

Krzysztof SORNEK<sup>1</sup>, Mariusz FILIPOWICZ<sup>1</sup>, Leszek KURCZ<sup>1</sup>  
Mateusz SZUBEL<sup>1</sup>, Maciej ROSÓŁ<sup>2</sup>, Kamila RZEPKA<sup>3</sup>, Jacek RĘKA<sup>4</sup>

<sup>1</sup> AGH w Krakowie, Wydział Energetyki i Paliw  
Al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

<sup>2</sup> AGH w Krakowie, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej  
Al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

<sup>3</sup> Fundacja Instytut Zrównoważonej Energetyki  
ul. E.W. Radzikowskiego 100B/43, 31-315 Kraków

<sup>4</sup> Cebud S.C.  
ul. Balicka 320, 30-198 Kraków  
e-mail: krzysztof.sornek@agh.edu.pl

## Sterowanie pracą piecokominka a emisja tlenku węgla do atmosfery

W artykule omówiono praktyczne aspekty sterowania pracą urządzeń grzewczych małej mocy - piecokominków - pod kątem zapewnienia odpowiednio niskiej emisji tlenku węgla do atmosfery. Na podstawie przeprowadzonych badań opracowana została pierwsza wersja automatycznego systemu kontrolno-pomiarowego ze sterownikiem PLC, oparta na wykorzystaniu dwóch sygnałów sterujących pracą przepustnic: stężenia tlenku węgla i tlenu w spalinach. Otrzymane w rezultacie średnie wartości emisji CO do atmosfery pokazują, iż dalszy rozwój opracowanego systemu przyczyni się do spełnienia wysokich wymagań norm BImSchV 2 i Ecodesign.

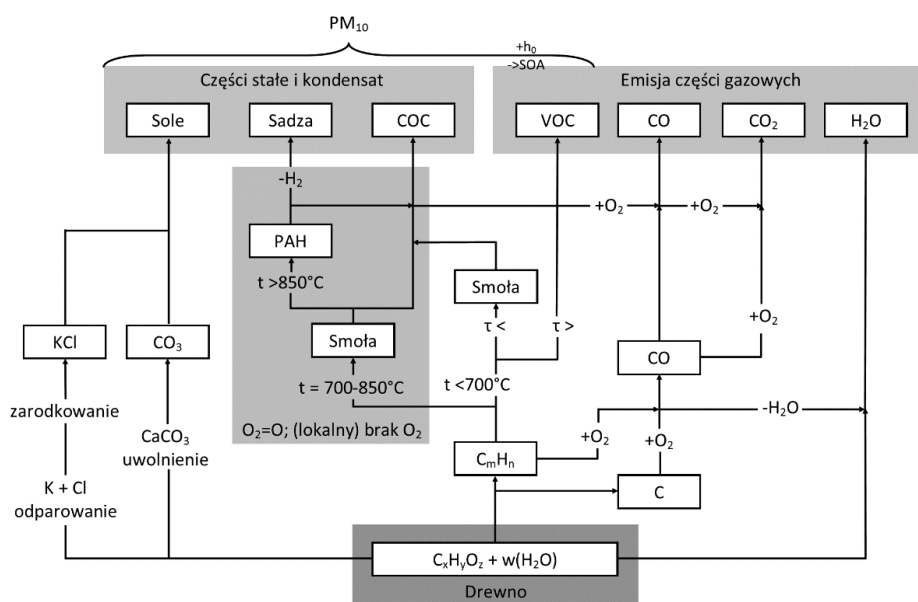
**Słowa kluczowe:** odnawialne źródła energii, biomasa, systemy grzewcze, systemy sterowania, programowalne sterowniki logiczne PLC

### Wprowadzenie

Piecokominki, zgodnie z definicją przedstawioną w [1], stanowią połączenie kominków konwekcyjnych i pieców akumulacyjnych oraz mogą być formalnie klasyfikowane jako akumulacyjne ogrzewacze pomieszczeń. Wymogi dotyczące tego typu urządzeń zawarte zostały w normie PN-EN 13229, która narzuca zarówno sposób ich badania, jak i dopuszczalne wielkości emisji zanieczyszczeń do atmosfery. Zgodnie z tym dokumentem, średnia emisja tlenku węgla w trakcie procesu spalania nie powinna przekraczać  $3345 \text{ mg/Nm}^3$ , tj. 3000 ppm. Bardziej restrykcyjne pod względem dopuszczalnych wielkości emisji dla piecokominków są austriackie normy BImSchV 1 i BImSchV 2. Pierwsza z nich obowiązuje od 22 marca 2010 r. i określa maksymalną wartość emisji CO na poziomie  $4000 \text{ mg/Nm}^3$  dla urządzeń istniejących oraz  $2000 \text{ mg/Nm}^3$  dla urządzeń nowych. Z kolei norma BImSchV 2, obowiązująca od 31 grudnia 2014 r., dopuszcza w przypadku nowych urządzeń emisję tlenku węgla na poziomie nie większym niż  $1250 \text{ mg/Nm}^3$ . Wysokie wymagania stawia również Dyrektywa 2009/125/WE (Ecodesign), obejmująca

wszystkie stosowane w budownictwie urządzenia wykorzystujące energię. Dyrektywa ta w większości przypadków podaje jedynie zasady i kryteria ustanawiania wymagań dla tego typu urządzeń przez ośrodki wykonawcze, natomiast szczegółowe wymagania podawane są dla tych urządzeń, które mają znaczący wpływ na środowisko naturalne oraz charakteryzują się znacznym udziałem w europejskim rynku. Do tej grupy zalicza się także piecokominki (związane jest to ze sporym potencjałem ograniczenia emisji zanieczyszczeń ze spalania biomasy poprzez zastosowanie nowoczesnych technik spalania i oczyszczania spalin). Wielkość emisji tlenku węgla do atmosfery zgodnie z Ecodesign w przypadku nowych urządzeń nie może przekraczać  $1500 \text{ mg/Nm}^3$ .

Pomiary CO w spalinach są istotnym elementem kontroli jakości spalania drewna w piecokominkach. Jest to szczególnie istotne dla biomasy, podczas spalania której emisje mogą się bardzo różnić w zależności od sposobu prowadzenia procesu spalania. Tworzenie się różnych zanieczyszczeń podczas spalania drewna ma dość skomplikowany charakter. W pewnym uproszczeniu można je przedstawić jak na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat powstawania zanieczyszczeń podczas spalania biomasy, sporządzony na podstawie [2]

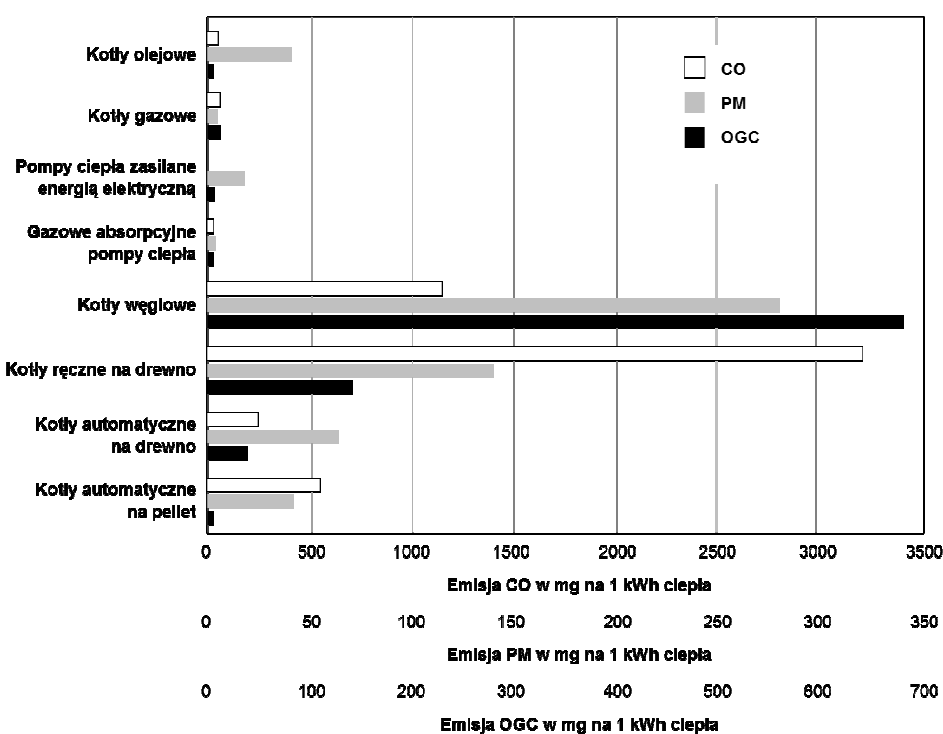
Fig. 1. Diagram of contamination during biomass combustion based on [2]

Widoczne jest, że powstawanie sadzy i tzw. COC (Condensable Organic Compounds) wynika z niepełnego spalania i w ogólności skorelowane jest z lokalnym brakiem tlenu. Spalanie to często występuje w prostych, obsługiwanych ręcznie paleniskach. Może też występować w paleniskach automatycznych podczas rozruchu lub w związku z niewłaściwą pracą układu automatyki. Ponadto istnieje

wspólna droga do tworzenia lotnych związków organicznych (które są bardzo szkodliwe) z drogą tworzenia CO; oczywiście widoczny jest wpływ temperatury.

Bezpośrednie badania emisji pyłów z różnych urządzeń grzewczych potwierdzają silną zależność wielkości emisji od charakteru urządzenia i stopnia automatyzacji procesów spalania w nim zachodzących. Można to zaobserwować na rysunku 2, przedstawiającym te emisje w sposób poglądowy.

Zgodnie z [2], w przypadku dobrego wymieszania gazów z odgazowania paliwa i powietrza można osiągnąć bardzo niskie emisje (np. CO < 50 mg/m<sup>3</sup> czy C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> < 5 mg/m<sup>3</sup> przy 11% O<sub>2</sub>), jednakże prowadzenie dokładnej kontroli procesu spalania wymaga stosowania sond CO/lambda sprzężonych z odpowiednim sterownikiem. W związku z tym następuje rozwój systemów tzw. sterowników adaptacyjnych z odpowiednimi sondami. Typowe wartości emisji (na podstawie [3]) są przedstawione na rysunku 2.



Rys. 2. Poglądowe przedstawienie wybranych emisji (CO, pyły i OGC) z najczęściej występujących urządzeń i systemów energetycznych wyprodukowanych w roku 2010 (na podstawie [3])

Fig. 2. Presentation of selected emissions (CO, dust and OGC) from the most common appliances and energy systems produced in 2010 (based on [3])

Różnica pomiędzy poszczególnymi urządzeniami i paliwami jest znaczna. W przypadku biomasy emisje bardzo silnie zależą od formy paliwa i automatyzacji procesu spalania, zmieniając się nawet kilku- bądź kilkunastokrotnie. Należy

zwrócić uwagę, że są tu przedstawione nowe urządzenia z 2010 roku. W przypadku rozwiązań starszych różnice mogą być nawet ponad 100-krotne, zwłaszcza dla spalania dużych ilości znacznie zawilgoconego drewna z niewystarczającym doprowadzeniem powietrza.

Rosnące wymagania w zakresie ograniczenia emisji CO do atmosfery powodują konieczność poprawy parametrów pracy istniejących oraz projektowanych urządzeń grzewczych. Do możliwych działań zaliczyć można m.in. optymalizację geometrii palenisk, poprawę parametrów stosowanych paliw czy też optymalizację procesu spalania poprzez opracowanie dedykowanego układu kontrolno-pomiarowego. W dalszej części artykułu przedstawione zostaną postępy prac badawczych w tym ostatnim aspekcie.

## **1. Przegląd wyników badań w aspekcie redukcji emisji CO i optymalizacji systemów sterowania pracą domowych urządzeń grzewczych**

Pomiary emisji tlenku węgla i innych zanieczyszczeń do atmosfery oraz analiza efektywności energetycznej urządzeń grzewczych opalanych biomasą są przedmiotem badań naukowych na całym świecie. Badania te obejmują szereg różnych urządzeń i instalacji, w tym powszechnie stosowane w budynkach mieszkalnych kominki i piece akumulacyjne. Porównując parametry pracy tych dwóch rodzajów urządzeń, wykazano między innymi, że spalanie drewna w kominku wiąże się z niższą temperaturą spalin, wyższą prędkością ich przepływu oraz wyższą emisją tlenku węgla, węglowodorów i pyłów do atmosfery w porównaniu do spalania drewna w piecu [4]. Z kolei, poddając badaniu różne rodzaje paliw, stwierdzono, że stosowanie brykietu, w tym brykietu innego niż drzewny (np. brykiet ze słomy czy odpowiedniego sortymentu trawy), nie jest równoznaczne ze spadkiem efektywności energetycznej czy zwiększeniem emisji tlenku węgla CO, tlenków azotu NO<sub>x</sub> i dwutlenku siarki SO<sub>2</sub> do atmosfery [5]. Również spalanie pelletów powoduje emisję zanieczyszczeń (m.in. pyłów) do atmosfery zbliżoną do emisji występującej w przypadku nowych konstrukcji pieców opalanych drewnem [6].

Wyniki pomiarów emisji CO oraz innych parametrów procesu spalania z różnych badań mogą zostać wykorzystane do zwiększenia efektywności energetycznej i ekologicznej domowych urządzeń grzewczych – w tym kominków, pieców i piecokominków. Jednym z głównych problemów do rozwiązania jest wysoka emisja tlenku węgla w fazie rozpalania paliwa, która standardowo jest 3-4 razy wyższa niż podczas fazy właściwego spalania [7]. Z uwagi na wagę tego problemu opracowywane są modele matematyczne, przeznaczone do wykorzystania na potrzeby optymalizacji bryły geometrycznej palenisk czy opracowania dedykowanych systemów sterowania. Stosowanie nowych, aktualnie i w przyszłości rozwijanych algorytmów sterowania, dedykowanych do współpracy z konkretnym typem urządzeń, przyczynia się do znacznej poprawy ich parametrów pracy w porównaniu do tradycyjnego, dostarczanego przez producenta, fabrycznego układu regulacji [8]. Potwierdzają to wyniki badań przeprowadzonych w Wielkiej Brytanii. Pokazu-

ją one, że stosowanie odpowiednich systemów sterowania do kontroli pracy domowych urządzeń grzewczych pozwala na uzyskanie do 20% oszczędności w zużyciu paliwa, a także znacznie poprawia komfort cieplny pomieszczeń [9].

Jedną z możliwości poprawy parametrów pracy piecokominka jest wdrożenie systemu sterowania opartego na wykorzystaniu dwóch strumieni powietrza nawiewanych do obszaru paleniska (pierwotnego i wtórnego). Rozwiązanie przedstawione w [10] zakłada wykorzystanie sygnałów z dwóch czujników mierzących zawartość tlenu oraz CO/HC w spalinach przy uwzględnieniu dodatkowo temperatury spalania. Wykorzystanie tego typu czujników umożliwiło redukcję emisji CO/HC do poziomu 50% (w przypadku urządzeń centralnego ogrzewania) i 15% (w przypadku pieców kaflowych) w stosunku do emisji mierzonej przy pracy urządzeń ze standardowym sterownikiem producenta. W tym przypadku pierwotny strumień powietrza regulowany był otwarciem pierwotnej przepustnicy powietrza, które uzależnione było od temperatury spalania i koncentracji tlenu w spalinach. Z kolei otwarcie przepustnicy powietrza wtórnego uzależnione było od temperatury spalania i koncentracji tlenku węgla i węglowodorów w spalinach.

Podobny system sterowania jak opisany wyżej zastosowany został w przypadku badań opisanych w dalszej części niniejszego artykułu.

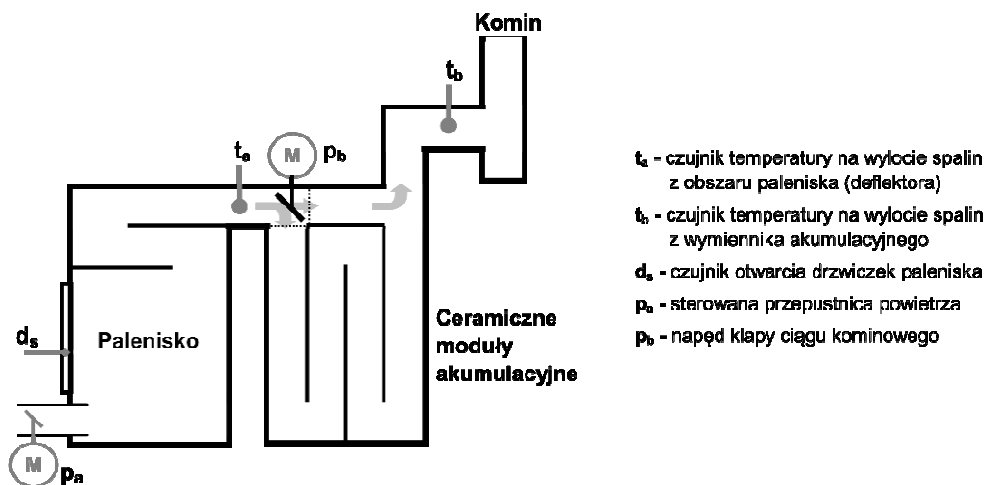
## 2. Zagadnienie sterowania pracą piecokominków

Wielkość emisji tlenku węgla do atmosfery uzależniona jest w głównej mierze od konstrukcji komory paleniskowej (paleniska), rodzaju spalanego paliwa oraz przebiegu procesu spalania (sposobu sterowania pracą piecokominka). Regulacja pracy dostępnych na rynku piecokominków odbywa się z reguły za pomocą jednej lub dwóch przepustnic doprowadzających powietrze pierwotne i wtórne do obszaru paleniska. W najprostszych układach przepustnice sterowane są manualnie, natomiast w bardziej zaawansowanych rozwiązaniach - za pomocą serwomechanizmów kontrolowanych przez optymalizatory spalania. Sygnałem sterującym jest temperatura spalin mierzona nad wylotem spalin z obszaru paleniska (deflektora). Część sterowników posiada ponadto możliwość obsługi napędu kłapy kominowej (która otwierana jest w fazie rozpalania i ew. wygaszania dla ominięcia obiegu elementów akumulacyjnych i zwiększenia ciągu kominowego) oraz możliwość przyłączenia czujnika otwarcia drzwiczek, czujnika mierzącego stężenie CO w pomieszczeniu itp. Dodatkowo, w rozwiązaniach piecokominków z płaszczem wodnym stosuje się sterowniki, które poza standardową funkcjonalnością posiadają opcję sterowania pracą pomp obiegowych [11].

### 2.1. Podstawowe aspekty pracy optymalizatora spalania

Zasada działania standardowego optymalizatora spalania jest prosta - układ ten kontroluje proces spalania i utrzymania fazy żaru za pomocą przepustnicy lub układu przepustnic powietrza. Dzięki obniżeniu krzywej spalania w fazie wzrostu temperatury oraz podniesieniu krzywej spalania w chwili spadku temperatury,

optymalizator wydłuża proces palenia. Typowy układ pracy urządzenia pokazany został na rysunku 3.



Rys. 3. Podstawowy układ pracy optymalizatora spalania

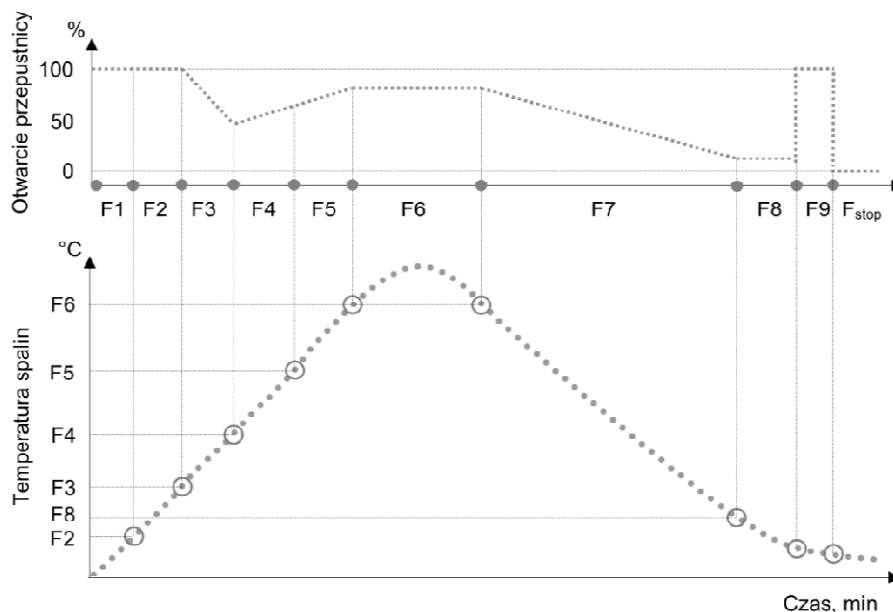
Fig. 3. Basic operation mode of combustion optimizer

Optymalizator spalania kontroluje stopień otwarcia przepustnicy w oparciu o pomiar temperatury oraz realizację wewnętrznego algorytmu sterowania. Algorytm ten zawiera podział procesu spalania na kilka faz, które (za jednym z producentów) można przedstawić następująco:

- F\_stop - faza spoczynkowa, przepustnica w pełni zamknięta,
- F\_0 - faza przejściowa po włączeniu zasilania przy zamkniętych drzwiczkach, przepustnica w pełni otwarta (w zależności od wartości mierzonej temperatury następuje przejście do fazy spoczynkowej lub fazy spalania),
- F\_1 - faza startu następująca po załadowaniu i zapaleniu paliwa oraz zamknięciu drzwiczek, przepustnica w pełni otwarta,
- F\_2 - faza rozpalania; po osiągnięciu temperatury granicznej ( $200^{\circ}\text{C}$ ) następuje przejście do kolejnego etapu procesu spalania, przepustnica w pełni otwarta,
- F\_3, F\_4, F\_5 - fazy wzrostu temperatury; przepustnica jest ustawiana w zależności od wartości mierzonej temperatury, zgodnie z teoretyczną krzywą spalania,
- F\_6 - faza spalania (temperatura  $>700^{\circ}\text{C}$ ); oczekiwanie na osiągnięcie maksymalnej temperatury spalania,
- F\_7 - faza obniżania temperatury (przejście do tej fazy następuje przy spadku temperatury o  $100^{\circ}\text{C}$  w stosunku do maksymalnej w fazie F\_6), przepustnica jest stopniowo przysmykana,
- F\_8 - faza żaru (temperatura rozpoczęcia fazy żaru jest uzależniona od tego, w której fazie osiągnięta została najwyższa temperatura procesu), sygnalizacja konieczności uzupełnienia paliwa,

- F\_9 - faza usuwania gazów spalinowych, następuje pełne otwarcie przepustnicy, a po 1 minucie jej zamknięcie i przejście do fazy spoczynkowej (F-stop).

Krzywa spalania, z zaznaczeniem powyższych faz spalania, przedstawiona została na rysunku 4.



Rys. 4. Teoretyczna krzywa spalania z zaznaczeniem faz spalania

Fig. 4. Theoretical air curve with marked combustion phases

## 2.2. System kontrolno-pomiarowy z dwoma przepustnicami powietrza

Rozwinięciem podstawowego systemu sterowania pracą piecokominka jest wprowadzenie dodatkowego strumienia powietrza nawiewanego do obszaru paleniska. Wiąże się to z zastosowaniem dwóch kanałów dolotowych powietrza (lub jednego kanału podzielonego na dwie części) z dwoma niezależnie sterowanymi przepustnicami. Zakładając, że podstawowy strumień powietrza nawiewany jest do obszaru paleniska z wykorzystaniem szczeliny umiejscowionej nad drzwiczkami (wlot powietrza jest skierowany w stronę szyby dla zachowania jej czystości), drugi strumień powietrza może być doprowadzony do obszaru paleniska spod drzwiczek (z wlotem skierowanym bezpośrednio na czoło płomienia). Dostarczenie dodatkowego strumienia powietrza wpływa korzystnie na proces spalania, powodując lepsze dopalenie paliwa oraz mniejszą emisję tlenku węgla do atmosfery (ma to szczególne znaczenie w pierwszej i ostatniej fazie procesu spalania, gdy występują piki emisji tlenku węgla). Sterowanie pracą układu dwóch przepustnic

powinno być realizowane za pomocą specjalnie przystosowanego optymalizatora spalania, mogącego obsługiwać dwa urządzenia.

### 2.3. Dalsze możliwości rozwoju układu kontrolno-pomiarowego

Dalszy rozwój systemu sterowania umożliwiającego lepszą kontrolę pracy piecokominków może być nakierowany np. na zapewnienie możliwości pomiaru stężenia tlenu węgla i/lub tlenu w spalinach, ilości ciepła zakumulowanego w wymienniku akumulacyjnym, temperatury powierzchni kształtek, regulacji pogodowej itp. Aby możliwe było wprowadzenie nowych funkcjonalności, konieczne jest opracowanie nowego algorytmu sterowania, uwzględniającego wymienione wyżej parametry, a także dającego możliwość wyboru trybu pracy, w tym definiowania rodzaju spalanej drewna i jego ilości, żądanej funkcji celu (np. maksymalizacji uzysku ciepła, minimalizacji zużycia paliwa, minimalizacji emisji tlenu węgla do atmosfery). Zaawansowane prace w kierunku stworzenia nowoczesnego, dedykowanego systemu kontrolno-pomiarowego prowadzone są na Wydziale Energetyki i Paliw (AGH w Krakowie) we współpracy z firmą Cebud S.C.

## 3. Badanie piecokominka z dedykowanym systemem kontrolno-pomiarowym

Stanowisko badawcze piecokominków wyposażone jest w zaawansowany system kontrolno-pomiarowy ze sterownikiem PLC, wyposażony w czujniki temperatury (umieszczone w obszarze paleniska, wewnątrz kształtek akumulacyjnych oraz na powierzchni kształtek akumulacyjnych), przetworniki prędkości powietrza (umieszczone w kanałach dolotowych), analizator spalin, a także przetworniki pośredniczące w komunikacji pomiędzy modułami sterującymi a serwomechanizmami przepustnic (12). Dodatkowym elementem jest waga pomostowa, pozwalająca śledzić ubytek masy paliwa w trakcie procesu spalania (z dokładnością do  $\pm 0,1$  kg).

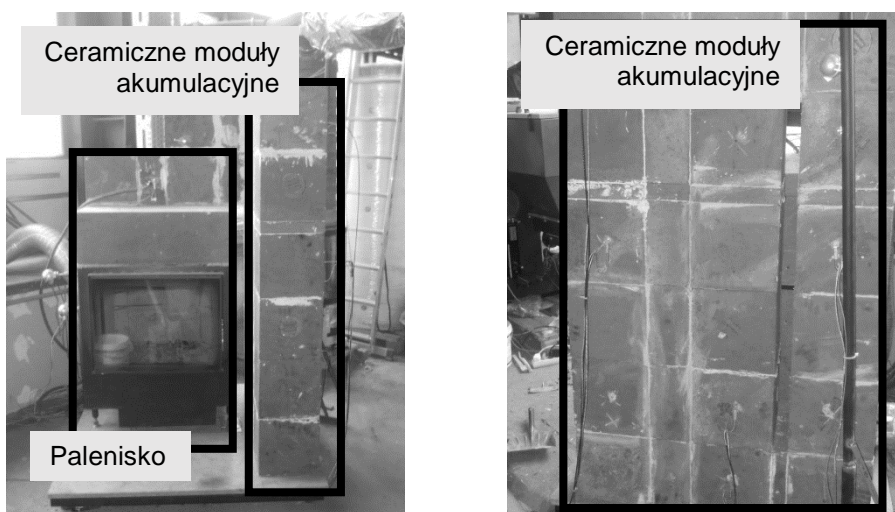
W rozważanym przypadku badaniu poddany został piecokominek z paleniskiem o masie 550 kg oraz wymiennikiem akumulacyjnym o masie 1050 kg, umiejscowionym obok paleniska (zastosowano meandrowy układ przepływu spalin). Widok przedniej i bocznej części konstrukcji dla wybranej konfiguracji elementów ceramicznych piecokominka pokazany został na rysunku 5.

Specjalna konstrukcja paleniska umożliwiła dostarczanie powietrza do obszaru paleniska za pomocą trzech kanałów powietrznych (wyposażonych w trzy niezależnie sterowane przepustnice). Lokalizacja wlotów powietrza do obszaru paleniska pokazana została na rysunku 6.

Schemat blokowy systemu kontrolno-pomiarowego do sterowania pracą piecokominka został przedstawiony na rysunku 7. System ten składa się z komputera PC oraz sterownika PLC z serii WAGO 750-880 wraz z podłączonymi analogowymi i cyfrowymi modułami wejściowymi i wyjściowymi. Komputer może łączyć się ze

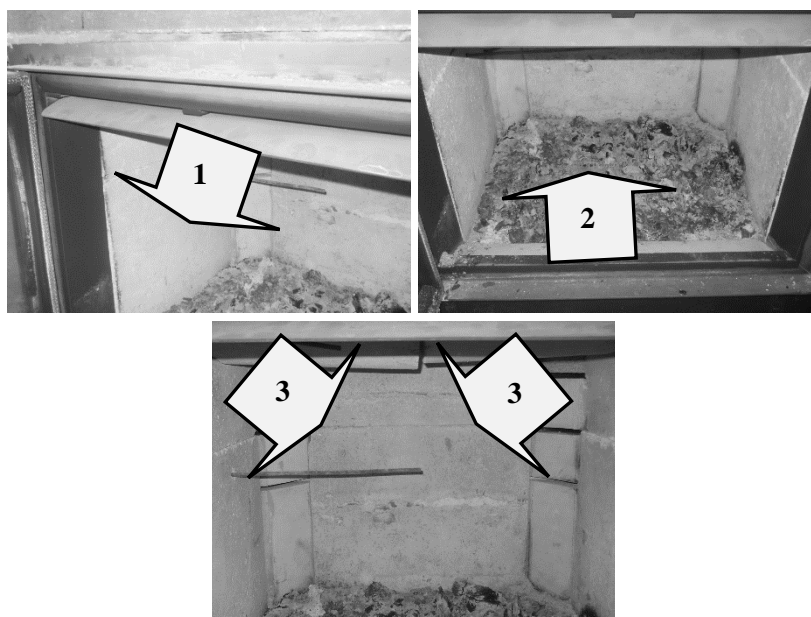


sterownikiem za pomocą kabla sieciowego lub za pośrednictwem interfejsu sieci bezprzewodowej Wi-Fi.



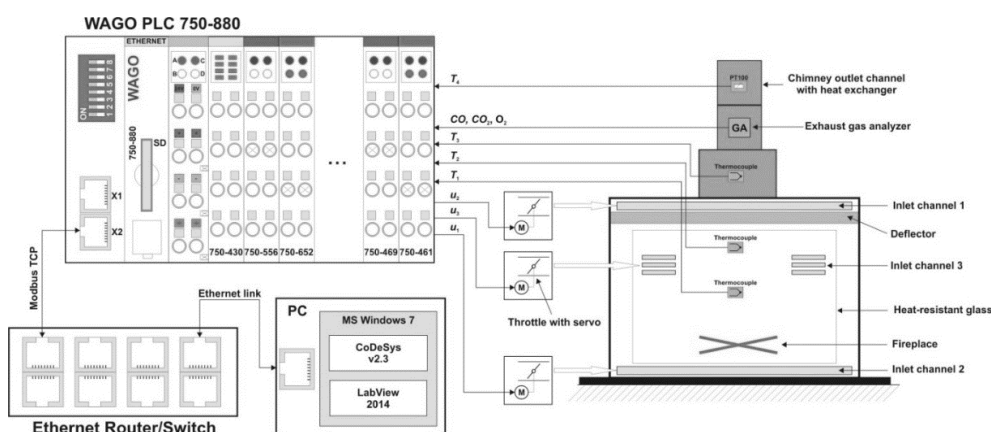
Rys. 5. Konfiguracja elementów ceramicznych w badanym piecokominku

Fig. 5. Configuration of the ceramic modules in the stove-fireplace with accumulation



Rys. 6. Kierunki wlotu strumienia powietrza do obszaru paleniska

Fig. 6. Directions of the air flow inlets to the area of the furnace



Rys. 7. Schemat blokowy systemu kontrolno-pomiarowego

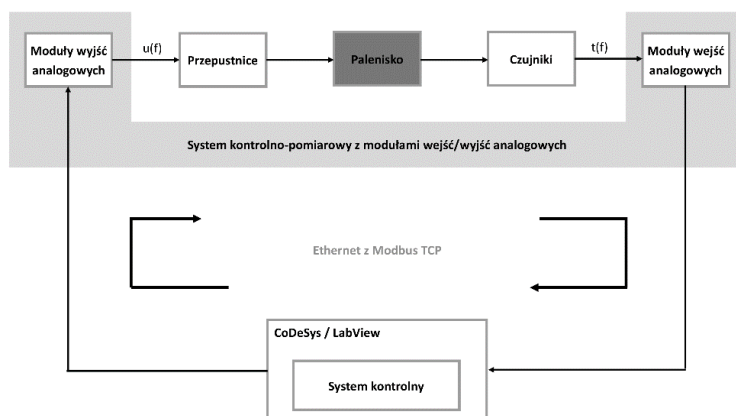
Fig. 7. Block diagram of the control and measurement system

Powyższy schemat przedstawia tylko te czujniki i elementy, które miały kluczowe znaczenie dla opracowania pierwszej wersji algorytmu sterowania. Do modułów wejść analogowych sterownika PLC podłączone zostały sygnały z czujników temperatury (termopary:  $t_1 \div t_3$  oraz czujnik Pt100:  $t_4$ ), przetworników prędkości powietrza oraz sensorów stężenia wybranych gazów w spalinach (GA: CO, CO<sub>2</sub> i O<sub>2</sub>). Sygnały sterujące stopniem otwarcia przepustnic ( $u_1$ ,  $u_2$  i  $u_3$ ) są z kolei przekazywane do urządzeń z modułu wyjścia analogowego sterownika. Możliwe jest także zastosowanie innych sygnałów temperatury i stężenia zanieczyszczeń w spalinach w celu kontroli stopnia otwarcia przepustnic, jednakże na tym etapie wykorzystane zostały jedynie sygnały wymienione wyżej.

Podstawowym zadaniem sterowników PLC jest pomiar i przetwarzanie danych z czujników pomiarowych oraz generowanie sygnałów kontrolujących stopień otwarcia przepustnic. Funkcja ta realizowana jest w środowisku CoDeSys i LabView, a wymiana danych pomiędzy komputerem i sterownikiem przeprowadzana jest przy użyciu protokołu przemysłowego Modbus TCP.

Zaproponowana struktura systemu kontrolno-pomiarowego pozwala na szybkie prototypowanie kolejnych wersji algorytmów sterowania. Kolejne wersje algorytmów sterowania uruchamiane są z poziomu komputera, który obsługuje również dane pomiarowe oraz sygnały sterujące transferowane za pomocą interfejsu Ethernet (rys. 8). Graficzne środowiska CoDeSys i LabView pozwalają m.in. na:

- błyskawiczne zmiany w strukturze i parametrach regulatora,
- symulacje pracy regulatora, np. zastosowanie modeli symulacyjnych kontrolowanych układów lub ich fragmentów,
- prowadzenie eksperymentów laboratoryjnych w czasie rzeczywistym,
- korzystanie z gotowych modułów przeznaczonych do obsługi regulatorów, protokołów komunikacyjnych (np. Modbus), wizualizacji danych pomiarowych itp.



Rys. 8. Struktura systemu kontrolno-pomiarowego

Fig. 8. Structure of control and measurement system

Finalna, doświadczalnie zweryfikowana wersja regulatora jest implementowana w pamięci wewnętrznej sterownika PLC. Na tym etapie komputer PC jest wykorzystywany jedynie do pozyskiwania i przechowywania danych pomiarowych oraz dostrajania parametrów regulatora.

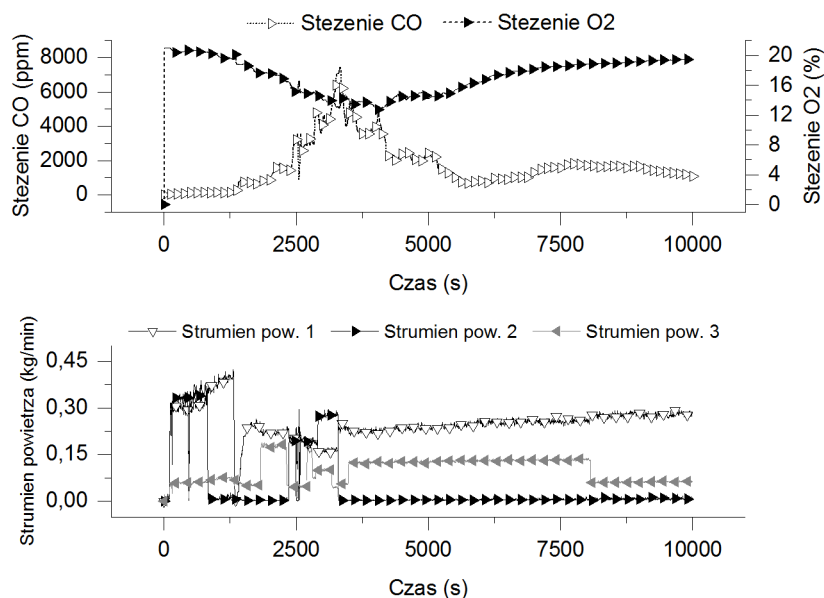
#### 4. Wyniki badań

Wyniki prac badawczych, zmierzających do opracowania dedykowanego systemu sterowania pracą piecokominka (przede wszystkim pod kątem ograniczenia emisji CO do atmosfery), przedstawiono i omówiono poniżej. Badania podzielone zostały na 3 części: pierwsza obejmowała manualną kontrolę stopnia otwarcia wszystkich przepustnic, natomiast druga i trzecia - kontrolę automatyczną, opartą na wykorzystaniu pierwszej wersji regulatora o różnych parametrach pracy. Otrzymane rezultaty są obiecujące, co potwierdza konieczność prowadzenia dalszych prac badawczych w tym zakresie.

##### 4.1. Wyniki pomiarów - manualna kontrola stopnia otwarcia przepustnic

Analizując parametry pracy piecokominka wyposażonego w typowy regulator, można zauważyć, że pomimo w pełni otwartej przepustnicy górnego powietrza występują momenty, w których dopływ powietrza do obszaru paleniska jest niewystarczający, by całkowicie dopalić tlenek węgla. Korzystne jest wtedy zastosowanie dodatkowego strumienia, nawiewanego z innego miejsca – ze szczeliny znajdującej się poniżej szyby kominkowej lub z otworów wykonanych w narożnikach ściany tylnej paleniska. Wpływ zastosowania dodatkowego nawiewu powietrza od dołu i od tyłu paleniska na emisję CO pokazany został na rysunku 9. Przedstawiony wykres obrazuje przebieg procesu spalania prowadzonego przy pełnym otwarciu przepustnicy powietrza górnego (przepustnica oznaczona numerem 1) oraz

ręcznych zmianach stopnia otwarcia pozostałych dwóch przepustnic. W trakcie omawianego procesu spalonych zostało 12 kg drewna iglastego (drewno świerkowe), o średniej zawartości wilgoci poniżej 15%.



Rys. 9. Zmiany zawartości tlenku węgla i tlenu w spalinach z piecokominka w przypadku manualnej kontroli stopnia otwarcia przepustnic

Fig. 9. Changes in the content of carbon monoxide and oxygen in the exhaust gas of stove-fireplace with accumulation in the case of manual control of throttle operation

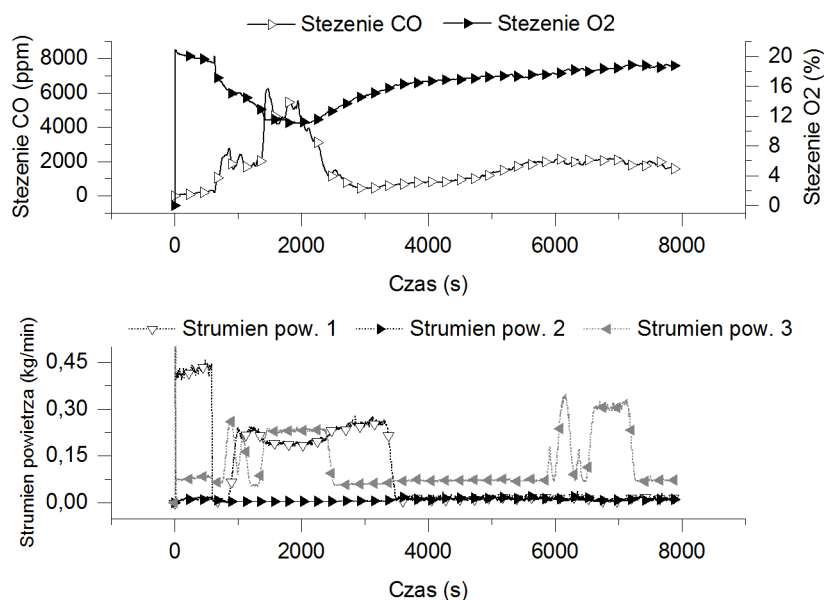
Obserwując przebieg poszczególnych krzywych na rysunku 9, można zauważyć, iż zdecydowanie bardziej korzystny wpływ na ograniczenie emisji tlenku węgla do atmosfery ma doprowadzanie powietrza w tylnej części paleniska. Z kolei nawiew powietrza do paleniska od dołu powoduje wyraźny wzrost emisji CO - dzieje się tak, gdyż w wyniku nieoptymalnej dystrybucji powietrza w obszarze paleniska, doprowadzane powietrze niewystarczająco miesza się z powstającym gazem, który nie w pełni dopalany wydostaje się wraz ze spalinami do komina. Taką sytuację można zauważyć w 40 minucie procesu spalania, w momencie podjęcia próby spowolnienia wzrostu emisji CO przez doprowadzenie dodatkowego powietrza od dołu. Otrzymany efekt jest jednak odwrotny od zamierzonego. Dopiero zamknięcie dopływu powietrza od dołu paleniska i wprowadzenie dodatkowego strumienia powietrza nawiewanego w tylnej części pozwala obniżyć emisję tlenku węgla do atmosfery (czas powyżej 60 minuty procesu spalania).

Na podstawie opisanych wyżej obserwacji (a także szeregu wcześniejszych prac) zaproponowana została pierwsza wersja regulatora dedykowanego do współpracy z badanym piecokominkiem.

#### 4.2. Wyniki pomiarów – system automatycznej kontroli stopnia otwarcia przepustnic

Podstawowym założeniem opracowywanego regulatora było wykorzystanie dwóch sygnałów do sterowania nawiewem powietrza do obszaru paleniska: wielkości emisji tlenu ( $O_2$ ) i tlenku węgla (CO). Sygnały te sprzężone zostały za pośrednictwem systemu kontrolno-pomiarowego z przepustnicami powietrza górnego (nr 1) i tylnego (nr 3), realizując otwieranie i zamykanie tych przepustnic w zależności od zadanych parametrów brzegowych (minimalna zadana zawartość tlenu w spalinach oraz maksymalna zadana zawartość tlenku węgla). W pierwszym z rozważanych przypadków sygnał emisji  $O_2$  sterował pracą przepustnicy powietrza górnego, natomiast sygnał emisji CO - pracą przepustnicy powietrza dolnego.

W trakcie testów spalono 10 kg brykietów z drewna bukowego w kształcie walca o średnicy ok. 8 cm i długości ok. 10 cm, o średniej wilgotności mniejszej niż 10%. Wartość opału tego typu brykietu wynosi ok. 18,5 GJ/Mg. Wielkość emisji CO i  $O_2$  oraz odpowiadający im stopień otwarcia przepustnicy 1 i 3 w trakcie procesu spalania pokazane zostały na rysunku 10.



Rys. 10. Zmiany zawartości tlenku węgla i tlenu w spalinach z piecokominka w przypadku wykorzystania  $O_2$  jako sygnału sterującego otwarciem przepustnicy nr 1 oraz CO jako sygnału sterującego otwarciem przepustnicy nr 3

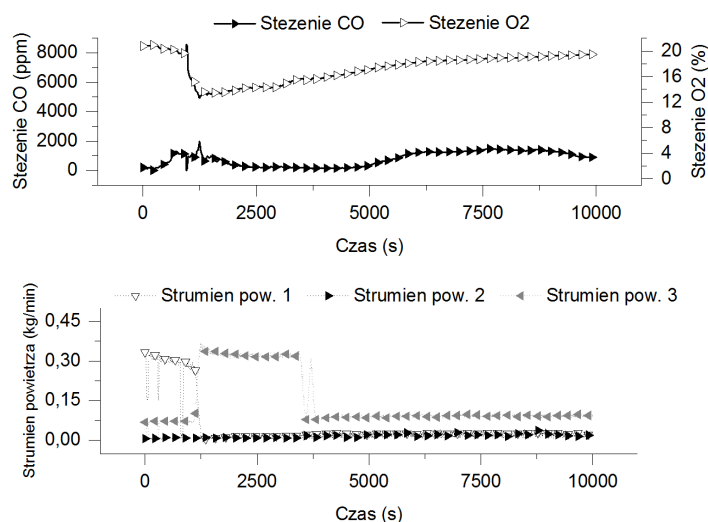
Fig. 10. Changes in the content of carbon monoxide and oxygen in the exhaust gas of stovefireplace with accumulation in the case of use of  $O_2$  concentration as a signal to the control throttle no. 1 and CO concentration as a signal to the control throttle no. 3

Analizując przebieg zmian zawartości tlenku węgla i tlenu w spalinach przedstawiony na rysunku 10, można stwierdzić, że przepustnica 1 otwiera się stopniowo (z zadaniem w algorytmie krokiem czasowym) w momencie, gdy zawartość tle-

nu w spalinach spada poniżej założonego poziomu - w tym przypadku jest to 15%. Czas reakcji, wynikający z czasu przetworzenia próbki spalin pobranej przez analizator na sygnał przekazywany do systemu kontrolno-pomiarowego, przyjęty został na poziomie 20 sekund. W podobny sposób działa przepustnica 3, która otwiera się w momencie, gdy stężenie CO przekroczy zadany na potrzeby testów próg 2000 ppm (krok oraz czas reakcji są takie same jak powyżej). Zastosowanie tego typu sterowania pozwala na ograniczenie wielkości emisji CO - widoczne jest to pomiędzy 25 a 40 minutą procesu spalania, gdy w wyniku wzrostu emisji tlenu węgla otwarta zostaje przepustnica powietrza doprowadzanego od tylnej strony paleniska, a emisja spada po pewnym czasie poniżej zadanego poziomu (co związane jest z zamknięciem przepustnicy). Reakcja regulatora na wzrost emisji CO jest widoczna również pomiędzy 100 a 125 minutą procesu spalania. Przepustnica górna, w odróżnieniu od przepustnicy tylnej, w tej fazie procesu spalania już nie pracuje – ze względu na zawartość tlenu w spalinach przekraczającą 15%, pozostaje ona zamknięta, począwszy od 100 minuty eksperymentu. Średnia zawartość tlenu węgla w spalinach w trakcie całego procesu spalania, uzyskana w wyniku zastosowania regulatora o działaniu opisanym wyżej, wynosi 1770 ppm (w przeliczeniu odpowiada to niespełna 2030 mg/m<sup>3</sup>). Wartość ta jest wyższa niż zakładają najnowsze standardy, stanowi jednak potwierdzenie działania opracowanego regulatora przy danych nastawach oraz danym paliwie.

W drugim z rozważanych przypadków sygnał O<sub>2</sub> sterował pracą przepustnicy 3, natomiast sygnał CO - pracą przepustnicy 1. W trakcie testów spalono taką samą ilość paliwa o parametrach identycznych jak poprzednio. Wielkość emisji CO i O<sub>2</sub> oraz odpowiadający im stopień otwarcia przepustnicy 1 i 3 w trakcie procesu spalania pokazane zostały na rysunku 11.

Przy analogicznych nastawach parametrów regulatora jak poprzednio (jedyną zmianą jest inne sprzężenie sygnałów sterujących z przepustnicami), osiągnięte wyniki są znacząco lepsze. Przepustnica powietrza górnego, przy zadanych parametrach pracy, otwarta jest jedynie na początku procesu spalania, natomiast później (ze względu na niską zawartość tlenu węgla w spalinach) pozostaje zamknięta. Z kolei przepustnica 3 otwarta jest od 20 do ok. 60 minuty procesu spalania, gdy zawartość tlenu w spalinach jest mniejsza niż 15%. Uzyskana w tym przypadku średnia wartość emisji CO do atmosfery w trakcie procesu spalania jest niemal dwukrotnie niższa niż poprzednio. Jak widać, w tym przypadku (przy zastosowaniu danego rodzaju regulatora i danego paliwa) możliwe jest spełnienie wysokich wymagań norm Ecodesign, a także BImSchV 2. Dzieje się tak pomimo wyższej nastawy maksymalnej wartości emisji CO aniżeli wymagana. Jednym z powodów takiej sytuacji jest fakt, iż do obszaru paleniska dostarczana jest odpowiednia ilość powietrza przy zapewnieniu jego dopływu z kierunku umożliwiającego mieszanie się z powstającym w wyniku reakcji Boscha tlenkiem węgla, a następnie jego spalanie.



Rys. 11. Zmiany zawartości tlenku węgla i tlenu w spalinach z piecokominka w przypadku wykorzystania CO jako sygnału sterującego otwarciem przepustnicy nr 1 oraz O<sub>2</sub> jako sygnału sterującego otwarciem przepustnicy nr 3

Fig. 11. Changes in the content of carbon monoxide and oxygen in the exhaust gas of stovefireplace with accumulation in the case of use of CO concentration as a signal to the control throttle no. 1 and O<sub>2</sub> concentration as a signal to the control throttle no. 3

## Podsumowanie

Przeprowadzone badania pokazują, iż możliwe jest osiągnięcie wymaganych normami BImSchV 2 oraz Ecodesign parametrów eksploatacyjnych zarówno istniejących, jak i przyszłych generacji piecokominków. Otrzymana w trakcie pomiarów średnia wartość emisji CO pozwala zakładać, iż w przypadku dalszego rozwoju proponowanego systemu możliwe będzie osiągnięcie jeszcze lepszych rezultatów (dalsze obniżenie emisji CO do atmosfery). Komercjalizacja opracowanego układu sterowania pracą urządzenia oraz zainteresowanie nim producentów i użytkowników piecokominków wymagają obniżenia jego kosztów poprzez zastosowanie niedrogich sensorów CO lub zastąpienie sygnału CO innym sygnałem sterującym (koszt układów do pomiaru stężenia tlenku węgla w spalinach jest aktualnie stosunkowo duży). Dalsze badania powinny być skierowane na możliwość zastosowania wyłącznie sondy lambda (lub sensora mierzącego inną, wskazaną wartość) jako elementu wystarczającego do prawidłowej kontroli pracy układu piecokominka.

## Podziękowania

Praca wykonana w ramach działalności statutowej WEiP, AGH „Badania uwarunkowań zrównowalonego rozwoju energetycznego”.

## Literatura

- [1] Filipowicz M., Szubel M., Sornek K., Bożek E., Kurcz L., Figórski A., Wesołowski W., Ręka J., Badania energetycznych i ekologicznych parametrów pracy domowych urządzeń grzewczych typu piecokominki, V Konferencja Naukowa SOLINA 2014, Rzeszów-Polańczyk, 4-7 czerwca 2014 roku, Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza.
- [2] Nussbaumer T., Overview on Technologies for Biomass Combustion and Emission Levels of Particulate Matter, Expert Group on Techno-Economic Issues (EGTEI) under the Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution, Verenum Press Zurich, 7 May 2014.
- [3] Lachman P., Porównanie emisji zanieczyszczeń różnych technologii grzewczych wg raportu IPTS dla Komisji Europejskiej, InstalReporter 2013, 1, 29-30.
- [4] Calvo A.I., Tarelho L.A.C., Alves C.A., Duarte M., Nunes T., Characterization of operating conditions of two residential wood combustion appliances, Fuel Processing Technology 2014, 126, 222-232.
- [5] Roy M.M., Corscadden K.W., An experimental study of combustion and emissions of biomass briquettes in a domestic wood stove, Applied Energy 2012, 99, 206-212.
- [6] Bäfver L.S., Leckner B., Tullin C., Berntsen M., Particle emissions from pellets stoves and modern and old-type wood stoves, Biomass and Bioenergy 2011, 35, 8, 3648-3655.
- [7] Obaidullah M., Dyakov I.V., Thomassin J.D., Duquesne T., Bram S., Contino F., De Ruyck J., CO emission measurements and performance analysis of 10 kW and 20 kW wood stoves, Energy Procedia 2014, 61, 2301-2306.
- [8] Gölles M., Reiter S., Brunner T., Dourdoumas N., Obernberger I., Model based control of a small-scale biomass boiler, Control Engineering Practice 2014, 22, 94-102.
- [9] Liao Z., Dexter A.L., The potential for energy saving in heating systems through improving boiler controls, Energy and Buildings 2004, 36, 3, 261-271.
- [10] Butschbach P., Hammer F., Kohler H., Potreck A., Trautmann T., Extensive reduction of toxic gas emissions of firewood-fueled low power fireplaces by improved in situ gas sensorics and catalytic treatment of exhaust gas, Sensors and Actuators B: Chemical 2009, 137, 1, 32-41.
- [11] Kurcz L., Filipowicz M., Sornek K., Szubel M., Rzepka K., Ręka J., Źródła ciepła małej mocy w systemach ogrzewania, Cz. 1, Piecokominki - aspekty techniczne, ekonomiczne, ekologiczne i estetyczne, Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja 2015, 3, 104-111.
- [12] Filipowicz M., Kurcz L., Sornek K., Szubel M., Ręka J., Pomiary podstawowych parametrów pracy piecokominków, Instal: Teoria i Praktyka w Instalacjach 2014, 6, 26-33.

## Control of the stove-fireplace with accumulation in relation to the CO emission

This paper presents practical aspects controlling of operation of small-scale heating devices - stove-fireplaces with accumulation - in order to achieve as low as possible CO emission in atmosphere. Based on the previous results, the authors propose the starting version of the new measurement and control system with PLC controller, using two signals to control the air supply to the furnace area: the volumes of O<sub>2</sub> and CO emissions. The mean value of CO emissions to atmosphere confirms the possibility of meet the high requirements of the Ecodesign and BImSchV 2 standards.

**Keywords:** renewable energy, biomass, heating systems, programmable logic controllers