przede wszystkim na celu zapewnienie komfortu pasażerom i kierowcy podczas podróży. Dodatkowo ma znaczny wpływ na poziom bezpieczeństwa jazdy. Głównym zadaniem układu klimatyzacji jest obniżenie temperatury oraz utrzymanie odpowiedniej wilgotności w danej objętości. Pozwala to zapewnić odpowiednie warunki pracy kierowcy i wpływa korzystnie na jego sprawność psychofizyczną, która jest związana z bezpieczeństwem prewencyjnym. W przypadku kiedy występuje duża wilgotność lub znaczna różnica temperatur i pojawia się zjawisko parowania szyb wewnątrz pojazdu, omawiany układ pozwala skutecznie niwelować ten proces. W kwestii bezpieczeństwa czynnego podróży ma to duże znaczenie ze względu na poprawę widoczności [3].

Układy klimatyzacji są obecnie coraz powszechniej stosowane w pojazdach. Dotyczy to nie

tylko samochodów osobowych, ale także pojazdów użytkowych – autobusów, szczególnie autobusów miejskich. Przeciętna podróż trwa od kilku do kilkunastu minut, podczas której pasażerowie narażeni są na tłok, oddziaływanie promieni słonecznych, dużą wilgotność i inne zjawiska, które mogą znacząco obniżyć komfort jazdy. Zastosowanie układu klimatyzacji pozwala zniwelować większość wymienionych negatywnych czynników i sprawia, że podróż nie jest zbyt męcząca dla pasażerów.

Autobus miejski podczas służby często zatrzymuje się i otwiera drzwi, co wynika z charakterystyki jego pracy. W związku z tym wewnątrz pojazdu jest często wietrzona, a dodatkowo może się szybko nagrzewać ze względu na obecność dużej liczby pasażerów. Z tych powodów wymaga się od układów klimatyzacji szybkiego i sprawnego działania. Przewoźnicy miejscy posiadający w swoich flotach pojazdy wyposażone w rozwiązania klimatyzacyjne, są zobligowani do ich wykorzystywania podczas wykonywania usług transportowych, kiedy

temperatura wewnątrz przedziału pasażerskiego przekroczy określoną wartość (najczęściej 25°C).

Stosowanie układu klimatyzacji w pojeździe wiąże się z wieloma korzyściami, jednak pojawiają się także dodatkowe koszty związane z jej obsługą (konserwacją) i eksploatacją. Włączenie układu wiąże się ze zwiększeniem zużycia paliwa, które bezpośrednio wpływa na emisyjność pojazdu. Dążąc do minimalizacji tego zjawiska konieczne jest odpowiednie dobranie całego rozwiązania i jego poszczególnych elementów do charakterystyki danego autobusu. Postępowanie takie wpisuje się w politykę Unii Europejskiej dotyczącą zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych [2].

## 2. Metodyka badań

Przeprowadzone badania miały na celu określenie energochłonności trzech układów klimatyzacji i skuteczności ich działania. Zrealizowano to poprzez wykonanie badań emisji w różnych warunkach pracy autobusu (rys. 1).



Rys. 1. Widok autobusu miejskiego podczas badań energochłonności układu klimatyzacji

Na podstawie otrzymanych wyników badań emisji wyznaczono zużycie paliwa, które było bezpośrednio związane z obciążeniem układu napędowego przez dany układ klimatyzacji. Wyniki pomiarów zostały przedstawione w sposób pozwalający określić względny wpływ działania układu klimatyzacji na ekologiczność i energochłonność autobusu. Ponadto zrealizowano pomiary temperatur wewnątrz pojazdu dla określenia sprawności działania danego rozwiązania.

Podczas realizacji prac przebadano trzy układy klimatyzacji jednego producenta. Dwa układy wyposażono w standardowe sprężarki o napędzie mechanicznym. Porównywane rozwiązania różnią się między sobą przede wszystkim masą oraz wymiarami zewnętrznymi. Pierwszy układ (A) posiadał tradycyjną konstrukcję, która jest powszechnie stosowana w autobusach miejskich. Drugie rozwiązanie (B) charakteryzowało się znacznie zredukowaną masą w stosunku do układu A. Dzięki zasto-

sowaniu nowoczesnej technologii produkcji udało się uzyskać oszczędności w masie urządzenia klimatyzacyjnego na poziomie 30 %. Trzecie rozwiązanie (C) miało zaimplementowaną sprężarkę elektryczną i również cechowało się obniżoną masą całkowitą.

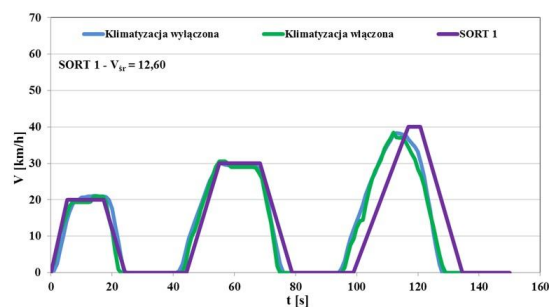
Wszystkie układy klimatyzacji zaprojektowano jako systemy modułowe, zapewniając w ten sposób łatwy montaż na dachu pojazdu. Wpisuje się to w obecnie panujące trendy, ponieważ producenci coraz częściej stosują rozwiązania kompaktowe [4]. Dodatkowo układy B i C cechowały się małą emisją hałasu. W przypadku rozwiązań wykorzystujących napęd mechaniczny zastosowano takie same sprężarki.

Dla każdego rozwiązania wykonano po dwa cykle pomiarowe, w których badano pojazd z włączoną i wyłączoną klimatyzacją. Dla każdego cyklu wykonano po cztery przejazdy odwzorowujące test jezdny SORT 1 reprezentujący ruch autobusu w ścisłym centrum miasta. Na rys. 2 przedstawiono przykładowy przejazd pojazdu wyposażonego w układ C oraz teoretyczny przebieg testu.

Założona prędkość przejazdu w teście SORT 1 wynosi 12,6 km/h. Dla każdego z układów uzyskano następujące średnie prędkości ze wszystkich przejazdów:

- układ klimatyzacji A = 12,13 km/h,
- układ klimatyzacji B = 12,67 km/h,
- układ klimatyzacji C = 12,88 km/h.

Jak wynika z otrzymanych przebiegów są one bliskie założonym, a więc możliwe jest dokonanie obiektywnego porównania zarejestrowanych wyników.



Rys. 2. Przebieg prędkości w funkcji czasu dla testu jezdnego SORT 1 – układ klimatyzacji C

Oprócz badań w testach jezdnych przeprowadzono także pomiary emisyjne podczas postoju pojazdu, gdzie jednostka spalinowa pracowała na biegu jałowym. Tak jak w poprzednim przypadku badania podzielono na dwie serie (z włączoną i wyłączoną klimatyzacją), w których wykonano po trzy próby dla każdego rozwiązania trwające po 300 s każda.

Emisja gazowych związków szkodliwych badana była za pomocą mobilnego przyrządu SEMTECH DS (rys. 3, tab. 1), współpracującego z sondą masowego natężenia przepływu spalin za-

Tabela 1. Charakterystyka mobilnego przyrządu SEMTECH DS [7]

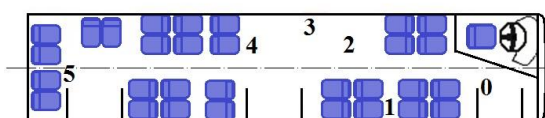
Parametr	Metoda pomiaru	Dokładność
Stężenie związków		
HC	NDIR – niedispersyjna, zakres 0-10%	±3%
CO	FID – płomieniowo-jonizacyjna, zakres 0-10 000 ppm	±2,5%
NO <sub>x</sub> = (NO + NO <sub>2</sub> )	NDUV – niedispersyjna, zakres 0-3000 ppm	±3%
CO <sub>2</sub>	NDIR – niedispersyjna (podczerwień), zakres 0-20 %	±3%
O <sub>2</sub>	elektrochemiczna, zakres 0-20 %	±1%
Próbkowanie	1-4 Hz	
Przepływ spalin	masowe natężenie przepływu T <sub>max</sub> do 700°C	±2,5% ±1% zak.
Czas nagrzewania	900 s	
Obsługiwane systemy diagnostyczne	SAE J1850/SAE J1979 (LDV) SAE J1708/SAE J1587 (HDV) CAN SAE J1939/J2284 (HDV)	

montowaną na końcu układu wylotowego autobusu. W tym urządzeniu dla próbki gazów określone są stężenia takich związków chemicznych jak: HC (analizator FID), NO i NO<sub>2</sub> (analizator NDUV), CO i CO<sub>2</sub> (analizator NDIR) oraz O<sub>2</sub> (czujnik elektrochemiczny). Przyrząd SEMTECH DS odczytuje także dane z systemu diagnostycznego pojazdu oraz układu GPS, dzięki czemu możliwe jest wyznaczenie dokładnych prędkości przejazdu w czasie testu [5, 6].



Rys. 3. Widok mobilnego przyrządu SEMTECH DS w trakcie badań

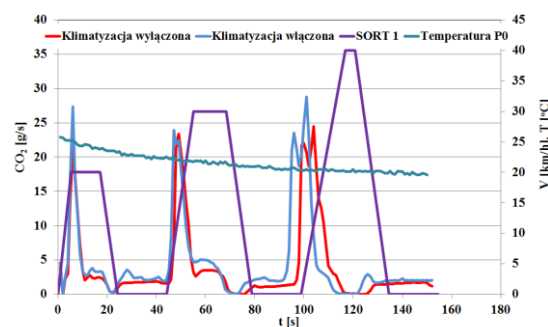
W trakcie realizacji badań emisyjnych mierzono także temperatury wewnątrz pojazdu. W pomiarach wykorzystano sześć czujników termorezystancyjnych połączonych z przetwornikiem sygnału IO-TECH PERSONAL DAQ 3000 (rys. 4). Moduł pomiarowy wyposażony jest w interfejs USB oraz szybki przetwornik A/C (1MHz/16bit). Informacje z czujnika przekazywane były do komputera, który rejestrował dane z częstotliwością 1 Hz.



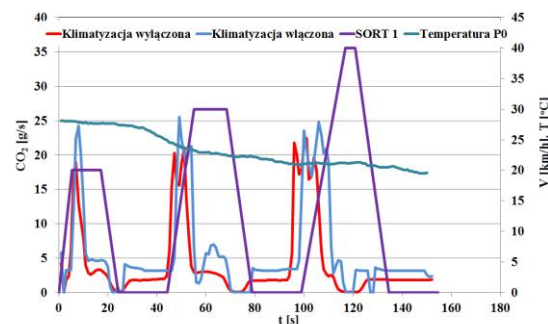
Rys. 4. Rozmieszczenie czujników termorezystancyjnych w autobusie

### 3. Analiza wyników badań

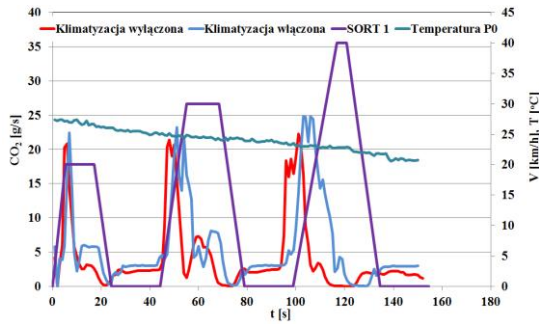
Podczas realizacji badań rejestrowano emisję sekundową CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> oraz HC. Na rysunkach przedstawiono przebiegi emisji CO<sub>2</sub> wybranych przejazdów z każdej serii pomiarowej (rys. 5–7). Wybrany związek jest ściśle związany ze zużyciem paliwa, w związku z tym przedstawione wykresy obrazują także tendencje dotyczące zużycia oleju napędowego. Dodatkowo na wykresach zamieszczony został teoretyczny przebieg testu SORT 1 oraz przebiegi zmian temperatur mierzonych w punkcie P0 – czujnik umieszczony w okolicy pierwszych drzwi, przy kabinie kierowcy.



Rys. 5. Przebieg emisji sekundowej CO<sub>2</sub> w teście SORT 1 – układ klimatyzacji A



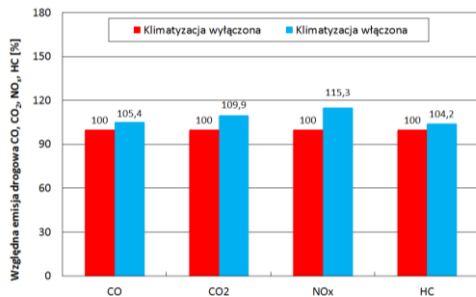
Rys. 6. Przebieg emisji sekundowej CO<sub>2</sub> w teście SORT 1 – układ klimatyzacji B



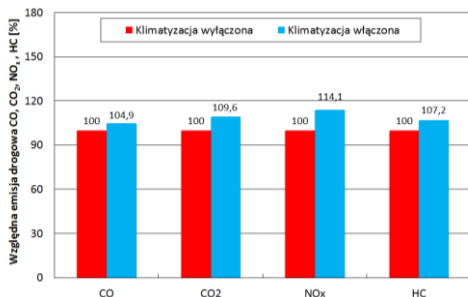
Rys. 7. Przebieg emisji sekundowej CO<sub>2</sub> w teście SORT 1 – układ klimatyzacji C

W celu dokonania oceny energochłonności poszczególnych układów klimatyzacji przeprowadzono porównanie względnych uśrednionych wartości emisji drogowych z poszczególnych serii pomiarowych (rys. 8–10). Przedstawione wyniki wskazują, że w każdym z rozpatrywanych przypadków włączenie układu powoduje wzrost emisji mierzonych związków szkodliwych. Jest to związane z wyraźnym zwiększeniem obciążenia jednostki spalinywej. Największe różnice w emisji wystąpiły dla układu A, oprócz emisji HC. Największe różnice dla tego związku zarejestrowano w przypadku układu B.

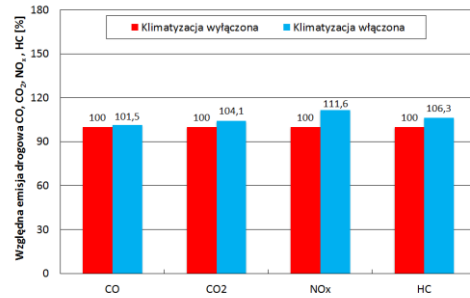
Test jezdny SORT 1 charakteryzuje się długimi postojami, gdzie jednostka spalinywa pracuje na biegu jałowym oraz małymi prędkościami maksymalnymi, a więc silnik spalinywy pracuje w małym zakresie dużego obciążenia. Z tych powodów zarejestrowano znaczne różnice pomiędzy kolejnymi cyklami pomiarowymi. Włączenie układu klimatyzacji przekłada się bezpośrednio na wzrost emisji drogowej.



Rys. 8. Względne wartości emisji drogowej uzyskane w teście SORT 1 – układ klimatyzacji A

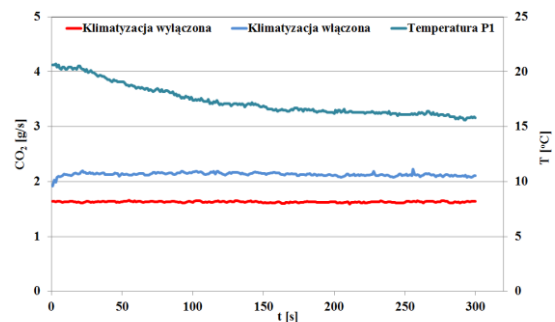


Rys. 9. Względne wartości emisji drogowej uzyskane w teście SORT 1 – układ klimatyzacji B



Rys. 10. Względne wartości emisji drogowej uzyskane w teście SORT 1 – układ klimatyzacji C

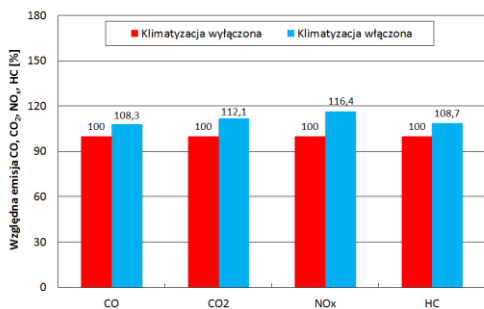
Badania emisji podczas postoju pojazdu rejestrowano w trzech próbach dla każdego cyklu. Analogicznie do testu jezdny SORT 1 stężenie CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> oraz HC w spalinach wzrastało gdy włączony został dany układ klimatyzacji. Przebiegi emisji mierzonych związków toksycznych utrzymywały się na stałym poziomie, ponieważ jednostka spalinywa pracowała w ustalonym punkcie pracy, a także nie była obciążana żadnymi dodatkowymi układami. Przykładowy przebieg emisji CO<sub>2</sub> dla układu klimatyzacji wyposażonego w sprężarkę elektryczną przedstawiono na rysunku 11. Na wykresie zamieszczono także przebieg temperatury w punkcie P1 – czujnik umieszczony w okolicy głowy pasażera siedzącego w środkowej części pojazdu.



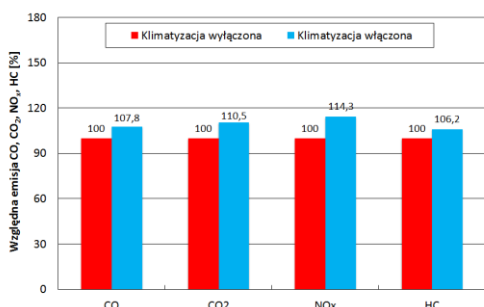
Rys. 11. Przebieg emisji sekundowej CO<sub>2</sub> zarejestrowany podczas badań w czasie postoju – układ klimatyzacji C

W tym etapie badań niemożliwe było wyznaczenie przebiegowego zużycia paliwa, ponieważ autobus nie poruszał się. Z tego powodu dokonano porównania sumarycznej emisji sekundowej z poszczególnych cykli (rys. 12–14). Tak jak w poprzednim przypadku najmniejsze różnice wystąpiły w przypadku układu klimatyzacji z zaimplementowaną sprężarką elektryczną (C), natomiast największy przyrost emisji wystąpił dla rozwiązania A. Różnice pomiędzy układami włączonymi, a wyłączonymi są większe niż w przypadku wartości osiągniętych podczas testu jezdny. Wynika to z faktu, iż przy wyłączonych układach obciążenie jednostki spalinywej jest niewielkie – silnik pokonuje opory wewnętrzne związane przede wszystkim z tarciami i napędem pomp. Po włączeniu dodatkowych układów klimatyzacji obciążenie jednostki

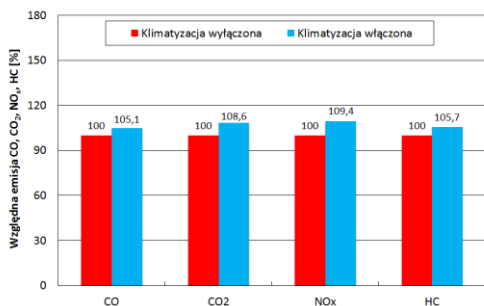
znacząco wzrasta, co bezpośrednio wpływa na zwiększenie emisji sekundowej.



Rys. 12. Względne wartości emisji drogowej podczas badań w czasie postoju – układ klimatyzacji A



Rys. 13. Względne wartości emisji drogowej podczas badań w czasie postoju – układ klimatyzacji B



Rys. 14. Względne wartości emisji drogowej podczas badań w czasie postoju – układ klimatyzacji C

Po przeprowadzeniu dodatkowej analizy przebiegu temperatur podczas wszystkich pomiarów stwierdzono, że układy klimatyzacji działały z podobną sprawnością, to znaczy osiągały podobną różnicę temperatur w podobnym czasie. W przypadku badań podczas postoju średnia różnica wynosiła 5,5°C w czasie 300 s. Podczas testów jezdnych SORT 1 średnia osiągnęła wartość 2,3°C.

Ze względu na zakres badań trudno było uzyskać w każdym cyklu taką samą temperaturę początkową. Z tego powodu podczas analiz pod uwagę brano była zawsze różnica między temperaturą początkową, a końcową w danym punkcie wnętrza pojazdu. Uzyskane wyniki wskazują, że najwyższe temperatury panują w punkcie P5 (tylna część autobusu, obok komory silnika), a najniższe w punkcie P0 (przednie drzwi, obok przedziału kierowcy).

## 4. Podsumowanie

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań emisyjnych autobusów miejskich wyposażonych w różnego rodzaju układy klimatyzacji. Na podstawie porównania otrzymanych wartości możliwe było określenie procentowego wpływu danego rozwiązania na emisyjność pojazdu.

Otrzymane wyniki wskazują, iż każdorazowe włączenie układu klimatyzacji powodowało wzrost emisji. Największe wartości uzyskano w przypadku rozwiązania konwencjonalnego wykorzystującego sprężarkę mechaniczną (A). Układy B i C budowane w technologii lekkiej uzyskały mniejsze wartości, z czego najmniejszy wpływ na emisję miał system wykorzystujący sprężarkę elektryczną. Wszystkie systemy charakteryzowały się podobną sprawnością działania, która została określona na podstawie różnic temperatur w danych punktach pojazdu podczas testów.

Na podstawie zmierzonych wartości emisji obliczono zużycie paliwa metodą carbon balance. We wzorze konieczne jest użycie emisji drogowej [1], dla tego zużycie paliwa wyznaczono tylko dla testów jezdnych SORT 1:

$$FC_w = \frac{1155}{\rho_{fuel}} \cdot [(0,866 \cdot HC) + (0,429 \cdot CO) + (0,273 \cdot CO_2)]$$

gdzie:

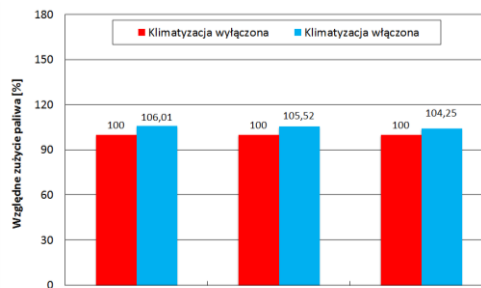
FC – zużycie paliwa,

HC, CO, CO<sub>2</sub> – emisja składników szkodliwych [g/km],

$\rho_{fuel}$  – gęstość paliwa testowego w 15°C [g/cm<sup>3</sup>].

Na rys. 15 przedstawiono względne porównanie uzyskanych wartości, które ukształtowało się następująco:

- układ klimatyzacji A zwiększenie o 6,01 %,
- układ klimatyzacji B zwiększenie o 5,52 %,
- układ klimatyzacji C zwiększenie o 4,25 %.



Rys. 15. Względne wartości zużycia paliwa uzyskane w teście SORT 1 – układy klimatyzacji A, B, C

Na podstawie przeprowadzonych testów jezdnych odzwierciedlających warunki eksploatacji pojazdu w centrum aglomeracji można sformułować wniosek, iż najwłaściwszym rozwiązaniem jest stosowanie układów klimatyzacji budowanych w technologii ultra lekkiej wykorzystujących sprężarki elektryczne.

---

## Nomenclature/Skróty i oznaczenia

FID	Flame Ionization Detector/ <i>analizator płomieniowo-jonizacyjny</i>	PEMS	Portable Emissions Measurement Systems/ <i>mobilna aparatura do pomiaru emisji</i>
NDIR	Non-Dispersive Infrared/ <i>analizator niedyspersyjny wykorzystujący promieniowanie podczerwone</i>	SORT	Standardised On – Road Tests/ <i>standaryzowany test jezdny wykonywany w rzeczywistych warunkach eksploatacji</i>
NDUV	Non-Dispersive Ultraviolet/ <i>analizator niedyspersyjny wykorzystujący promieniowanie ultrafioletowe</i>		

---

## Bibliography/Literatura

- [1] Gao Y., Checkel M.D.: Experimental Measurement of On-Road CO<sub>2</sub> Emission and Fuel Consumption Functions. SAE Technical Paper Series 2007-01-1610.
- [2] Gis W., Gis M.: Selected issues related to the reduction of the CO<sub>2</sub> emission from combustion engines fitted in vehicles of the M and N categories; a 2012 update. Combustion Engines / Silniki Spalinowe nr 1/2012 (148), p. 53-61, (2012).
- [3] Gaziński B. (red.), Technika klimatyzacyjna dla praktyków: Klimatyzacja pojazdów samochodowych. Systherm D. Gazińska, Poznań 2009.
- [4] Józwiak J., Gaziński B., Szmajter T.: Sposoby klimatyzacji autobusów. Chłodnictwo & Klimatyzacja 9/2008.
- [5] Merksiz J., Fuc P.: The Exhaust Emission from Light Duty Vehicles in Road Test in Urban Traffic. SAE Technical Paper Series 2010-01-1558, (2010).
- [6] Sensors Inc., Emissions measurement solutions. SEMTECH®-DS On Board In – Use Emissions Analyzer, Erkrath 2010.

Mr Maciej Bajerlein, DEng. – doctor in the Faculty of Machines and Transport at Poznan University of Technology.

*Dr inż. Maciej Bajerlein – adiunkt na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej.*



Mr Dariusz Michalak, MSc, Eng. – Member of the Solaris Bus & Coach Management Board responsible for Research & Development.

*Mgr inż. Dariusz Michalak – członek Zarządu firmy Solaris Bus & Coach S.A. odpowiedzialny za obszar Badań i Rozwoju.*



Mr Lukasz Rymaniak, MSc, Eng. – PhD student in the Faculty of Machines and Transport at Poznan University of Technology.

*Mgr inż. Łukasz Rymaniak – doktorant na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej.*

