

mgr inż. Maciej Szumski  
Wydział Elektroniki i Technik Informatycznych  
Politechnika Warszawska

## REGULATOR KOTŁA STAŁOPALNEGO

*Praca zawiera krótki opis procesów spalania w kotle retortowym spalającym węgiel kamienny, wykonane badania kotłów oraz realizację regulatora procesu spalania. Celem pracy jest opracowanie algorytmów ekologicznego i ekonomicznego spalania węgla w kotłach retortowych. Przedstawiono realizację algorytmu Fuzzy Logic opartego na charakterystyce statycznej kotła.*

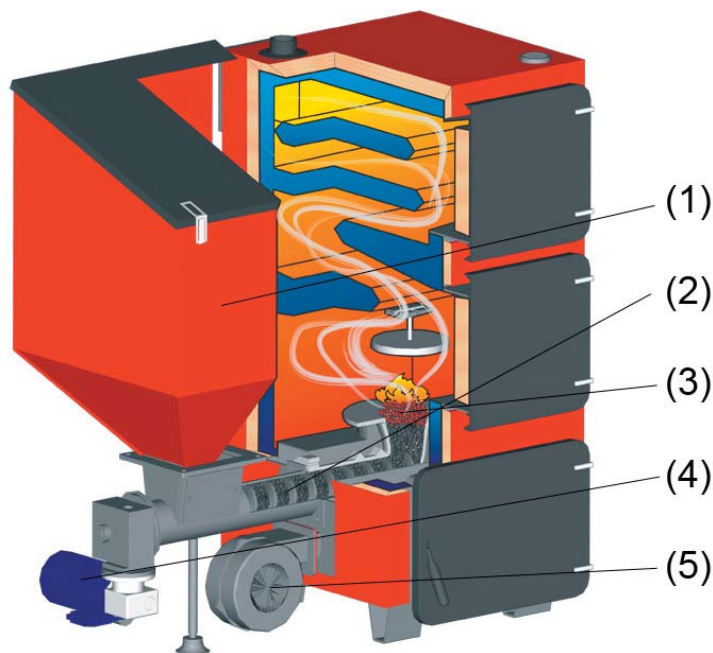
### REGULATOR FOR COAL BOILERS WITH SPIRAL FEEDERS

*The paper includes a brief description of processes occurring during burning of coal in a coal boiler, measured characteristics of such boilers and an implementation of a burn process controller. The goal is to create control algorithms ensuring ecological and economical process of burning coal in boilers with spiral feeders. Presented is an implementation of Fuzzy Logic algorithm based on static characteristics of a boiler.*

## 1. OPIS OBIEKTU STEROWANIA

### 1.1. Kocioł stałopalny z retortowym podawaniem paliwa

Celem pracy jest opracowanie algorytmu sterowania kotła stałopalnego z retortowym podawaniem węgla. Algorytm powinien zapewniać ekonomiczne spalanie węgla z jednocześnie możliwie małą emisją spalin do atmosfery.



Budowa i zasada działania kotła retortowego opalanego węglem kamiennym pokazane są na rysunku powyżej. Paliwo (węgiel) jest zasypywane do podajnika (1) i podawane za pomocą retorty (2) do paleniska (3), retorta jest napędzana silnikiem (4). Do prawidłowego spalania określonej dawki paliwa potrzebna jest właściwa ilość powietrza, jest to regulowane za

pomocą wentylatora (5). Obiektem sterowania jest sam kocioł (regulator paleniska) wraz z instalacją centralnego ogrzewania i ciepłej wody użytkowej (regulator układu cieplnego).

## 1.2. Węgiel kamienny - paliwo

Węgiel naturalny [Jar96] stanowi mieszaninę chemicznych związków organicznych zawierających pierwiastki C, H, O oraz pewną ilość N i S. W nieorganicznej części węgla występują różne ilości minerałów i wilgoci. Węgiel naturalny powstał w wyniku rozkładu materiału roślinnego bez dostępu powietrza. Najstarszym geologicznie węglem, o największej zawartości pierwiastka C jest antracyt, pośrednie miejsca zajmują węgiel kamienny i mniej uwęglony węgiel brunatny, a najmłodszy jest torf. Substancja mineralna występująca w węglu nie jest związana chemicznie z substancją organiczną. Na ogół ponad 50 % substancji mineralnej przypada na związki glinu ( $Al_2O_3$ ) i krzemu ( $SiO_2$ ), a inne związki występują w mniejszych, różniących się między sobą ilościach.

Węgiel [Kol64] składa się z trzech podstawowych składników:

- z substancji organicznej (palnej), czyli tych składników które w procesie spalania ulegają utlenieniu,
- substancji nieorganicznej (mineralnej), czyli popiołu – niepalnej,
- wody powodującej wilgotność węgla, składa się z wilgotności przemijającej (można usunąć przez suszenie) i higroskopijnej, związanej ze strukturą węgla.

Do cech mających zasadnicze znaczenie dla przebiegu procesów paleniskowych należą:

- zawartość części lotnych, czyli ilość substancji, która wydzieliła się z węgla przy jego podgrzewaniu (suchej destylacji), w procesie odgazowania. Proces ten rozpoczyna się od temperatury powyżej 100 °C, osiąga swoje najwyższe nasilenie w granicach temperatur 400 – 500 °C i kończy w temperaturze 1100-1250 °C. Prędkość spalania zależna jest w decydującej mierze od zawartości części lotnych w paliwie: w odróżnieniu od koksu (pozostałość po odgazowaniu), produkty odgazowania cechuje intensywny przebieg procesu spalania. Ze wzrostem zawartości części lotnych maleje ilość pozostałej do spalania substancji stałej, w rezultacie czego czas ogólny, potrzebny do spalania całego paliwa jest mniejszy. Długi płomień powoduje wzrost natężenia wymiany ciepła drogą promieniowania.
- spiekalność: cecha ta ma duże znaczenie w paleniskach z rusztem mechanicznym (np. kotły retortowe), szczególnie gdy spiekane są drobne sortymenty (groszek). Spiekalność jest wówczas cechą korzystną, gdyż powoduje zespalanie się drobnych frakcji w większe bryły, wskutek czego maleje zarówno strata wskutek przesypu, jak strata koksiku lotnego. Ze wzrostem zawartości popiołu maleje spiekalność.
- wilgoć: z punktu widzenia bilansu energetycznego zawartość wilgoci w paliwie jest niekorzystna, gdyż wpływa na wzrost straty kominowej i obniżenie wartości opałowej paliwa.
- zawartość popiołu oraz jego własności: duża zawartość popiołu zmniejsza wartość opałową węgla, ważna jest przy tym nie tylko ilość popiołu lecz również jego własności takie jak temperatura mięknięcia i temperatura topnienia. Wysokość tych temperatur zależna jest od składu chemicznego popiołu. Składnikami wpływającymi na wzrost temperatury topnienia są: krzemionka  $SiO_2$  oraz korund  $Al_2O_3$ . Rolę topnika obniżającego temperaturę topnienia spełnia tlenek żelaza  $Fe_2O_3$ , ponadto w popiele występują tlenki wapnia  $CaO$  i magnezu  $MgO$  oraz siarczan np.  $CaSO_4$ . Ogólnie można stwierdzić, że żużle niskotopliwe powodują w paleniskach rusztowych zalewanie szczelin

nadmuchowych (powietrza pierwotnego). Poza tym żużel taki zalewa cząstki paliwa, zamykając dostęp powietrza, w rezultacie rosną straty popielnikowe. Jeżeli kocioł zostanie zasilony paliwem o popiele łatwo topliwym, wówczas popiół – unoszony ze spalinami z komory paleniskowej do kanałów wypełnionych powierzchniami konwekcyjnymi – znajduje się w stanie plastycznym: w rezultacie popiół taki zaczyna przyklejać się do tych powierzchni. Nie tylko utrudnia to wymianę ciepła, lecz również zmniejsza przekrój kanałów – oba te zjawiska są przyczyną spadku wydatku i sprawności kotła.

- zawartość siarki: polskie węgle energetyczne wykazują na ogół niską zawartość siarki wolnej (palnej), mimo to może ona stać się źródłem pewnych kłopotów. W wyniku utleniania siarki w warunkach paleniska otrzymuje się bezwodnik kwasu siarkowego  $\text{SO}_2$ . Obecność tego gazu nie jest groźna dopóki nie wejdzie on w związek z wodą, tworząc kwas siarkawy. Kwas ten ma silne własności korozyjne w stosunku do stali. W przypadku, gdy spaliny mogą osiągnąć punkt rosy (w spalinach znajduje się duża ilość pary wodnej pochodząca z odparowania wilgoci i utlenienia wodoru części lotnych) w kotle występują silne zjawiska korozyjne.
- ziarnistość węgla ma duży wpływ na pracę palenisk rusztowych. Warunki pracy takich palenisk pogarsza przede wszystkim ilość podziarna. Podziarnem nazywa się ziarno o średnicy mniejszej od dolnej granicy, nadziarnem – ziarno o średnicy większej od górnej granicy charakteryzującej dany sortyment paliwa. Ziarnistość powoduje wzrost straty przesypu, a jednocześnie przyczynia się do zatykania drogi powietrza między ziarnami spalanej warstwy paliwa. Jeśli paliwo cechuje się ponadto niską spiekalnością, wówczas drobne frakcje mogą być unoszone do kanałów spalinowych, powodując straty koksiku lotnego, jak również zanieczyszczenia powierzchni ogrzewanych kotła. Wszystkie te zjawiska wpływają niekorzystnie na sprawność kotła.

### 1.3. Emisja zanieczyszczeń [Jęd77], [DDJO07], [Jar96]

W procesach energetycznego spalania węgla głównymi zanieczyszczeniami emitowanymi do atmosfery są pyły, tlenki siarki, tlenki węgla i tlenki azotu. Emisja pyłów zależy od zawartości popiołu w paliwie oraz unosu pyłu z paleniska, który zależy od konstrukcji kotła. Emisję dwutlenku siarki łatwo jest obliczyć na podstawie znajomości zawartości siarki w paliwie. Siarka występuje w węglu w postaci siarki organicznej palnej oraz siarki pirytovej. W małych kotłach z rusztami stałymi lub mechanicznymi można przyjmować do obliczeń emisji  $\text{SO}_2$  tylko zawartość siarki palnej.

Określenie emisji tlenków azotu powstających w procesie spalania węgla jest trudniejsze. Tlenki azotu powstają w wysokich temperaturach panujących w komorze paleniskowej na skutek wiązania się atmosferycznego tlenu i azotu. Powstający tlenek azotu  $\text{NO}$  nie jest związkiem trwałym i może po zmianie warunków ulegać rozpadowi z powrotem na tlen i azot. Jak wykazały badania, zawartość azotu i siarki w paliwie nie wpływa na tworzenie się tlenków azotu. Zasadniczym parametrem wpływającym na reakcję wiązania tlenu z azotem jest temperatura. Im większa zawartość węglowodorów w paliwie tym wyższa temperatura płomienia. Tak więc największe ilości tlenków azotu powstają przy spalaniu olejów opałowych, niższe przy spalaniu węgla i najniższe przy spalaniu gazu.

Tlenek węgla jest gazem bezbarwnym i bez zapachu. Dla istot żywych jest trujący dlatego, że w zetknięciu z krwią wiąże się z barwnikiem krwi – hemoglobina, z którą ma 200-240 razy większe powinowactwo niż tlen. Jest to dość trwałe, koordynacyjne połączenie tlenku węgla z atomami żelaza hemoglobiny, które w konsekwencji uniemożliwia naturalną reakcję

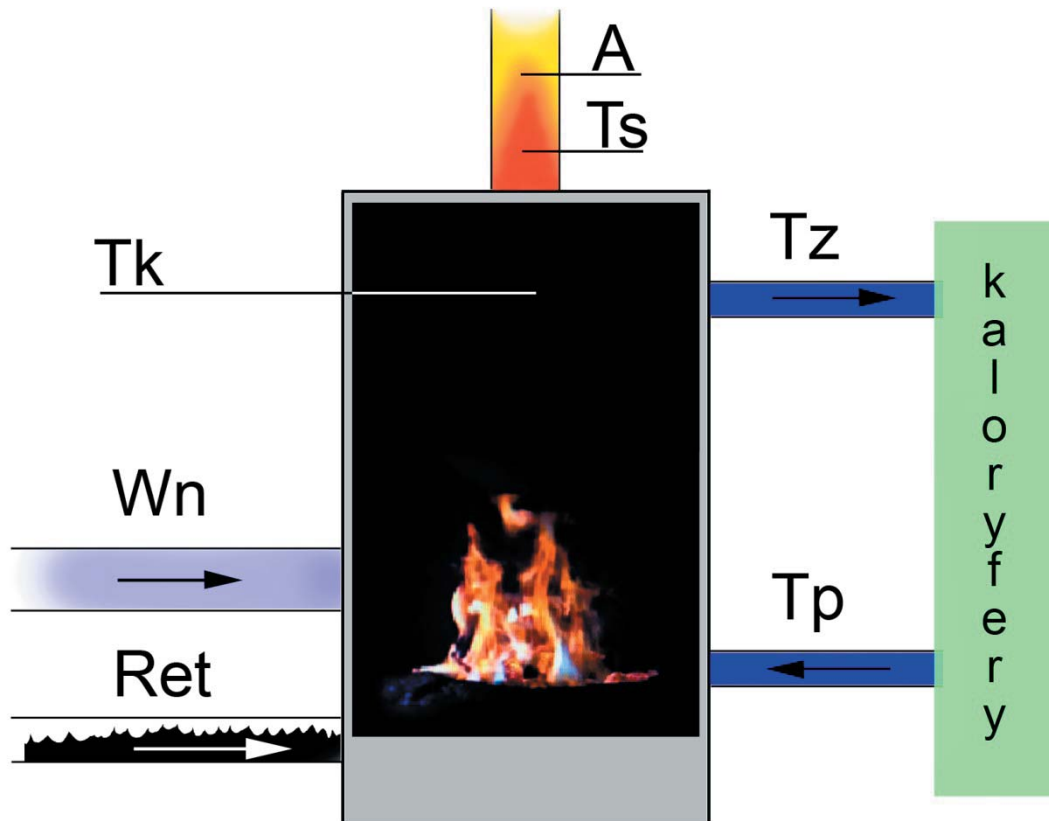
hemoglobiny z tlenem. Blokowanie hemoglobiny trwa przez kilka godzin od momentu wystawienia organizmu na działanie tlenku węgla, co powoduje, że gaz ten jest szczególnie niebezpieczny. Większość śmiertelnych wypadków, mających związek z efektami spalania, zdarzyło się w wyniku zatrucia tlenkiem węgla w budynkach wyposażonych w piece o nieszczelnych paleniskach i kanałach kominowych, w pomieszczeniach słabo wentylowanych. Stężenie 100 ppm ( $125 \text{ mg/m}^3$ ) CO w powietrzu i oddziaływanie na człowieka w czasie jednej godziny powoduje wiązanie 40% hemoglobiny i wywołuje zaburzenia kardiologiczne. Wartość  $250 \text{ mg/m}^3$  tlenku węgla w powietrzu może być przyczyną śmierci.

Mechanizmy powstawania tlenku węgla. Węgiel C, jako pierwiastek zawarty w paliwie, spalając się przechodzi przez stadium tlenku węgla CO. Tak więc działania mające na celu zmniejszenie zawartości tlenku węgla w spalinach polegają na przyspieszeniu jego utleniania do nietoksycznego dwutlenku węgla CO<sub>2</sub>. Tlenek węgla CO powstaje w dużych ilościach w miejscach silnego niedoboru tlenu, który jest niezbędny do dokończenia reakcji utleniania węgla na CO<sub>2</sub>. Tlenek węgla może pojawić się również w zwiększonych ilościach w miejscach obszaru spalania, w których lokalny skład mieszanki jest bliski stechiometrycznemu, a odpowiadająca mu temperatura spalania bliska maksymalnej. W miejscach tych CO powstaje wskutek dysocjacji CO<sub>2</sub>. Tlenek węgla utlenia się stosunkowo wolno i w wielu urządzeniach technicznych właśnie prędkość utleniania CO wyznacza czas przebywania niezbędny do tego, aby spalanie dobiegło końca.

## 2. REGULATOR PALENISKA

### 2.1 Identyfikacja obiektu sterowania

Stosunek rzeczywistego zapotrzebowania na powietrze do zapotrzebowania teoretycznego jest określony jako współczynnik lambda:  $\lambda = L_{rz} / L_t$ . Ilość podawanego powietrza jest parametrem krytycznym: właściwa powoduje najlepsze spalanie, czyli pozwala z zadanej dawki paliwa uzyskać najwięcej energii przy jednoczesnej najmniejszej emisji szkodliwych substancji do atmosfery. Mniejsza ilość powietrza powoduje niespalenie części paliwa i niedopalenie paliwa spalanego co powoduje negatywne skutki ekonomiczne. Zbyt duża ilość powietrza powoduje, z kolei ochłodzenie przestrzeni spalającej paleniska i gwałtowny wzrost emisji tlenku węgla. Węgla kamienne zawierają znaczną zawartość części lotnych (około 40 %). Przy spalaniu węgla ograniczenie dopływu powietrza nie spowoduje zatrzymania procesu, lecz następuje odgazowanie części lotnych, które nie spalone w postaci tlenku węgla i sadzy będą uchodziły do komina. Nadmiar powietrza powoduje ochłodzenie paleniska i kotła, czyli mniejsza część uzyskanej ze spalania energii jest przekazywana do instalacji ciepłowniczej – pogarsza się wymiana ciepła pomiędzy paleniskiem a obiegiem czynnika grzewczego (wody) w kotle. Ilość podawanego powietrza jest sumą strumienia nawiewanego przez wentylator oraz naturalnego ciągu kominowego.



Sygnały sterujące (wejścia):

**Wn** – wentylator, sygnał o zakresie 0% do 100% mocyysterowania.

**Ret** – retorta, sygnałysterowania silnika retorty. Silniki są tak dobierane, że konieczne jestysterowanie równe 100%. Ilość podawanego paliwa reguluje się wypełnieniem sygnału Ret: na przykład przy stałym czasie podawania węgla 15 sekund, reguluje się czas przerwy.

Sygnały wyjściowe (mierzone):

**Tz** – Temperatura zasilania instalacji grzewczej (kaloryfery). Zakres to 40 – 80 °C.

**Tp** – Temperatura powrotu z instalacji grzewczej (kaloryfery). Różnica temperatur Tz-Tp (przy stałym przepływie czynnika grzewczego – wody) jest wprost proporcjonalna do mocy cieplnej oddawanej do instalacji grzewczej (zależność ta nie jest liniowa).

**Ts** – Temperatura spalin.

**Tk** – Temperatura w komorze spalania.

**A** – Analizator spalin. Pozwala na szybkie zidentyfikowanie właściwych warunków spalania i jest używany na etapie wyznaczania charakterystyk kotła.

Zakłócenia: rodzaj i wilgotność paliwa, wartość ciągu kominowego (zależy od wysokości komina i różnicy gęstości spalin u dołu i u góry komina, a gęstość zmienia się z temperaturą spalin, czyli ciąg zależy także od temperatury zewnętrznej). Osady na ścianach komory spalania pogarszają wymianę ciepła pomiędzy paleniskiem a czynnikiem grzejnym co prowadzi do wzrostu temperatury spalin i pogarsza sprawność kotła. Zakłóceniem jest także wielkość odbioru ciepła przez instalację grzewczą – zbyt mała w stosunku do ilości

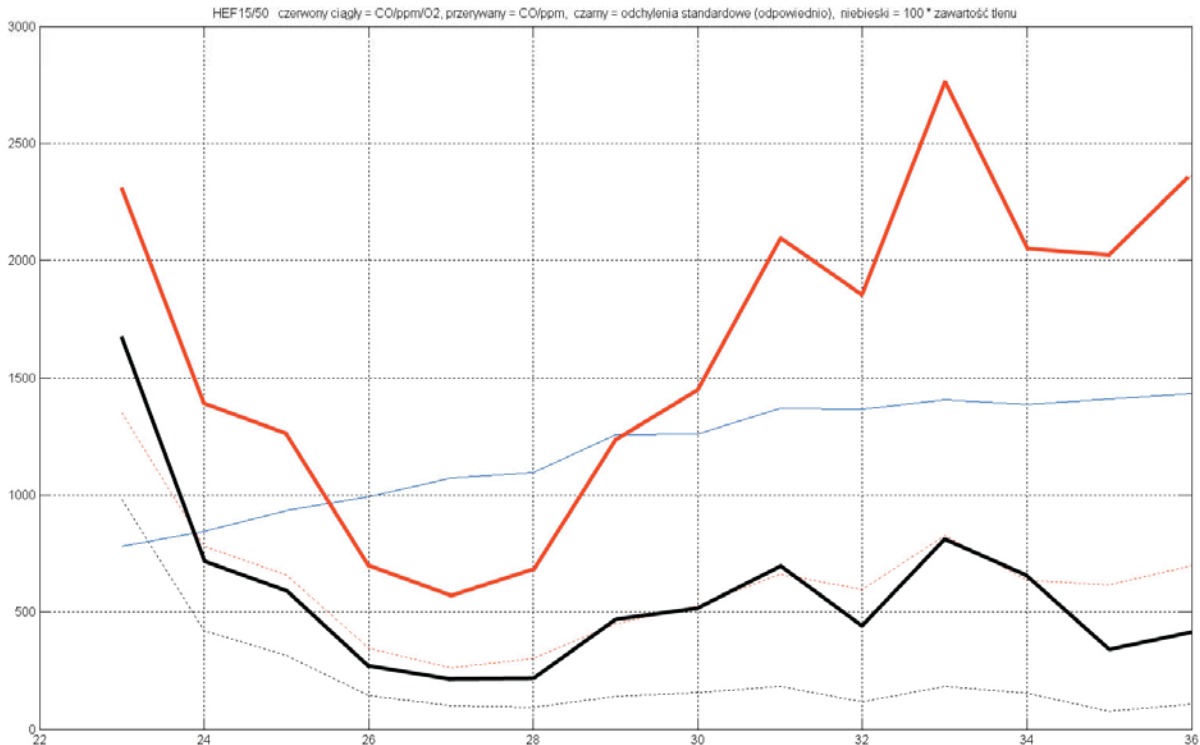
dostarczanego paliwa powoduje podwyższenie temperatur  $T_z$  i  $T_p$  (zasilania i powrotu) i pogarsza wymianę ciepła z paleniskiem, czyli obniża sprawność kotła.

Obecnie kotły są sterowane za pomocą sterowników w których ręcznie ustawia się czas przerwy pracy retorty (w sekundach – w ten sposób określa się wielkość strumienia paliwa jako wypełnienie: 15 s pracy i np. 45 s przerwy) oraz procent mocy wentylatora. Dokonuje się tego „na oko” obserwując palenisko: ilość paliwa i wysokość oraz kolor płomienia. Na zdjęciach poniżej: z lewej strony płomień jest zbyt niski – nadmuchi powietrza jest zbyt mały, z prawej strony jest zbyt duży.



Niestety w dość szerokim zakresie mocy wentylatora ( $\pm 5\%$ ) płomień jest określany jako prawidłowy. W celu ustalenia właściwej temperatury spalin należy użyć analizatora spalin.

Pomiary z wykorzystaniem analizatora spalin zostały wykonane w następujących warunkach: ręcznie ustawiono stały strumień paliwa: 15 s pracy retorty i 50 s przerwy, następnie ręcznie była ustawiana stała moc wentylatora kolejno od 23 % do 36 %, z krokiem 1 %. Po ustabilizowaniu się warunków w komorze spalania, następowała rejestracja danych (przez  $\frac{1}{2}$  godziny) uzyskiwanych z analizatora spalin, przede wszystkim zawartość tlenku węgla i tlenu w spalinach. Dane zarejestrowane były poddawane analizie. Stężenie tlenku węgla przedstawione w dziedzinie czasu jest bardzo dynamiczne, co wynika z silnej „turbulentności” procesu. Do oceny uzyskanych wyników zostały użyte metody identyfikacji opisane w [LL06].

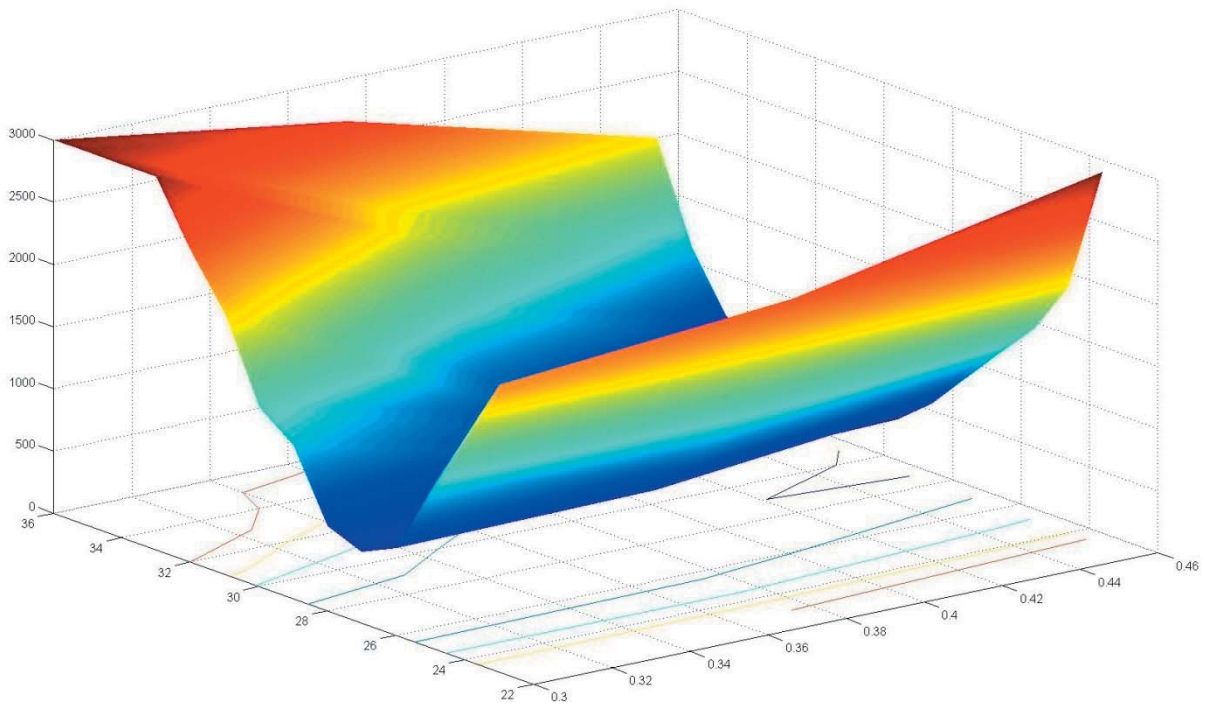


Wykres powyżej przedstawia stężenie tlenku węgla w funkcji mocy wentylatora, czyli ilości podawanego powietrza, przy stałym strumieniu paliwa. Linia czerwona ciągła to średnie stężenie CO odniesione do zawartości tlenu w spalinach, linia czarna ciągła to odchylenie standardowe. Najlepsza ilość powietrza odpowiada 27 % mocy wentylatora, stężenie tlenku węgla oraz odchylenie standardowe są najmniejsze. Wskazuje to na istnienie zależności: **im lepsze warunki spalania, tym mniejsza emisja tlenku węgla i bardziej stabilny przebieg procesu spalania.**

Wykres wskazuje wyraźnie, że jest bardzo wąski zakres regulacji, w którym kocioł pracuje poprawnie. Obecnie produkowane i używane sterowniki kotłów (to nie są regulatory) nie regulują kotła tylko nim sterują z ręcznie ustawianymi nastawami: ilość podawanego węgla i moc wentylatora – jest to proste przeniesienie nastaw ręcznych. Zarówno producenci kotłów, jak i instalatorzy oraz użytkownicy ustawiają kocioł obserwując płomień oraz popiół. Powoduje to takie ustawienie pracy kotła, że pracuje on ze zbyt dużą ilością powietrza, czyli w obszarze dużej emisji do atmosfery szkodliwych substancji: głównie tlenku węgla oraz pyłu – odpowiada to punktom 32 % i 34 % na wykresie. Unios pyłów oczywiście wzrasta ze wzrostem mocy wentylatora, czyli wzrostem strumienia powietrza. Taki sposób nastawiania ręcznego wynika z faktu, że straty kominowej oraz emisji szkodliwego tlenku węgla „nie widać”, widać natomiast popiół, który oczywiście nie zawiera niedopalonych kawałków węgla gdy strumień powietrza jest zbyt duży.

Nastawy sterownika 15/40 32 % oraz 15/50 30 % zostały dobrane metodą prób (bez analizy spalin) zgodnie z wytycznymi producenta kotłów. Przyjąłem strumienie paliwa 15/40 oraz 15/50 jako bazowe i z prostej proporcji (liniowość wypełnienia) wyliczyłem czasy przerwy strumieni większych i mniejszych otrzymałem: 128 s, 87 s, 64 s, 50, 40 s, 32 s, 27 s, 23 s, 19 s, 16 s, 14 s (przy stałym czasie podawania paliwa 15 s).

Pomiary zostały powtórzone dla pozostałych, wyznaczonych strumieni paliwa. Przykładowe wyniki na rysunkach poniżej. Ostatecznie został utworzony model statyczny pracy kotła: zawartość tlenku węgla odniesiona do zawartości tlenu w spalinach w funkcji strumienia paliwa i strumienia powietrza:



## 2.2 Regulator paleniska

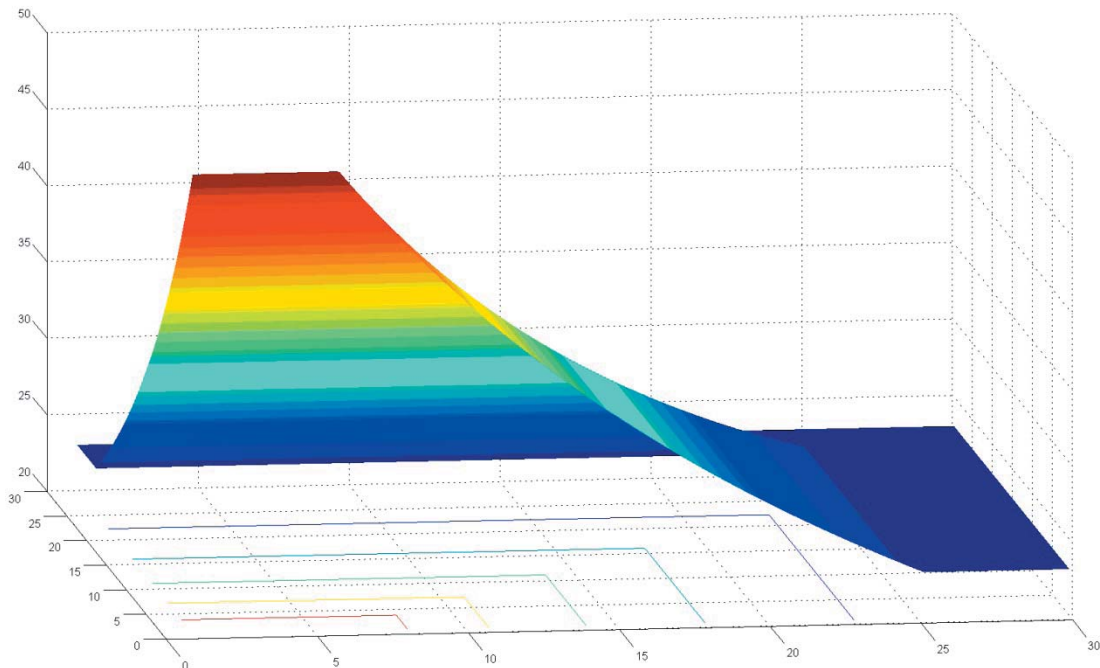
Opracowany algorytm regulacji został zaimplementowany w regulatorze ecoMAX 500 produkcji firmy Plum:



Działanie algorytmu jest następujące: na podstawie różnicy temperatur zasilania i powrotu oraz różnicy pomiędzy temperaturą zasilania zadaną i zmierzoną, ustalany jest strumień paliwa w postaci: stały czas pracy retorty 15 s i odpowiednio wyliczony czas przerwy.



Wykres czasu przerwy pokazano na rysunku poniżej. Dla tak ustalonego strumienia paliwa wyliczany jest właściwy strumień powietrza w postaci „procent mocy wentylatora” na podstawie modelu statycznego kotła. Został utworzony model Mamdaniego z trójkątnymi funkcjami przynależności i wyjściem liczonym metodą singletonów.



Pomiary stężenia tlenku węgla w spalinach kotła regulowanego opisanym algorytmem wykazały, że osiągnięto założone cele. Prowadzone są dalsze prace nad stworzeniem zaawansowanych algorytmów opartych o pomiary temperatur w wyznaczonych miejscach kotła, które będą działały nie tylko w oparciu o statyczny model kotła.

### 3. LITERATURA

- [AW95] Karl Johan Astrom, Bjorn Wittenmark *Adaptive Control*. 1995
- [ChKZ80] Witold Chmielnicki, Krzysztof Kasperkiewicz, Bernard Zawada *Laboratorium Automatykacji Urządzeń Sanitarnych*, Wydawnictwa PW 1980
- [DDJO07] Michał Domański, Ladislav Dzurenda, Marek Jabłoński, Jan Osipiuk *Drewno jako materiał energetyczny*, Wydawnictwo SGGW Warszawa 2007
- [Jar96] Józef Jarociński *Techniki czystego spalania*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne Warszawa 1996
- [Jęd77] Jacek Jędrzejowski *Podstawowe procesy przemysłowe. Przemysł energetyczny*. Wydawnictwa PW 1977
- [Ko164] Leon Kołodziejczyk *Urządzenia kotłowe ciepłownicze i technologiczne* Arkady 1964
- [LL06] Lennart Ljung *System Identification: Theory for the User*. Prentice Hall 2006
- [MizR94] Krystyna Mizielińska, Marian Rubik *Źródła ciepła. Ciepłownictwo. Poradnik*.
- [Ross07] Timothy J. Ross *Fuzzy Logic with engineering applications*. Wiley 2007
- [Tat02] Piotr Tatjewski *Sterowanie zaawansowane obiektów przemysłowych. Struktury i algorytmy*. EXIT 2002