

Adam NYGARD*, Jarosław BARTOSZEWICZ*

KONCEPCJA SYSTEMU KONTROLI JAKOŚCI SPALIN EMITOWANYCH PRZEZ DOMOWE KOTŁY C.O. DO ATMOSFERY

W artykule zaprezentowano koncepcję nadzoru nad pracą urządzeń spalających paliwa kopalne, a w szczególności węgiel kamienny polegającą na monitorowaniu ilości związków emitowanych do atmosfery podczas ich eksploatacji. Dla przyjętych kryteriów celów badań zaprojektowano stanowisko pomiarowe, opracowano procedurę badawczą oraz wykonano badania zmierzające do określenia możliwości zdalnego kontrolowania składu spalin emitowanych do atmosfery z kotłów. W oparciu o dane zestawione w tabelach i na wykresach wykonano analizę i wskazano możliwości prowadzenia zdalnego monitoringu. Badania wykonano analizując paliwa stałe mieszane składające się z węgla kamiennego oraz różnych odpadów komunalnych. Charakterystyki czasowe emisji produktów spalania pozwoliły na wskazanie cech tych przebiegów wskazujących na zastosowanie niedozwolonego paliwa. W pracy przedstawiono zestaw urządzeń pozwalających na monitorowanie i archiwizację danych gromadzonych w urządzeniach grzewczych podczas konwersji energii chemicznej paliwa w energię użyteczną o postaci dostosowanej do procesu technologicznego realizowanego w przedsiębiorstwie.

SŁOWA KLUCZOWE: spalanie, konwersja energii, odpady komunalne, zdalny monitoring.

1. WPROWADZENIE

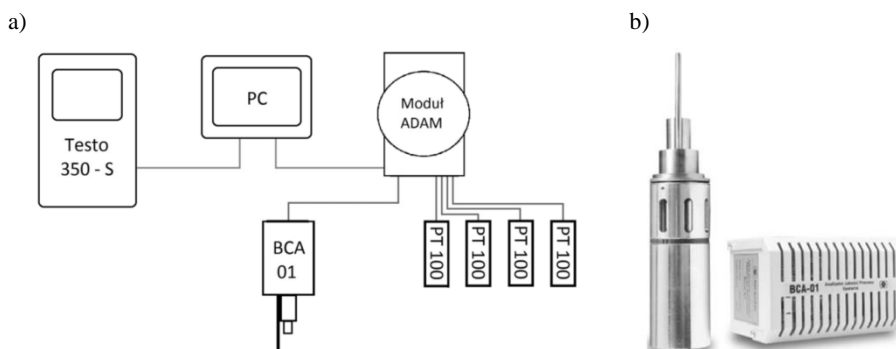
Narastający kryzys energetyczny w ostatnim roku spowodował szybki powrót do konwencjonalnych źródeł energii rozumianych jako paliwa kopalne nieodnawialne. Kryzys ten nie jest podyktowany w kraju, jak i w Europie brakiem światowych źródeł surowca w postaci węgla, ale zakłóceniem jego dostaw. W konsekwencji występuje lokalny i czasowy deficyt paliw stałych na rynku paliwowym. Strategia długoterminowa polegać ma na zapewnieniu stabilnych dostaw producentom z branży energetyki zawodowej dostarczających energię elektryczną. Skutkiem tego ogranicza się ilość paliwa dostępnego dla gospodarstw domowych. Powodować to może próbę wykorzystania odpadów komunalnych jako paliwa dodatkowego w procesach współspalania. Według raportu Światowej Organizacji Zdrowia (WHO) w pierwszej dziesiątce europejskich

* Politechnika Poznańska

miast o najwyższym stopniu zanieczyszczenia powietrza znajduje się aż siedem polskich miast [1, 2], przy czym w raporcie tym pominięte są kurorty wczasowe. W raporcie z 2018 r. przedstawiono jak duży wpływ na strukturę emisji zanieczyszczenia powietrza w Polsce ma sektor komunalno-mieszkaniowy [3]. Podstawowym powodem odpowiedzialnym za złą jakość powietrza w Polsce jest spalanie niskiej jakości paliw stałych oraz spalanie śmieci domowych przez sektor mieszkaniowy. Około 35% zużycia energii w budownictwie mieszkaniowym na cele grzewcze związane jest ze spalaniem węgla kamiennego [4]. Przedstawione jest to w dwóch dyrektywach: 2001/81/WE [5] oraz 2003/87/WE [6]. Mimo to węgiel wciąż jest znaczącym źródłem energii. Pochodzi z niego, dla przykładu, ponad 50% energii elektrycznej w Niemczech i ponad 30% w Wielkiej Brytanii [7]. W przypadku nowych członków Unii udział ten jest znacznie większy [8]. W 2016 roku w Polsce wyprodukowano 70,4 mln ton węgla kamiennego i 60,1 mln ton węgla brunatnego, co czyni nas jednym z największych producentów „czarnego złota” w Unii Europejskiej [9, 10]. Ze względu na brak scentralizowanego systemu energetycznego oraz ograniczony dostęp do sieci gazowych, aż 12% całkowitej ilości węgla wydobytego w naszym kraju zostaje zużyte w gospodarstwach domowych na potrzeby ciepłownicze [11, 12]. W artykule przedstawiono badania mające na celu opracowanie metody identyfikacji nieprawidłowej eksploatacji urządzeń grzewczych, które mogą być efektem świadomego działania użytkownika kotła. Identyfikacja odbywałaby się na podstawie ciągłej analizy zawartości tlenu w spalinach.

2. BUDOWA STANOWISKA POMIAROWEGO

Wykonanie pomiarów emisji związków szkodliwych podczas poprawnej oraz niewłaściwej eksploatacji kotła wykonano w laboratorium kotłowym na Politechnice Poznańskiej. Badania zrealizowano na dwóch kotłach na paliwo stałe stosowanych w gospodarstwach domowych krajowych producentów: Heiztechnik oraz Tilgner. Pierwszy z nich to kocioł firmy Heiztechnik Q-EKO 15 o mocy nominalnej 15 kW. Drugi to kocioł Tilgner EKR 20 o mocy 20 kW. Kotły te sterowane są elektronicznie z retortowym podajnikiem ślimakowym opalonym eko-groszkiem. Kotły te posiadają konstrukcję stalową i należą do grupy kotłów małej mocy przeznaczonych do ogrzewania gospodarstw domowych przy współpracy z pojemnościowym zasobnikiem c.w.u. W celu regulacji pracy kotłów zastosowano układ regulacji PID wykorzystujący algorytm proporcjonalnie całkująco różniczkujący pracujący w oparciu o dane z analizatora spalin. Na rysunku 1 przedstawiono schemat połączeń w stanowisku pomiarowym.



Rys. 1. Schemat połączeń czujników i rejestratorów na stanowisku pomiarowym (a) oraz analizatora BCA-01 (b)

Stanowisko pomiarowe wyposażono w analizator spalin Testo 350S podłączony bezpośrednio do układu komputerowego za pomocą interfejsu USB. Analizator obsługiwany był przez program Testo Easy Emission, który umożliwiał bezpośredni pomiar i rejestrację wszystkich wyników pomiarów na komputerze. System gromadzenia danych pomiarowych oparty został o termometry rezystancyjne, termopary, przetworniki ciśnienia, wilgotności i inne z wykorzystaniem modułów firmy ADVENTECH serii ADAM 4000. Stanowisko pomiarowe zaprojektowane zostało z zgodnie z wymogami normatywnymi. W celu oceny wpływu nieprawidłowej eksploatacji kotłów badania podzielone zostały na dwa etapy. W pierwszym etapie, procedura badania kotłów zgodna była z normą PN-EN 303-5 [13], w którym użyto paliwa zaleczonego przez producenta. Do pomiarów użyto węgla sortowany, tzw. eko-groszek, którego specyfikacja podana została przedstawiona w tabeli 1. Wyniki stanowią odniesienie do kolejnych pomiarów w warunkach współspalania.

Tabela 1. Specyfikacja eko-groszku wykorzystanego w badaniach.

| | |
|--------------------|---------------|
| Wartość opałowa | 21 - 24 MJ/kg |
| Granulacja | 5 - 25 mm |
| Wilgotność | 7 - 18% |
| Popiół | 7 - 10% |
| Siarka całkowita | 0,5 - 1,0% |
| Zdolność spiekania | 0 - 20% |

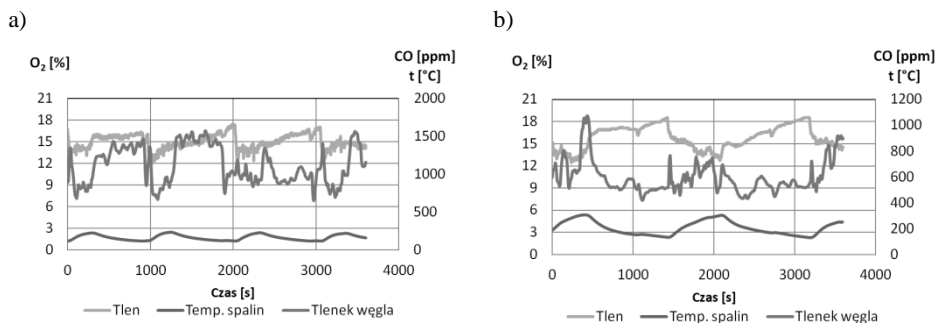
Tabela 2. Klasyfikacja przygotowanych partii odpadów.

| Nr partii | Materiał | Rodzaj odpadu | Masa [g] |
|-----------|-------------------|--------------------|----------|
| 1 | Tworzywa sztuczne | Butelka plastikowa | 65 |
| 2 | Tekstylia | Obuwie | 375 |

W drugim etapie badań przeprowadzono eksperyment symulujący nieprawidłową eksploatację kotłów w warunkach rzeczywistych. W tabeli 2 przedstawiono klasyfikację oraz gramaturę wykorzystanych odpadów podczas ich współspalania z węglem kamiennym. W każdym z etapów, badania przeprowadzono przy obciążeniu: 33, 66 i 100% mocy nominalnej, podczas których rejestrowano temperatury: wody, powietrza i spalin oraz zawartość w gazowych i stałych produktach spalania.

3. WYNIKI BADAŃ

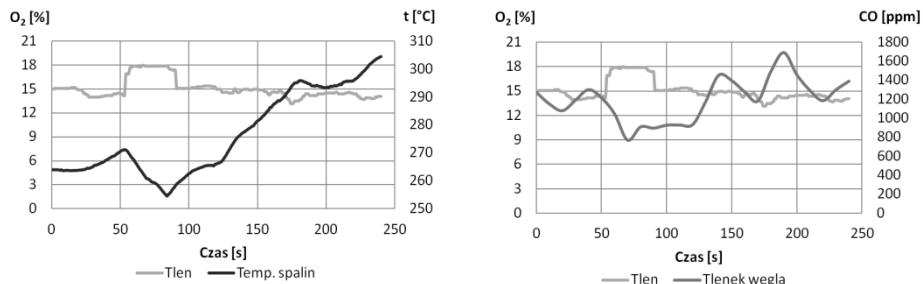
Na rysunku 3 przedstawiono wykres zestawiający pomiar temperatury spalin oraz zawartość w nich tlenu i tlenku węgla podczas pracy kotła Heiztechnik Q-EKO 15 przy wykorzystaniu paliwa zaleconego przez producenta. Temperatura wody na wyjściu z kotła została ustawiona na regulatorze pracy kotła na poziomie 60°C. Czas pomiaru wynosił 3600 s. Średnia moc kotła wynosiła 5,34 kW.



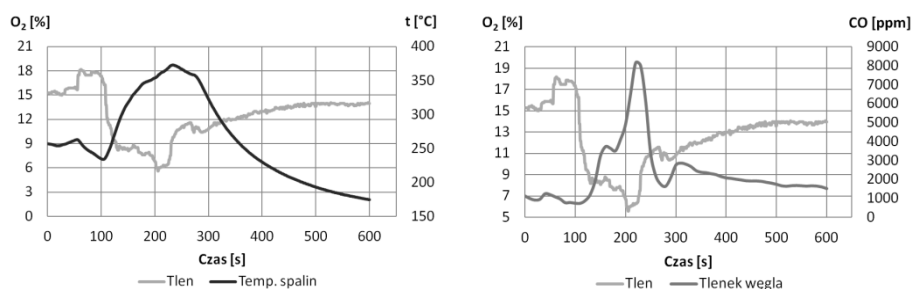
Rys. 3. Pomiar temperatury spalin oraz zawartość w nich tlenu i tlenku węgla podczas pracy kotła Heiztechnik Q-EKO 15 (a) oraz Tilgner EKR 20 (b) przy wykorzystaniu paliwa zaleconego przez producenta

Na rysunku 4 zaprezentowano przebiegi zmian w czasie temperatury spalin oraz zawartości w nich tlenu i tlenku węgla na skutek otwarcia drzwi wyczystkowych w kotle Heiztechnik Q-EKO 15. Czas pomiaru wynosił 240 s. Drzwi otwarte zostały na czas 30 s w pięćdziesiątej sekundzie pomiaru. Poziom zawartości tlenu w spalinach wahał się między 13,98÷15,08%, a poziom zawartości tlenku

węgla oscylował między 1079÷1410 ppm. Po zamknięciu drzwi wyczystkowych wartość tlenu oraz tlenku węgla powróciła do pierwotnej wartości. Z kolei temperatura spalin zaczęła rosnąć i osiągnęła poziom 305°C.



Rys. 4. Temperatura spalin oraz zawartość tlenu w spalinach po otwarciu drzwi wyczystkowych podczas pracy kotła Heiztechnik Q-EKO 15



Rys. 5. Temperatura spalin oraz zawartość tlenu w spalinach po doprowadzenie do paleniska kotła Heiztechnik Q-EKO 15 drugiej partii odpadów

Na rysunku 5 przedstawiono zmianę poziomu temperatury spalin oraz zawartości w nich tlenu i tlenku węgla na skutek doprowadzenia do paleniska kotła Heiztechnik Q-EKO 15 drugiej partii odpadu w postaci obuwia o masie 375 g. Czas pomiaru wynosił 600 s. Odpad został doprowadzony w osiemdziesiątej sekundzie w trakcie otwarcia drzwi wyczystkowych na czas 30 s.

4. WNIOSKI

W pierwszym etapie pracę kotłów analizowano zgodnie z obowiązującymi wytycznymi normatywnymi przy wykorzystaniu paliwa zaleconego przez producenta. W etapie tym potwierdzono, że zostały spełnione wszystkie warunki prawidłowej eksploatacji kotłów. W tabeli 3 zestawiono średnie wartości pomiarów otrzymane podczas badań. Porównano ze sobą wyniki uzyskane dla właści-

wej mieszanki paliwowej zawierającej tylko węgiel oraz dla mieszanki niewłaściwej zawierającej domieszkę odpadów w postaci obuwia.

Tabela 3. Zestawienie wyników badań kotłów grzewczych.

| Kocioł | Rodzaj mieszanki | Moc [kW] | Temperatura spalin [°C] | CO [ppm] | Tlen [%] |
|----------------------|------------------|----------|-------------------------|-------------|---------------|
| Heiztechnik Q-EKO 15 | właściwa | 5 | 118 ÷ 238 | 651 ÷ 1573 | 11,59 ÷ 17,48 |
| | | 10 | 161 ÷ 258 | 292 ÷ 1370 | 10,99 ÷ 15,48 |
| | | 15 | 206 ÷ 280 | 209 ÷ 795 | 9,40 ÷ 14,78 |
| | niewłaściwa | 5 | 187 ÷ 329 | 736 ÷ 8167 | 5,61 ÷ 18,18 |
| | | 10 | 235 ÷ 387 | 312 ÷ 6623 | 3,61 ÷ 17,28 |
| | | 15 | 283 ÷ 460 | 510 ÷ 12729 | 3,32 ÷ 15,18 |
| Tilgner EKR 20 | właściwa | 7 | 132 ÷ 307 | 420 ÷ 1071 | 12,46 ÷ 16,58 |
| | | 13 | 131 ÷ 318 | 354 ÷ 1640 | 6,61 ÷ 13,69 |
| | | 20 | 175 ÷ 300 | 154 ÷ 2551 | 6,81 ÷ 12,37 |
| | niewłaściwa | 7 | 227 ÷ 349 | 480 ÷ 9164 | 2,61 ÷ 17,18 |
| | | 13 | 256 ÷ 406 | 409 ÷ 7475 | 0,20 ÷ 16,68 |
| | | 20 | 175 ÷ 339 | 119 ÷ 8498 | 1,81 ÷ 14,87 |

Podczas badań monitorowano zawartości tlenu w spalinach zestawiając ją ze zmianą zawartości tlenu węgla w spalinach oraz temperaturą spalin. W pierwszym eksperymencie analizowano reakcję na chwilowe otwarcia drzwi wyczystkowych. Zaobserwowano, że niewielka ingerencja użytkownika jak otwarcie drzwi, może zostać wykryta na podstawie monitoringu zawartości tlenu w spalinach. Odnotowano nagły wzrost jego wartości do poziomu ok. 18%. Podobną zależność zaobserwowano w następnych etapach badań. Polegały one na doprowadzeniu do paleniska różnych partii odpadów. Zaobserwowano wzrost zawartości tlenu w spalinach w wyniku otwarcia drzwi wyczystkowych w celu doprowadzenia odpadu, następnie obniżenia jego wartość do poziomu bliskiego zero. Zależność ta występuje przy doprowadzeniu każdego z odpadów, nawet tak niewielkiego odpadu jak butelka plastikowa o wadze 65 g. Czas utrzymywania się wartości tlenu na poziomie bliskiemu zero zależny był od masy doprowadzonych odpadów oraz mocy kotła z jaką pracował. Schemat ten powtórzył się w obu badanych modelach kotłów. Obserwowane efekty związane ze spalaniem odpadów nakładają się na fakt reorganizacji procesu spalania polegającym na doprowadzeniu dodatkowego paliwa w strefę produktów spalania. Dołożenie odpadu skutkuje ograniczeniem dostępu powietrza do górnej części złoża nie zakłócając przepływu powietrza doprowadzanego rzez rusztowiny paleniska. Zakłócenie przepływu powietrza musi skutkować chwilowym spadkiem stężenia tlenu w produktach spalania. Wpływ ten zanika w czasie w miarę zwiększania się temperatury nowej doprowadzonej porcji paliwa i jego dopalaniu się na istniejącym złożu węglowym. Czas powrotu do warunków niezakłóconej pracy jest zmienny w zależności od ilości oraz rodzaju doprowadzanego odpadu. Kolejne

badania powinny wskazać na źródła obserwowanych efektów emisyjnych w spalinach.

LITERATURA

- [1] WHO Global Urban Ambient Air Pollution Database <who.int/airpollution>, accessed 01.06.2021.
- [2] Art. 25b of the Environment Inspection Act dated 20 July 1991 (Journal of Laws 2013 r., item 686, as amended).
- [3] Main Inspectorate for Environmental Protection, Environmental Status in Poland Report 2018, Library of Environment Monitoring, Warsaw (2018).
- [4] Stala-Szlugaj K. Trends in the consumption of hard coal in Polish households compared to EU households. *Miner Resour Manag* 2016;32:5e22. <https://doi.org/10.1515/gospo-2016-0024>.
- [5] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady nr 2001/81/WE z dnia 23 października 2001 r. w sprawie krajowych poziomów emisji dla niektórych rodzajów zanieczyszczenia powietrza.
- [6] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady nr 2003/87/WE z dnia 13 października 2003 r. ustanawiająca program handlu uprawnieniami do emisji gazów cieplarnianych na obszarze Wspólnoty i zmieniająca dyrektywę Rady 96/61/WE.
- [7] Łukaszczyk Z., Węgiel – tania energia i miejsca pracy, Górnictwo węglowe w Unii Europejskiej, Katowicki Holding Węglowy, 2015.
- [8] Węgiel w Unii Europejskiej, www.okd.cz [dostęp: 01.06.2021].
- [9] Główny Urząd Statystyczny, Rocznik Statystyczny Rzeczypospolitej Polskiej (2011), Warszawa 2011.
- [10] Polska Agencja Prasowa, W 2016 r. kopalnie wyprodukowały 70,4 mln ton węgla, www.pap.pl [dostęp: 5.08.2017].
- [11] Główny Urząd Statystyczny, Mały Rocznik Statystyczny Polski, Warszawa 2011.
- [12] Główny Urząd Statystyczny, Zużycie Paliw i Nośników Energii w 2010 roku, Warszawa 2011.
- [13] PN-EN 303-5:2012 Kotły grzewcze - Część 5: Kotły grzewcze na paliwa stałe z ręcznym i automatycznym zasypem paliwa o mocy nominalnej do 500 kW - Terminologia, wymagania, badania i oznakowanie.

THE CONCEPT OF THE QUALITY CONTROL SYSTEM OF FLUE GAS EMITTED BY DOMESTIC BOILERS TO THE ATMOSPHERE

The article presents the concept of supervision over the operation of devices burning fossil fuels, in particular hard coal, consisting in monitoring the amount of compounds emitted into the atmosphere during their operation. For the adopted test criteria, a measuring stand was designed, a test procedure was developed and tests were carried out to determine the possibility of remote control of the composition of exhaust gases emitted into the atmosphere from boilers. Based on the data compiled in tables and graphs, an analysis was performed and the possibilities of remote monitoring were indicated. The research was carried out by analyzing mixed solid fuels consisting of hard

coal and various municipal waste. The time characteristics of the emission of combustion products made it possible to indicate the characteristics of these waveforms indicating the use of forbidden fuel. The paper presents a set of devices that allow for monitoring and archiving of data collected in heating devices during the conversion of chemical energy of fuel into useful energy in a form adapted to the technological process carried out in the enterprise.

(Received: 28.10.2022, revised: 20.11.2022)