

June 1, 2016

Ocena ekspozycji budynku wielorodzinnego na wpływ emisji benzenu ze stacji paliw oraz transportu drogowego w okresie letnim

Marek Bogacki
Robert Oleniacz
Adriana Szulecka

Marek BOGACKI*, Robert OLENIACZ*, Adriana SZULECKA*

OCENA EKSPOZYCJI BUDYNKU WIELORODZINNEGO NA WPŁYW EMISJI BENZENU ZE STACJI PALIW ORAZ TRANSPORTU DROGOWEGO W OKRESIE LETNIM

Poziom stężenia benzenu w powietrzu miejskim w okresie letnim kształtowany jest głównie (z wyjątkiem obszarów uprzemysłowionych) przez emisję z pojazdów samochodowych oraz ze stacji paliw. Celem badań była ocena ekspozycji wielorodzinnego, pięciokondygnacyjnego budynku mieszkalnego zlokalizowanego w centrum Krakowa na oddziaływanie benzenu emitowanego z pobliskiej stacji paliw oraz z transportu drogowego. Określenie rozkładu przestrzennego stężeń benzenu w rejonie ocenianego budynku dokonano metodą pomiarową z użyciem 10 próbników pasywnych ekspozycyjnych przez okres 32 dni na przełomie maja i czerwca 2015 r. W pracy odniesiono się także do podobnych badań prowadzonych na świecie oraz wcześniejszej oceny ekspozycji przedmiotowego budynku na stężenia benzenu w powietrzu wykonanej metodą modelowania matematycznego.

1. WPROWADZENIE

Benzen (C_6H_6) należy do grupy węglowodorów aromatycznych. W temperaturze otoczenia jest cieczą bezbarwną, lotną, wonną, cięższą od wody i nierozpuszczającą się w niej [2]. Benzen emitowany jest do atmosfery w ponad 90% ze źródeł antropogenicznych, spośród których największy udział stanowią środki transportu (80–85%), przemysł naftowy i poszukiwawczy (do ok. 7,5%), przemysł chemiczny (do ok. 13%) i energetyka komunalna (do ok. 7%) [1, 7, 9, 16, 23]. Naturalnym źródłem emisji benzenu są m. in. pożary lasów, otwarte spalanie biomasy czy emisja biogeniczna [3, 9]. Źródła emisji benzenu znajdują się również wewnątrz budynków (mieszkania, biura, szkoły, restauracje, warsztaty rzemieślnicze, punkty usługowe itp.), przez co wpływa-

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, Katedra Kształtowania i Ochrony Środowiska, al. A. Mickiewicza 30, 30 059 Kraków.

ją one w sposób bezpośredni i istotny na zdrowie człowieka, który spędza w pomieszczeniach zamkniętych ok. 70% czasu swego życia [6].

Poziom stężenia benzenu w powietrzu atmosferycznym kształtowany jest przede wszystkim poprzez pole jego emisji, ale też poprzez czynniki determinujące jego dyspersję w atmosferze takie jak: orografia, meteorologia i przemiany chemiczne. Benzen w atmosferze ulega utlenianiu, a tym samym zanikaniu w reakcjach z rodnikami np. rodnikiem OH^* . Produktami jego rozpadu mogą być: fenol, glioksal, heksa-2,4-dien, butanediał, tlenek benzenu czy oxepin [7]. Benzen jest prekursorem tworzenia się ozonu oraz azotanu nadtlenu acetylu (ang. PAN), jak również tworzy wtórne aerozole organiczne [3, 4]. Jego okres przebywania w atmosferze jest silnie zdeterminowany składem chemicznym atmosfery oraz panującymi warunkami meteorologicznymi. Przy średniej dobowej zawartości rodnika OH^* na poziomie 10^6 mola/cm^3 średni czas przebywania benzenu w troposferze wynosi 9 dni, natomiast w atmosferze silnie zanieczyszczonej, bogatej w rodniki (np. w obszarach miejsko-przemysłowych), średni czas przebywania benzenu w atmosferze może zostać skrócony do 1 doby lub nawet 1 godziny (przypadek kanionu ulicznego, małej prędkości wiatru, wysokiej temperatury powietrza i silnego nasłonecznienia) [7].

Liczne badania naukowe potwierdzają negatywny wpływ benzenu na zdrowie człowieka [5, 6, 8, 11–17, 26–28]. Dostaje się on do organizmu przede wszystkim poprzez układ oddechowy. Przykładowo średnio w ciągu doby Amerykanin przyjmuje dawkę 320 μg benzenu (zakres: 180–1300 μg). Dużym źródłem indywidualnej ekspozycji na pary benzenu jest palenie papierosów. Przeciętny palacz przyjmuje dziennie dawkę benzenu ok. 1800 μg , natomiast palacz bierny ok. 50 μg . Wysoka ekspozycja na pary benzenu ma miejsce również podczas jazdy samochodem (stężenia wewnątrz samochodu: 10–120 $\mu\text{g/m}^3$), podczas tankowania samochodu (nalewak bez systemu odzysku par: 0,01–2,7 mg/m^3 ; nalewak z systemem odzysku par – do 130 $\mu\text{g/m}^3$) [7]. Długotrwała ekspozycja człowieka na działanie par benzenu i innych BTEX obecnych w powietrzu może prowadzić do zwiększenia ryzyka wystąpienia poważnych chorób układu sercowo-naczyniowego, oddechowego, nerwowego oraz może być przyczyną raka (np. białaczki). Badania czeskich uczonych [27] prowadzone na ciężarnych kobietach wskazują również na wpływ benzenu na masę ciała i obwód głowy niemowląt. Ekspozycja matek na zanieczyszczenia komunikacyjne, w tym benzen, może prowadzić do zmniejszenia masy i obwodu głowy urodzonych dzieci.

Świadomość niekorzystnego wpływu par benzenu w powietrzu na zdrowie ludzi doprowadziła do wprowadzenia regulacji w zakresie wartości dopuszczalnej stężenia benzenu w powietrzu. W państwach Unii Europejskiej wartość dopuszczalna stężenia benzenu w powietrzu uśredniona do okresu roku została ustalona na poziomie 5 $\mu\text{g/m}^3$. Poziom ten jest zwykle dochowywany w obszarach wiejskich, niezurbanizowanych, natomiast w obszarach miejskich oraz przemysłowych zdarzają się przekroczenia wartości dopuszczalnej. Wynikać to może z nałożenia na siebie oddziaływania emisji z transportu drogowego i dystrybucji paliw silnikowych oraz emisji

z innych źródeł emisji (w tym emisji z przemysłu i palenisk domowych). Szczególnie interesujące wydaje się być rozgraniczenie udziału ww. źródeł w kształtowaniu stężeń benzenu w powietrzu, a w szczególności źródeł związanych z dystrybucją i spalaniem paliw stosowanych w transporcie drogowym. W niniejszej pracy podjęto się próby oceny czynników wpływających na zmienność stężeń benzenu w powietrzu oraz ekspozycji na jego stężenia przykładowego budynku wielorodzinnego zlokalizowanego w Krakowie w pobliżu stacji paliwowej i stosunkowo ruchliwego skrzyżowania.

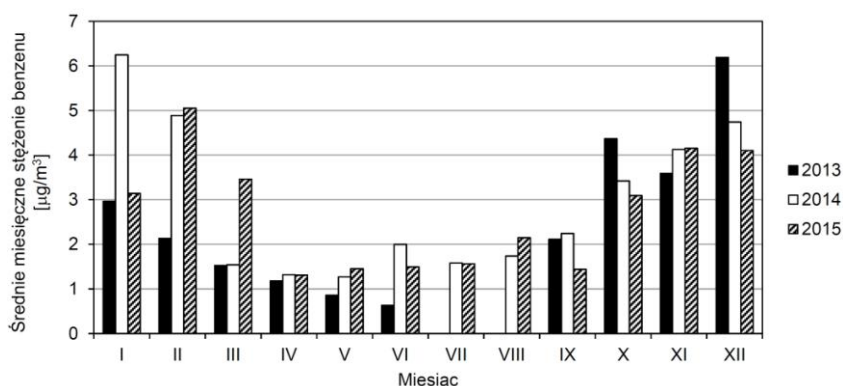
2. ZMIENNOŚĆ STĘŻEŃ BENZENU W POWIETRZU

Analiza źródeł literaturowych dotyczących badań poziomu stężenia benzenu w powietrzu wskazuje, że zależy ono w dużej mierze od lokalnego pola emisji benzenu, ale też od warunków meteorologicznych czy orografii determinującej lokalne warunki propagacji zanieczyszczeń w powietrzu. Na przykład w obszarach wiejskich (stacje tła/odniesienia) stężenia benzenu kształtują się na poziomie: Schwarzwald-Süd (Niemcy) – $0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ [7], Dylaki (woj. opolskie) – $2,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (wartość uśredniona dla okresu pomiaru: 15.01–14.02.2012 r.) [25]. Stosunkowo wysokie jak dla obszarów wiejskich stężenie benzenu w Dylakach jest rezultatem oddziaływania na tę wieś emisji z trasy komunikacyjnej o natężeniu 2,8 tys. poj./dobę oraz emisji z palenisk domowych (140 gospodarstw). Z kolei obserwowane w obszarach miejskich (wybrane miasta) stężenia średnioroczne benzenu w powietrzu kształtują się na poziomie: Kopenhaga (Dania) – $2,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Coruna (Hiszpania) – $3,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Rzym (Włochy) – $2,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Antwerpia (Belgia) – $1,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ [18], Gdańsk – $0,75 \pm 0,67 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Gdynia – $0,66 \pm 0,51 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Sopot – $0,63 \pm 0,55 \mu\text{g}/\text{m}^3$ [21].

Największe stężenia benzenu rejestrowane są w obszarach przemysłowych. Przykładowo w Dilovasi, przemysłowym mieście w północnej Turcji (wybrzeże morza Marmara) stężenia mierzone metodą pasywną, uśrednione dla okresu 4.05-27.07 kształtowały się na poziomie $3,8 \pm 0,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, a stężenia chwilowe (1-godzinne) mierzone metodą aktywną (pobór rurkami sorpcyjnymi a następnie analiza przy pomocy chromatografu gazowego) we wspomnianym okresie wynosiły $13,3 \pm 11,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, przy czym największe stężenia obserwowano rano i wieczorem a najmniejsze w południe [10]. Podobne badania prowadzono również w rejonie przemysłowego miasta Aliaga (Turcja) leżącego nad Morzem Egejskim, gdzie pobrano metodą pasywną w okresie roku 152 próbki (po 38 w każdej porze roku) uzyskując średnioroczne stężenie benzenu na poziomie $2,7 \pm 4,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, przy zakresie mierzonych stężeń: $0,42\text{--}30,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Największe stężenia rejestrowane były w lecie, a najniższe w zimie, co wskazuje na parowanie paliw ze zbiorników z zakładów petrochemicznych jako wiodący mechanizm emisji benzenu w analizowanym rejonie [9].

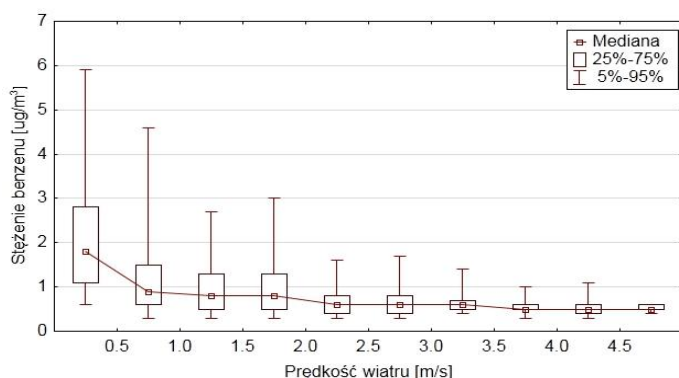
Prowadzone przez Karakitsiosa badania nad stężeniami benzenu w powietrzu kanionu ulicznego w miejscowości Joannina (północno-zachodnia Grecja) wykazały analogiczną, jak w przypadku badań tureckich, tendencję zmienności sezonowej stężeń w powietrzu, gdzie największe poziomy stężenie obserwowano w lecie (śr. $53,78 \mu\text{g}/\text{m}^3$), następnie w jesieni (śr. $51,49 \mu\text{g}/\text{m}^3$), na wiosnę (śr. $44,61 \mu\text{g}/\text{m}^3$) oraz w zimie (śr. $38,81 \mu\text{g}/\text{m}^3$) [18]. Z kolei badania Tecera prowadzone w prowincji Balikesir (północno-zachodnia Turcja) wskazują na istotny wpływ składu atmosfery na poziom benzenu w powietrzu w różnych porach roku. Szczególnie duże znaczenie ma zawartość ozonu w powietrzu, który w istotny sposób w okresie wysokiego nasłonecznienia przyczynia się do zmniejszania stężenia benzenu w powietrzu. Zarejestrowane przez Tecera stężenia w okresie zimowym i letnim w obszarze miejskim wynosiły odpowiednio $7,77$ i $1,14 \mu\text{g}/\text{m}^3$, a w obszarze wiejskim – $1,25$ i $0,73 \mu\text{g}/\text{m}^3$ [29].

Pomiary stężeń benzenu w powietrzu poczynawszy od roku 2005 prowadzone są również na stacji automatycznego monitoringu powietrza Kraków-Nowa Huta (zlokalizowanej przy ul. Bulwarowej), początkowo metodą pasywną (lata 2005-2012), a następnie metodą automatyczną (od roku 2013). Wartości stężeń średniorocznych zmierzone na tej stacji w latach 2005–2015 wynosiły odpowiednio: $5,50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (2005), $5,91 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (2006), $4,46 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (2007), $4,38 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (2008), $3,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (2009), $3,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (2010 i 2011), $4,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (2012) i $2,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (2013–2015) [30], a więc utrzymywały się poniżej poziomu powiększonego o odpowiedni margines tolerancji. Miesięczną zmienność stężenia benzenu w powietrzu zanotowaną na ww. stacji monitoringowej w latach 2013–2015 przedstawiono na rys. 1. Wynika z niej, że poziom stężenia benzenu w Krakowie w okresie zimowym jest zdecydowanie wyższy niż w okresie letnim, co jest efektem zarówno gorszych warunków dyspersji i utleniania benzenu w powietrzu w chłodnej porze roku, jak również zwiększonej emisji benzenu pochodzącej z palenisk domowych, energetyki zawodowej oraz pojazdów samochodowych (większy udział tzw. zimnej emisji z silników spalinowych).

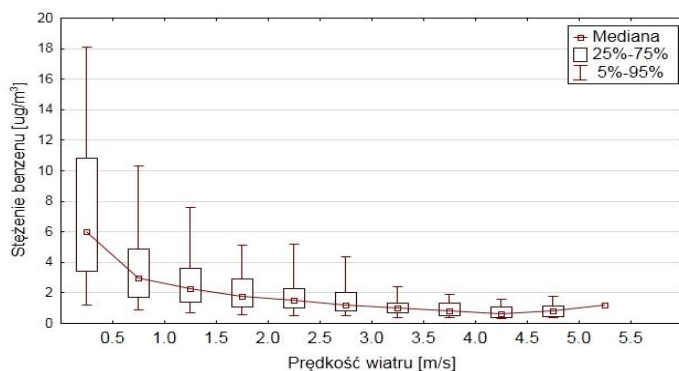


Rys. 1. Stężenia średniomiesięczne benzenu w powietrzu zmierzone na stacji monitoringu jakości powietrza Kraków – Nowa Huta w latach 2013-2015 (opracowanie własne na podstawie [30])

Na poziom stężeń benzenu w powietrzu w Krakowie istotny wpływ ma także wiele parametrów meteorologicznych, w tym insolacja, temperatura powietrza, głębokość warstwy mieszania i prędkość wiatru [24]. Na rys. 2 i 3 przedstawiono odpowiednio dla okresu letniego (sezonu pozagrzewczego) i zimowego (sezonu grzewczego) zależność pomiędzy zmierzonymi w roku 2015 1-godzinnymi wartościami stężeń benzenu na stacji monitoringu powietrza Kraków – Nowa Huta a występującymi na tej stacji prędkościami wiatru. Wynika z nich, że zmienność prędkości wiatru w zakresie od 0 do 2,5 m/s w sposób istotny determinuje poziom stężeń benzenu w powietrzu. Przy wyższych prędkościach wiatru wpływ tego parametru nie jest już istotny.



Rys. 2. Rozkład stężeń 1-godzinnych benzenu w powietrzu w Krakowie (stacja Nowa Huta) w funkcji prędkości wiatru w sezonie pozagrzewczym (IV – IX 2015 r.)



Rys. 3. Rozkład stężeń 1-godzinnych benzenu w powietrzu w Krakowie (stacja Nowa Huta) w funkcji prędkości wiatru w sezonie grzewczym (I – III i X – XII 2015 r.)

Podobne badania prowadzone w obszarach o różnym typie zurbanizowania w kilkudziesięciu państwach europejskich wskazują, że w państwach Europy zachodniej, wschodniej i północnej stężenia benzenu w okresie zimowym są zwykle wyższe niż

w okresie letnim, co wynika przede wszystkim z większego udziału w chłodnym okresie roku warunków meteorologicznych, nie sprzyjających dobrej dyspersji zanieczyszczeń w powietrzu (duży udział ciszy, duża częstość występowania stałego stanu równowagi atmosfery i niskich pułapów występowania warstwy inwersyjnej) [7, 18, 20–22, 31].

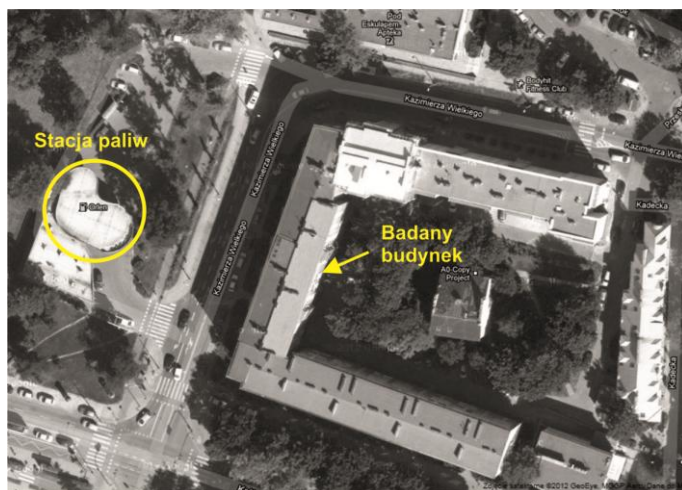
Ekspozycja ludności na oddziaływanie benzenu nie odbywa się jedynie poprzez powietrze zewnętrzne, ale w zdecydowanej większości czasu życia człowieka poprzez powietrze wewnętrzne. Wg badań prowadzonych przez Svecovą, poddani badaniom pracownicy biurowi z Ostrawy (Republika Czeska) deklarowali, że 75–87% czasu doby spędzają w pomieszczeniach zamkniętych, z czego 50% w domu. Ich ekspozycja dobową na benzen wynosiła $7,17 \pm 2,92 \mu\text{g}/\text{m}^3$ w okresie zimowym i $5,93 \pm 3,24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ w okresie letnim [28]. Istnieje wiele badań naukowych wskazujących jak ekspozycja na benzen badanej populacji ludzi koreluje ze stężeniami mierzonymi w pomieszczeniach, gdzie ludzie przebywają, oraz ze stężeniami w powietrzu zewnętrznym. Przykładem mogą być badania ekspozycji na benzen uczniów dwóch szkół podstawowych w mieście Eskişehir (Turcja), z których jedna szkoła znajdowała się w mieście a druga pod miastem. Uśredniony poziom ekspozycji na benzen dla obu populacji uczniów wynosił $1,68 \pm 1,18 \mu\text{g}/\text{m}^3$, przy czym stężenie benzenu wewnątrz pomieszczeń szkolnych wynosiło $2,29 \pm 2,01 \mu\text{g}/\text{m}^3$ natomiast na zewnątrz budynku $1,23 \pm 0,93 \mu\text{g}/\text{m}^3$, a więc było niższe niż w budynku szkolnym. Udział stężenia mierzonego w budynku szkolnym w stosunku do stężenia w powietrzu zewnętrznym dla pobranych próbek wahał się w granicach $0,4$ – $2,39 \mu\text{g}/\text{m}^3$ i w większości przypadków stężenie benzenu w powietrzu wewnętrznym było większe niż w powietrzu zewnętrznym [8]. Podobne wyniki badań przedstawiają m.in. prace [6, 11, 13, 17].

2. CEL I METODYKA BADAŃ

Celem badań przedstawionych w pracy była ocena ekspozycji na stężenia benzenu w okresie letnim budynku wielorodzinnego pozostającego pod wpływem bezpośredniego oddziaływania emisji niezorganizowanej z pobliskiej stacji paliw i ruchu samochodowego odbywającego się wzdłuż sąsiednich ulic.

Badaniami objęto budynek wielorodzinny, pięciokondygnacyjny zlokalizowany przy ul. Kazimierza Wielkiego w Krakowie (dzielnica Krowodrza) oraz jego najbliższe sąsiedztwo. Na rys. 4 przedstawiono plan sytuacyjny obszaru badań z zaznaczeniem położenia stacji paliwowej oraz analizowanego budynku. Pomiary benzenu wykonano w 10 punktach pomiarowych (zaznaczonych na rys. 5 i 6) metodą pasywną według *Metodyki pasywnej oznaczania benzenu z desorpcją disiarczkiem węgla* opracowanej w Zakładzie Chemii Analitycznej Instytutu Chemii i Technologii Nieorganicznej Politechniki Krakowskiej, pod kierunkiem dr inż. Andrzeja Kaliny. Próbniki

eksponowane były przez 32 doby począwszy od dnia 20.05.2015 r. W analizowanym okresie średnia temperatura powietrza wynosiła $17,22 \pm 4,16$ °C i zmieniała się w zakresie 11–26 °C. Dominowały wiatry z kierunku zachodniego i południowo-zachodniego (łącznie ponad 45% czasu). Wiały one ze średnią prędkością $1,80 \pm 0,52$ m/s i zmieniały się w zakresie 0,39–5,54 m/s. Epizody opadu atmosferycznego zanotowano w ciągu 15 dni. Wielkość opadu w ocenianym okresie wyniosła 53 mm.



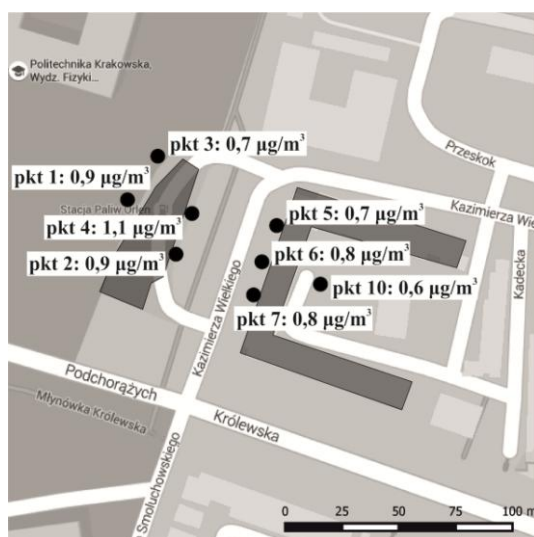
Rys. 4. Widok z góry badanego budynku oraz stacji paliwowej

3. WYNIKI BADAŃ I DYSKUSJA

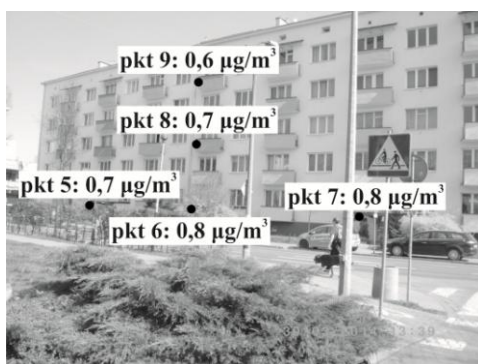
Na rys. 5 i 6 przedstawiono lokalizację punktów pomiarowych wraz informacją dotyczącą wartości zmierzonego stężenia benzenu w powietrzu, przy czym punkty nr 1–4 zlokalizowane były w najbliższym sąsiedztwie stacji benzynowej, punkty nr 5–9 na elewacji budynku poddawanego ocenie, natomiast punkt nr 10 znajdował się za budynkiem (od strony wschodniej). W punktach pomiarowych nr 1–7 oraz nr 10 próbniki zawieszono na wysokości 3 m n.p.t., natomiast próbniki nr 8 i 9 zawieszono odpowiednio na wysokości 10 i 16 m n.p.t.

Okres ekspozycji próbników cechował się dużą zmiennością temperatury powietrza (11–26 °C), wielkością opadów atmosferycznych poniżej średniej wieloletniej dla Krakowa wynoszącej 84 mm oraz średnimi prędkościami wiatru do 2 m/s. W okresie ekspozycji próbników średnia temperatura powietrza była wyższa od średniej wielo-

letniej temperatury dla Krakowa dla tego okresu wynoszącej 14,8 °C. W czasie trwania badań panowały więc warunki w sposób umiarkowany sprzyjające procesom parowania paliw dystrybuowanych na stacji benzynowej, jak również sprzyjające parowaniu paliw z pojazdów poruszających się po drogach. Z drugiej strony wyższe niż średnie wieloletnie wartości temperatury powietrza czy większe nasłonecznienie to warunki sprzyjające fotochemicznemu utlenianiu benzenu, a więc jego zanikaniu.



Rys. 5. Lokalizacja punktów pomiarowych nr 1–7 i 10 z naniesionymi wartościami zmierzonych stężeń benzenu



Rys. 6. Lokalizacja punktów pomiarowych nr 5–9 z naniesionymi wartościami zmierzonych stężeń benzenu

Najwyższe wartości stężeń benzenu zarejestrowano w punktach: nr 1 (zlokalizowanym w odległości 6 m od dystrybutora paliw), nr 2 (zlokalizowanym w odległości

4 m od dystrybutora paliw) oraz nr 4 (zlokalizowanym w odległości 4 m od dystrybutora paliw oraz 2 m od odpowietrzników zbiorników podziemnych). Mieściły się one w zakresie $0,9\text{--}1,1\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ (rys. 5). Pomimo, że analizowane próbники umieszczone były w bezpośrednim sąsiedztwie dystrybutorów paliw, a dodatkowo w pobliżu ruchliwej drogi, zmierzone stężenia były niższe niż średnie miesięczne stężenia zanotowane na stacji monitoringu jakości powietrza Kraków-Nowa Huta, które odpowiednio dla miesiąca maja i czerwca 2015 r. wynosiły 1,45 i $1,49\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ (rys. 1). Należy jednak dodać, że stacja ta także pozostaje pod oddziaływaniem stacji paliwowej położonej w jej pobliżu i ruchliwej drogi oraz dodatkowo emisji z kilku dużych zakładów przemysłowych, w tym huty stali. Nieco niższe, bo w zakresie $0,7\text{--}0,8\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ stężenia benzenu w powietrzu zarejestrowane zostały przy drodze dojazdowej do stacji paliw (punkt nr 3) oraz wzdłuż ul. Kazimierza Wielkiego (punkty nr 5–7 zlokalizowane przy wejściach do klatek schodowych w odległości 0,5 m od elewacji ocenianego budynku na wysokości 3 m n.p.t., rys. 6). Punkty nr 6 i 7 cechowały stężenia o $0,1\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ wyższe niż w punktach nr 3 i 5, co prawdopodobnie wynikało z mniejszego oddziaływania na nie stacji paliw.

W ramach badań oceniano również zmienność stężenia benzenu przy elewacji budynku w funkcji wysokości n.p.t. Wyniki stężeń uzyskane na poziomie parteru (punkt nr 6), 2 piętra (punkt nr 8) i 4 piętra (punkt nr 9) wskazują na liniowy spadek stężenia o $0,1\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ w funkcji wysokości n.p.t. Badania prowadzone w 2010 r. w zakresie ekspozycji przedmiotowego budynku na oddziaływanie emisji komunikacyjnej z ul. Kazimierza Wielkiego oraz ze stacji paliw, opisane w pracy [2], wskazują na wykładniczy spadek stężenia benzenu w powietrzu w funkcji wysokości n.p.t. Oparta na modelowaniu matematycznym ocena zmienności stężenia w funkcji wysokości budynku dotyczyła stężeń maksymalnych 1-godzinnych, odniesionych dla potencjalnie najbardziej niekorzystnych warunków meteorologicznych i emisyjnych. Wyliczone skumulowane oddziaływanie drogi oraz stacji benzynowej pozwalało na określenie maksymalnych wartości stężenia benzenu na poziomie parteru, 2 piętra oraz 4 piętra analizowanego budynku odpowiednio na poziomie 30, 10 i $5\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ [2]. Opisane w pracy [2] badania modelowe wskazywały, że poziom stężeń benzenu w pobliżu budynku kształtowany jest głównie przez emisję z drogi. Obliczenia numeryczne wykazały wówczas, że udział stacji paliwowej w skumulowanym poziomie stężenia benzenu przy elewacji budynku nie przekracza kilku procent.

Pomiary stężenia metodą pasywną nie dały jednoznacznej odpowiedzi, które źródło emisji benzenu wywiera większą antropopresję na oceniany budynek. Wprawdzie większe stężenia benzenu były zmierzone w bezpośrednim otoczeniu stacji paliwowej, lecz nie można w oparciu o te fakty szacować udziałów poszczególnych źródeł w poziomach rejestrowanych w powietrzu stężeń.

W ramach przeprowadzonych pomiarów oceniono również ekspozycję wschodniej strony budynku na stężenia benzenu wykonując pomiar w punkcie nr 10 (rys. 5). W punkcie tym uzyskano stężenie benzenu na poziomie $0,6\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$. Pomiar ten miał

zweryfikować, czy kształt budynku (litera U), a tym samym utrudnione warunki przewietrzania dziedzińca budynku, będą skutkować większymi stężeniami zanieczyszczeń komunikacyjnych, które teoretycznie mogą się tam kumulować (zatręzać). Wprawdzie nie można wykluczyć zaistnienia takich sytuacji, jednak uzyskany najniższy ze wszystkich badanych punktów wynik stężenia benzenu sugeruje, że przy wiatrach zachodnich, północnych i południowych ściany budynku skutecznie rozpraszają zanieczyszczenia emitowane z drogi i stacji paliwowej (następuje wyniesienie i przetransportowanie zanieczyszczeń na dalszą odległość). Przy wiatrach wschodnich natomiast prawdopodobnie następuje intensywne przewietrzanie dziedzińca budynku, co skutkuje spadkiem stężeń zanieczyszczeń komunikacyjnych.

4. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone w mikroskali (10 punktów pomiarowych rozlokowanych w niewielkiej odległości od siebie) pomiary stężenia benzenu w powietrzu pozwoliły oszacować ekspozycję budynku wielorodzinnego na presję emisji z dróg oraz ze stacji paliwowej w okresie letnim. Średni miesięczny poziom stężenia benzenu w powietrzu w pobliżu elewacji budynku w analizowanym okresie (maj/czerwiec 2015) mieścił się w zakresie $0,6\text{--}0,8\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$, co stanowiło 12–16% dopuszczalnego poziomu stężenia średniorocznego. Nieco większe stężenia benzenu ($0,9\text{--}1,1\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$) obserwowane były w bezpośrednim sąsiedztwie stacji paliwowej. Badania te wykazały także liniowy spadek stężenia benzenu w powietrzu w funkcji wysokości budynku.

Poziom stężeń benzenu zarejestrowanych w badanych punktach pomiarowych był niższy niż na stacji automatycznego monitoringu powietrza Kraków-Nowa Huta, zlokalizowanej w innej, bardziej uprzemysłowionej części Krakowa także w pobliżu stacji paliwowej. Badania te miały charakter pilotażowy. W przyszłości planuje się ocenę ekspozycji budynku na benzen w okresie całego roku wraz z badaniami powietrza wewnętrznego oraz oceną ekspozycji mieszkańców na oddziaływanie tego kancerogennego zanieczyszczenia.

PODZIĘKOWANIE

Autorzy pragną podziękować członkom Koła Naukowego Inżynierii Ochrony Powietrza działającego przy Wydziale Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska AGH, a szczególnie Paniom Paulinie Bździuch oraz Angelice Zemelka za pomoc w realizacji badań, a także WIOŚ w Krakowie za udostępnienie danych meteorologicznych.

Praca powstała w ramach badań statutowych AGH nr 11.11.150.008.

LITERATURA

- [1] BOGACKI M., MACUDA J., *The influence of shale rock fracturing equipment operation on atmospheric air quality*, Archives of Mining Sciences, 2014, Vol. 59, No. 4, 897–912.
- [2] BOGACKI M., *Ocena ekspozycji budynku wielorodzinnego na zanieczyszczenia powietrza pochodzące z komunikacji i stacji paliwowej na przykładzie benzenu*, [w:] Ochrona powietrza atmosferycznego: wybrane zagadnienia, pod red. A. Musialik-Piotrowskiej i J. D. Rutkowskiego, Wyd. PZITS, Wrocław 2012, 55–64.
- [3] BOGACKI M., SYGUŁA P., *Emisje biogeniczne lotnych związków organicznych do powietrza: wskaźniki emisji, metody modelowania*, Wydawnictwa AGH, Kraków, 2014.
- [4] BOGACKI M., SYGUŁA P., *The impact of biogenic volatile organic compounds emission on photochemical processes occurring in the troposphere*, Geomatics and Environmental Engineering, 2013, Vol. 7, No. 1, 37–46.
- [5] CHATZIS C. at al., *Indoor and outdoor personal exposure to benzene in Athens, Greece*, Science of the Total Environment, 2005, Vol. 349, 72–80.
- [6] COLMAN LERNER J.E. at al., *Characterization and health risk assessment of VOCs in occupational environments in Buenos Aires, Argentina*, Atmospheric Environment, 2012, Vol. 55, 440–447.
- [7] COMMISSION OF EUROPEAN COMMUNITIES, Council Directive on Ambient Air Quality Assessment and Management, Working Group on Benzene, *Benzene*, Instituto Inquinamento Atmosferico, 1998, 1–140.
- [8] DEMIREL G. at al., *Personal exposure of primary school children to BTEX, NO₂ and ozone in Eskişehir, Turkey: Relationship with indoor/outdoor concentrations and risk assessment*, Science of the Total Environment, 2014, Vol. 473–474, 537–548.
- [9] DUMANOGLU Y. at al., *Spatial and seasonal variation and source apportionment of volatile organic compounds (VOCs) in a heavily industrialized region*, Atmospheric Environment, 2014, Vol. 98, 168–178.
- [10] ERGENEKON P. at al., *Environmental air levels of volatile organic compounds by thermal desorption-gas chromatography in an industrial region*, Fresenius Environmental Bulletin, 2009, Vol. 18, No. 11, 1999–2003.
- [11] FONDELLI C. at al., *Benzene exposure in a sample of population residing in a district of Florence, Italy*, Science of the Total Environment, 2008, Vol. 392, 41–49.
- [12] FRACASSO M.E. at al., *Low air levels of benzene: Correlation between biomarkers of exposure and genotoxic effects*, Toxicology Letters, 2010, Vol. 192, 22–28.
- [13] FRUIN S.A. at al., *Reductions in human benzene exposure in the California South Coast Air Basin*, Atmospheric Environment, 2001, Vol. 35, 1069–077.
- [14] GEISS O. at al., *The AIRMEX study - VOC measurements in public buildings and schools/ kindergartens in eleven European cities: Statistical analysis of the data*, Atmospheric Environment, 2011, Vol. 45, 3676–3684.
- [15] GODOI R.H.M. at al., *Healthy environment - indoor air quality of Brazilian elementary schools nearby petrochemical industry*, Science of the Total Environment 2013, Vol. 463–464, 639–646.
- [16] GORDIAN M.E. at al., *Evaporative Gasoline Emissions and Asthma Symptoms*, International Journal of Environmental Research and Public Health, 2010, Vol. 7, 3051–3062.
- [17] HINWOOD A.L. at al., *Risk factors for increased BTEX exposure in four Australian cities*, Chemosphere, 2007, Vol. 66, 533–541.
- [18] KARAKITSIOS S.P. at al., *Assessment and prediction of benzene concentrations in a street canyon using artificial neural networks and deterministic models. Their response to “what if” scenarios*, Ecological Modelling, 2010, Vol. 193, 253–270.
- [19] KRÓL S. at al., *Measurement of benzene concentration in urban air using passive sampling*, Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2012, Vol. 403, 1067–1082.

- [20] MARĆ M. at al., *Application of passive sampling technique in monitoring research on quality of atmospheric air in the area of Tczew, Poland*, International Journal of Environmental Analytical Chemistry, 2013, 1–17.
- [21] MARĆ M. at al., *BTEX concentration levels in urban air in the area of the Tri-City agglomeration (Gdansk, Gdynia, Sopot), Poland*, Air Quality, Atmosphere & Health, 2014, Vol. 7, 489–504.
- [22] MARĆ M. at al., *The influence of meteorological conditions and anthropogenic activities on the seasonal fluctuations of BTEX in the urban air of the Hanseatic city of Gdansk, Poland*, Environmental Science and Pollution Research, 2015, Vol. 22, 11940–11954.
- [23] MARĆ M. at al., *The relationships between BTEX, NO_x and O₃ concentrations in urban air in Gdansk and Gdynia, Poland*, CLEAN – Soil, Air, Water, 2014, Vol. 41 (9999), 1–11.
- [24] OLENIACZ R., BOGACKI M., RZESZUTEK M., KOT A., *Meteorologiczne determinanty jakości powietrza w Krakowie*, [w:] Ochrona powietrza w teorii i praktyce. T. 2, pod red. J. Konieczynskiego, Wyd. IPIŚ PAN w Zabrzu, Zabrze 2014, 163–178.
- [25] OLSZOWSKI T., *Koncentracje i korelacje współwystępowania lotnych związków organicznych (BTEX) w powietrzu na obszarze wiejskim*, Proceedings of ECOpole, 2012, Vol. 6 (1), 375–381.
- [26] PROTANO C. at al., *Benzene exposure in childhood: Role of living environments and assessment of available tools*, Environment International, 2010, Vol. 36, 779–787.
- [27] SLAMA R. at al., *Maternal personal exposure to airborne benzene and intrauterine growth*, Environmental Health Perspectives, 2009, Vol. 117, No. 8, 1313–1321.
- [28] SVECOVA V. at al., *Personal exposure to volatile organic compounds in the Czech Republic*, Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology, 2012, Vol. 22, 455–460.
- [29] TECER L.H. at al., *Impact of Urbanization on Local Air Quality: Differences in Urban and Rural Areas of Balikesir, Turkey*, CLEAN – Soil, Air, Water, 2014, Vol. 42 (11), 1489–1499.
- [30] WIOŚ Kraków, System monitoring jakości powietrza, <http://monitoring.krakow.pios.gov.pl/>.
- [31] ZABIEGAŁA B. at al., *Application of passive sampling technique for monitoring of BTEX concentration in urban air: Field comparison of different types of passive samplers*, Journal of Chromatographic Science, 2010, Vol. 48, 167–175.

ASSESSMENT OF THE EXPOSURE OF A MULTIFAMILY BUILDING TO BENZENE EMISSIONS FROM FUEL STATION AND ROAD TRANSPORT IN THE SUMMER

Concentration level of benzene in urban air in the summer is determined primarily (excluding the industrial areas) by emissions originating from road vehicles and fuel stations. The aim of the study was to assess the exposure of a multifamily, five-storey residential building located in the Krakow city centre to the influence of benzene emitted from a nearby fuel station and road transport. Determination of the spatial distribution of benzene concentrations in the vicinity of evaluated building was conducted using measurement procedure with 10 passive samplers exposed over a period of 32 days at the turn of May and June 2015. In addition, the paper includes references to similar studies carried out throughout the world and to the previous exposure assessment of the subjected building to the benzene concentrations performed using mathematical modeling.