



Sterowanie pracą kotłów węglowych z warstwą stałą

Control of the combustion process in fixed bed coal fired boilers

mgr inż. Michał CHABIŃSKI

Michał Chabiński, Instytut Techniki Ciepłej, Politechniki Śląska, stypendysta w ramach projektu DoktoRIS – Program stypendialny na rzecz innowacyjnego Śląska współfinansowanego przez Unie Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.



W KILKU SŁOWACH

Właściwe sterowanie pracą kotła opalanego węglem jest zadaniem stosunkowo trudnym, w porównaniu do procesu sterowania kotłami na paliwa płynne. Szczególnie trudne jest sterowanie pracą kotła pracującego na potrzeby ciepłownicze, wymagające częstych i znacznych zmian mocy cieplnej. Autorzy niniejszego artykułu postawili sobie za cel eksperymentalne przebadanie kilku algorytmów sterowania wykorzystujących sygnały pomiarowe z czujnika tlenu w spalinach, temperatury spalin oraz mocy kotła. Wpływ sposobu sterowania na sprawność oraz emisję zanieczyszczeń, badano w przypadku kotłów o mocy 25 kW oraz 1,4 MW.

1. Wprowadzenie

Przeważająca część produkcji energii w Polsce oparta jest o energetykę węglową, między innymi ze względu na łatwy dostęp do tego surowca. Kotły węglowe dużej mocy są powszechnie stosowane do produkcji ciepła, pary i energii elektrycznej w znaczącej ilości zakładów przemysłowych czy też elektrowniach [1]. Jednostki o mniejszych mocach wykorzystywane są w sektorze publicznym i prywatnym głównie do ogrzewania budynków i wypełnienia zapotrzebowania na ciepłą wodę użytkową.

W porównaniu z paliwami płynnymi i gazowymi, spalanie węgla jest procesem trudnym zarówno ze względów ekonomicznych jak i ekologicznych. Rosnące ceny tego surowca wymuszają maksymalizację sprawności – zmniejszenie ilości spalanego węgla przy jednoczesnym



SUMMARY

Controlling combustion process in coal fired boilers is much more difficult than in liquid fueled units. It is even more difficult in boilers connected to central heating systems where heat output changes significantly during the working period. Authors of this paper examined possibility of using excess air ratio, temperature and heat output signals to control coal combustion process in 25 kW and 1,4 MW boiler. Influence of control algorithm on efficiency and emission was examined.

utrzymaniu produkcji energii na stałym poziomie. Z kolei wymagania związane z ochroną środowiska obligują użytkowników do ograniczania do minimum emisji szkodliwych produktów spalania do atmosfery. Elementem mającym najistotniejszy wpływ na optymalizację procesu spalania w tym wypadku, uwzględniającym aspekty ekologiczno-ekonomiczne jest sposób sterowania pracą kotła.

Obecnie większość kotłów sterowana jest na podstawie doświadczenia palacza lub przy pomocy prostych i mało efektywnych algorytmów. Takie rozwiązania pozwalają uzyskać zadawalające średnioroczne sprawności, mniejsze jednak o kilka a nawet kilkanaście procent od możliwości, jakie da nam bardziej złożony algorytm elektroniczny [2]. Sterowanie na podstawie zawartości tlenu w spalinach, maksymalizacji sprawności a także z wykorzystaniem funkcji empirycznych pozwala na dokładniejsze ustalenie parametrów kotła, co może przełożyć się na zmniejszenie zużycia paliwa oraz ograniczenie emisji zanieczyszczeń.

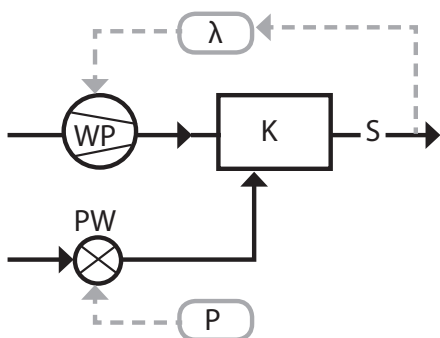


W przypadku małych kotłów o mocy rzędu 10 kW zwiększenie sprawności o 10 % da nam roczne oszczędności w wysokości około kilku-set złotych, co jest kwotą na tyle małą, że może uzasadnić stosowanie jedynie najprostszych i najtańszych algorytmów. W przypadku kotła o mocy 500 kW roczne oszczędności paliwa, osiągane przy podobnym wzroście sprawności mogą sięgać kilkudziesięciu tysięcy złotych, a to stanowi już podstawę do zastosowania bardziej rozbudowanych systemów sterowania.

W Instytucie Techniki Ciepłej od wielu lat prowadzone są badania wpływu rodzaju algorytmu na sprawność energetyczną oraz poziom emisji substancji szkodliwych. Niniejszy artykuł przedstawia wyniki badań nad możliwością wykorzystania wybranych algorytmów do poprawy funkcjonowania kotłów o różnej mocy nominalnej.

2. Sterowanie procesem spalania w kotłach węglowych

W przypadku kotłów węglowych ze złożem stałym głównymi parametrami, które można regulować podczas spalania są strumień paliwa oraz powietrza podawane do komory kotła. W zależności od rodzaju kotła regulacja strumienia może być prowadzona ręcznie lub automatycznie. W przypadku sterowania ręcznego wartości dobierane są przez palacza/użytkownika na podstawie obserwacji paleniska bądź analizy danych z urządzeń pomiarowych. W przypadku sterownika elektronicznego regulacja następuje automatycznie na podstawie sygnałów zwrotnych z czujników umieszczonych na kotle (Rysunek 1).



Rysunek1 Schemat prostego układu sterowania kotłem. K - kocioł, WP- wentylator powietrza, PW- podajnik węgla, S- wylot spalin, λ - sygnał stosunku nadmiaru powietrza, P- sygnał wymaganej mocy kotła

Sygnałem zwrotnym wykorzystywanym do regulacji obrotów wentylatora powietrza podawanego do komory spalania jest zazwyczaj sygnał stosunku nadmiaru powietrza (λ). Stosunek ten przyjmuje dla danego kotła i węgla wartość optymalną, przy której możemy uzyskać maksymalną sprawność przy dopuszczalnych stężeniach zanieczyszczeń w spalinach [3]. Zbyt wysokie λ skutkuje zwiększeniem ilości spalin i straty wylotowej fizycznej, zbyt niskie zwiększeniem straty chemicznej. Istnieje również możliwość wykorzystania do sterowania obrotami wentylatora innych sygnałów zwrotnych takich jak np. temperatury spalin, przy założeniu, że jest ona dobrze skorelowana ze stosunkiem nadmiaru powietrza.

Sygnałem regulującym strumień paliwa może być sygnał wymaganej mocy kotła lub temperatury wody obiegowej. Wartości wymaganej mocy lub temperatury zwykle programowane są przez użytkowników w zależności od potrzeb lub automatycznie dobierane przez regulator pogodowy.

3. Badania kotłów sterowanych przez algorytmy o różnym stopniu komplikacji

Uwzględniając wymienione możliwości sterowania procesem spalania w kotłach węglowych opracowano i przetestowano cztery algorytmy o różnym stopniu komplikacji:

- Algorytm standardowy (odniesienia) - typowy algorytm wykorzystywany w małych kotłach domowych z automatycznym podajnikiem węgla. Strumień węgla programowany jest ręcznie poprzez ustawienie czasów pracy i przerwy podajnika. Obroty wentylatora również ustawiane są przez użytkownika i pozostają niezmiennie w czasie pracy kotła. Moc kotła regulowana jest przez wyłączanie kotła po osiągnięciu temperatury zadanej
- Algorytm λ - obroty wentylatora regulowane są na podstawie sygnału stosunku nadmiaru powietrza. Regulacja strumienia paliwa oraz mocy odbywa się podobnie jak w przypadku algorytmu standardowego
- Algorytm T_{sp} - obroty wentylatora regulowane są na podstawie sygnału z czujnika temperatury spalin. Regulacja strumienia paliwa

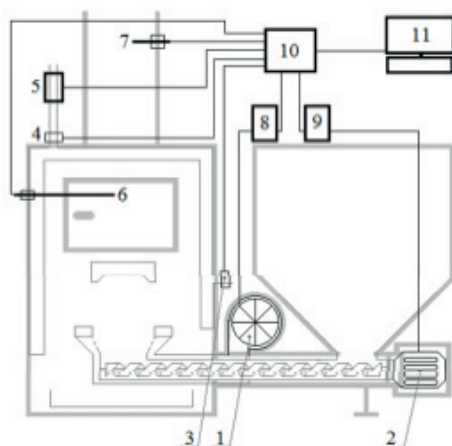




oraz mocy odbywa się tak jak w przypadku poprzednich algorytmów

- Algorytm automatyczny - obroty wentylatora regulowane są na podstawie sygnału z czujnika temperatury spalin. Podajnik pracuje w trybie ciągłym. Regulacja mocy następuje poprzez zmianę obrotów silnika podajnika na podstawie sygnału mocy kotła

Wybrane algorytmy zostały przełożone na matematyczne zależności możliwe do zapisania w języku programowania VisualBasic a następnie zaimplementowane na elektronicznym swobodnie programowalnym module sterującym marki Advantech. Układ sterujący kotła o mocy 25 kW przedstawiony został na rysunku poniżej.

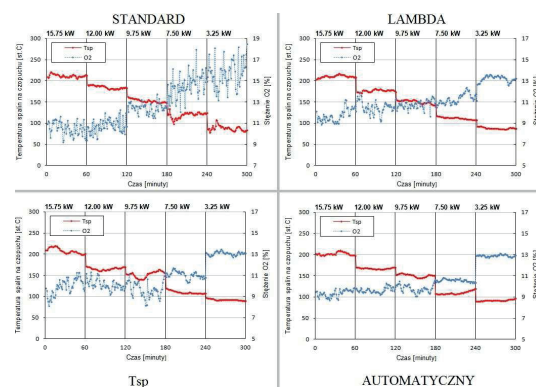


Rysunek 2. Schemat układu sterowania kotłem. 1 – Wentylator, 2 – Silnik podajnika, 3 – Czujnik temperatury wody zasilającej, 4 – Czujnik temperatury wody powrotnej, 5 – Przepływomierz, 6 – Temperatura spalin, 7 – Sonda lambda, 8 – Falownik silnika wentylatora, 9 – Falownik silnika podajnika, 10 – Moduł kontrolno pomiarowy Advantech, 11 – Komputer

Badania prowadzone były na kotle retortowym z automatycznym podajnikiem paliwa o mocy 25 kW, który znajduje się w laboratorium Instytutu Techniki Ciepłej oraz na kotle o retortowym o mocy 1,4 MW zlokalizowanym w kotłowni jednego z Przedsiębiorstw Energetyki Ciepłej na Górnym Śląsku. W obydwu przypadkach porównane zostały parametry pracy kotła sterowanego przez algorytm standardowy oraz poprzez bardziej zaawansowane algorytmy elektroniczne. W trakcie badań mierzony był skład spalin (O_2 , CO_2 , CO , NO_x , SO_2 , OGC) oraz sprawność kotła. Należy również zaznaczyć, że w pomiarach energetyczno emisyjnych oraz obliczeniach wykonywanych zgodnie z normami dotyczącymi tego typu badań.

4. Wyniki badań kotła retortowego o mocy 25 kW

Na rysunku 3 przedstawiono stężenie tlenu w spalinach oraz temperaturę spalin jako funkcję czasu trwania testu przy stopniowo zmniejszającej się mocy kotła w przypadku czterech różnych algorytmów sterowania. Pomiary przy zmiennej mocy wynikają z wytycznych normy DIN 4702 [4, 5]. Jak można zaobserwować w algorytmie standardowym stężenie tlenu w spalinach waha się w granicach tym szerszych im mniejsza jest moc kotła. Wynika to z tego, że zastosowany system pomiarowy rejestrował pomiary w stałych odstępach czasowych i w związku z tym czasem zasysał spaliny podczas włączonego podajnika paliwa i wentylatora a czasem podczas gdy te urządzenia były wyłączone. W przypadku trzech pozostałych algorytmów poziom tlenu zmienia się w mniejszym przedziale niż w przypadku algorytmu wyjściowego. Można również zauważyć wyraźny spadek wahań stężenia tlenu w spalinach w przypadku algorytmu automatycznego – tu oprócz regulacji obrotów wentylatora zmieniony został tryb pracy podajnika węgla z przerywanego na ciągły, co również mogło wpłynąć na poprawę stabilności pracy kotła.



Rysunek 3. Porównanie zmian stężenia tlenu i temperatury spalin w czasie trwania testu w przypadku czterech różnych algorytmów sterowania.

Utrzymywanie stałego stężenia powietrza w spalinach czy też stosunku nadmiaru powietrza nie jest celem samym w sobie, lecz ma prowadzić do poprawy sprawności i zmniejszenia emisji substancji szkodliwych. Z tego względu na podstawie przeprowadzonych pomiarów dokonano przeliczenia otrzymanych wyników na wartości reprezentatywne dla pracy kotła pod względem energetyczno emisyjnym w całym



okresie danego testu. W tabelicy nr 1 przedstawiono zestawienie wyników badań energetyczno-emisyjnych kotła o mocy 25 kW w przypadku różnych sposobów sterowania.

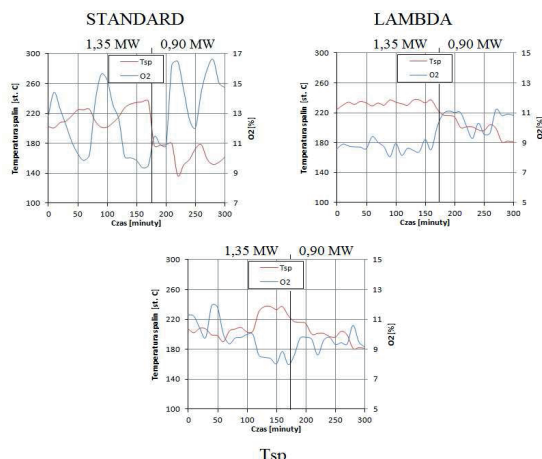
	Jednostka	Algorytm			
		Standard	Lambda	Tsp	Automat
Sprawność	%	62,52	69,19	68,79	71,53
O ₂		13,02	11,18	10,87	10,59
CO	mg/ m ³ n (13% O ₂)	510	489	519	280
NO _x		307	386	411	403
OGC		10	20	9	9
T _{spalin}		°C	146	148	147

Tabela 1. Wyniki badań kotła 25 kW w przypadku zastosowania różnych algorytmów sterowania

Wyniki badań zamieszczonych w tabeli wyraźnie wskazują na przewagę algorytmów sterowania z wykorzystaniem regulacji poziomem tlenu w spalinach i regulacji strumieniem węgla nad standardowym algorytmem sterowania utrzymującym stałe obroty wentylatora gdzie podajnik pracuje w trybie przerywanym. Zwiększenie komplikacji algorytmu pozwalają na osiągnięcie znacząco wyższej sprawności przy porównywalnych poziomach emisji substancji szkodliwych.

5. Wyniki badań kotła retortowego o mocy 1,4 MW

Na rysunku 4 przedstawiono stężenie tlenu w spalinach oraz temperaturę spalin jako funkcję czasu trwania testu w przypadku trzech różnych algorytmów sterowania.



Rysunek 4. Porównanie zmian stężenia tlenu i temperatury spalin w czasie trwania testu w przypadku trzech różnych algorytmów sterowania kotłem o mocy 1,4 MW.

Pomiary prowadzone były przy 2 poziomach obciążenia. Ze względu na konieczność utrzy-

mywania produkcji ciepła na założonym przez ciepłownię poziomie, pomiar nie mógł być prowadzony w szerszym zakresie zmian mocy kotła. Również ze względów konstrukcyjnych zbadane mogły zostać jedynie algorytmy regulujące ilością powietrza podawanego do komory spalania. Podobnie jak w przypadku kotła o mocy 25 kW, można zauważyć, że regulacja obrotami wentylatora podmuchowego na podstawie sygnałów stosunku nadmiaru powietrza i temperatury spalin, kompensuje wahania tlenu w spalinach. Wpływ takiego sposobu sterowania na sprawność i emisję zanieczyszczeń uzasadniają wyniki przedstawione w poniższej tabeli. Regulacja obrotami wentylatora na podstawie wspomnianych wcześniej sygnałów przekłada się na wyraźny wzrost sprawności przy utrzymaniu stężenia zanieczyszczeń w spalinach na podobnym poziomie.

	Jednostka	Algorytm		
		Standard	Lambda	Tsp
Sprawność	%	53,40	72,71	70,60
O ₂		12,93	9,43	9,66
CO	mg/ m ³ n (13% O ₂)	1700	2016	1599
NO _x		329	340	350
T _{spalin}	°C	191	220	217

Tabela 2. Wyniki badań kotła 1,4 MW w przypadku zastosowania różnych algorytmów sterowania

6. Podsumowanie

W ramach badań przeprowadzone zostały pomiary energetyczno-emisyjne pracy kotłów o mocy 25 kW i 1,4 MW sterowanych przez algorytmy o różnym stopniu komplikacji. Wyniki pomiarów wyraźnie pokazują, że sterowanie procesem spalania na podstawie takich sygnałów jak stosunek nadmiaru powietrza czy też mocy kotła przekłada się na wzrost sprawności. Ponadto możliwe jest wykorzystanie sygnału czujnika temperatury spalin do sterowania obrotami wentylatora powietrza podawanego do komory spalania. W przypadku kotła o mocy 25 kW kilkuprocentowy wzrost sprawności nie przełoży się na realne oszczędności związane z ograniczeniem zużycia paliwa, ze względu na wysoki koszt aparatury sterującej. Dla kotła o mocy 1,4 MW kilkunastoprocentowy wzrost sprawności może skutkować rocznymi oszczędnościami rzędu kilkudziesięciu tysięcy złotych.

Literatura

1. Szarowski A., Janta-Lipińska S.: Fuel Combustion optimizing by regulated level of chemical underburn. Proceedings of the 21st International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, Cracow-Gliwice 2008
2. A. Szlęk, M. Chabiński: Wpływ algorytmu sterowania na sprawność kotła rusztowego. Zrównoważona gospodarka energetyczna. Katowice, 2008
3. M. Chabiński, A. Szlęk, Porównanie wybranych algorytmów sterowania kotłami małej mocy Nowoczesne Ciepłownictwo nr 7/2011
4. A. Szlęk, M. Chabiński, Propozycja wyznaczania sprawności kotłów węglowych małej mocy, Archiwum Spalania Vol.11 (2011) Nr 1-2
5. Norma DIN4702 Central heating boiler; determination of the standard efficiency and the standard emission.