

Żerdziny 21.04.2015r.

## **Odsiarczanie i odazotowanie spalin w kotłach ze złożem fluidalnym**

Spełnienie norm emisji zanieczyszczeń w zakresie dwutlenków siarki ( $200 \text{ mg/Nm}^3$ ) oraz azotu ( $200 \text{ mg/Nm}^3$ ) w procesie spalania węgla w kotłach rusztowych będzie bardzo trudne i kosztowne. O problemach eksploatacyjnych instalacji odsiarczania spalin przekonało się wiele przedsiębiorstw, które wybudowały instalacje i próbują ograniczyć emisję szkodliwych związków do atmosfery. Spalanie paliw stałych w kotłach ze złożem fluidalnym znacznie ograniczy emisję dwutlenku siarki i azotu do atmosfery, a w niektórych przypadkach wyeliminuje konieczność kosztownych w budowie i eksploatacji instalacji oczyszczania spalin. Modernizując kocioł rusztowy na fluidalny mamy możliwość nie tylko spełnienia rygorystycznych norm emisji zanieczyszczeń, ale również poprawy sprawności kotłów. W kotłach fluidalnych możemy również zmniejszyć części palne w żużlu z kotłów rusztowych, co rozwiąże problem zagospodarowania odpadów. Aktualnie prowadzony jest przetarg na budowę nowego kotła fluidalnego o mocy 30 MW w PEC Suwałki Sp. z o.o. Oferowany kocioł WFr-30 z paleniskiem fluidalnym spalając węgiel kamienny ma spełnić rygorystyczne normy emisji zanieczyszczeń bez budowy kosztownych instalacji. Odsiarczanie spalin ma następować w palenisku fluidalnym związkami wapnia i magnezu zawartymi w paliwie oraz żużlu z pozostałych kotłów rusztowych.

### **1. Paleniska fluidalne.**

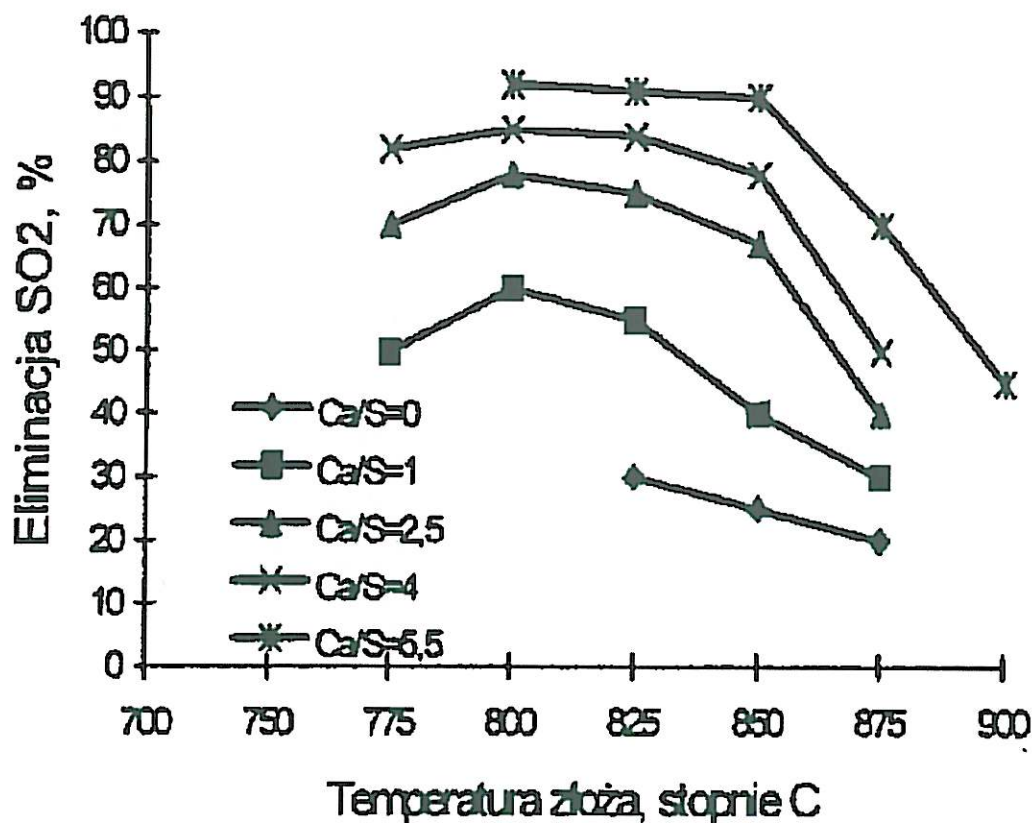
Paleniska fluidalne dzielą się na stacjonarne i cyrkulacyjne. Jednym z podstawowych kryteriów oceny rodzaju paleniska jest prędkość powietrza fluidyzującego. Dla złoża stacjonarnego prędkość wynosi od 2÷4 m/s, a dla złoża cyrkulacyjnego 5÷9 m/s. Kotły ze złożem cyrkulacyjnym w Polsce budowane są od mocy 100 MW. W Rosji i na Syberii budowane są kotły ze złożem stacjonarnym o mocy do 100 MW. Oferowany kocioł WFr-30 dla PEC Suwałki nie jest klasycznym kotłem fluidalnym ze złożem stacjonarnym. Oferowany kocioł posiada cechy kotła rusztowego (na dole zabudowany jest ruszt warstwowy do dopalania grubszych frakcji), kotła fluidalnego ze złożem stacjonarnym (w pierwszej strefie następuje fluidyzacja), kotła wirowego (powietrze wtórne powoduje zawirowanie spalin i zwiększenie czasu przebywania spalin w strefie wysokich temperatur) oraz kotła fluidalnego z cyrkulacyjnym złożem (następuje nawrót lotnego popiołu spod drugiego ciągu do komory spalania).

### **2. Związki alkaliczne.**

Redukcja tlenków siarki w palenisku fluidalnym następuje poprzez reakcję tlenków siarki z związkami alkalicznymi zawartymi w paliwie lub ewentualnie dodawanymi do złoża. Na skuteczność odsiarczania największe znaczenia mają związki wapnia (Ca), magnezu (Mg), sodu (Na) i potasu (K). W oferowanym kotle dla PEC Suwałki Sp. z o.o. dodatkowo z paliwem wprowadzany będzie żużel z kotłów rusztowych, który zawiera bardzo duży udział związków alkalicznych.

### 3. Skuteczność odsiarczania w zależności od temperatury złoża.

Największy wpływ na skuteczność odsiarczania spalin ma temperatura złoża fluidalnego, która powinna wynosić od 800÷850 °C.

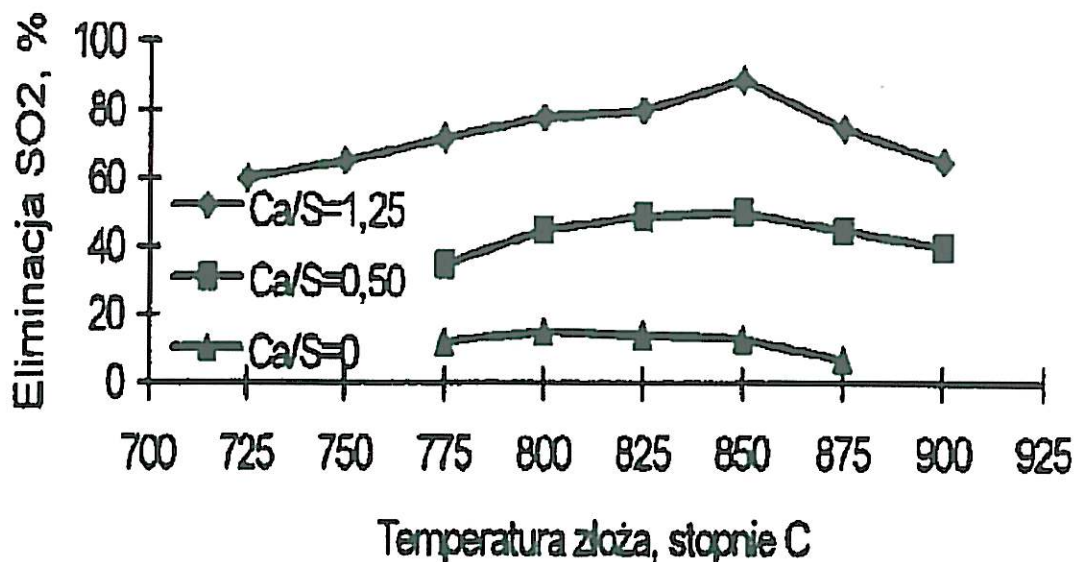


Wykres 1. Eliminacja SO<sub>2</sub> w funkcji temperatury dla stacjonarnego złoża fluidalnego [1].

W stacjonarnych złożach fluidalnych następuje intensywne zjawisko kalcynacji. Węglany wapnia i magnezu w wyniku optymalnej temperatury rozkładają się na tlenki wapnia i magnezu oraz dwutlenek węgla. Proces kalcynacji występuje również w paleniskach rusztowych, jednakże wysokie temperatury spalania przekraczające 1 400 °C są przyczyną małego przereagowania związków wapnia i magnezu z siarką. Spalając węgiel kamienny w kotłach rusztowych, w niektórych przedsiębiorstwach obserwowane zjawisko samoosiarczania spalin dochodzące do 30 %. Potwierdza to również możliwość odsiarczania spalin w kotłach fluidalnych bez dodawania sorbentów.





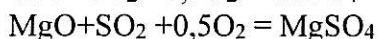
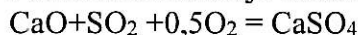


Wykres 2. Eliminacja SO<sub>2</sub> w funkcji temperatury dla stacjonarnego złoża fluidalnego [1].

#### 4. Proces odsiarczania oraz kalcynacji.

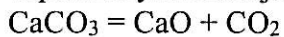
Proces odsiarczania spalin następuje poprzez wiązanie tlenków siarki z tlenkami wapnia, magnezu oraz pozostałymi związkami alkalicznymi, w tym sodu i potasu.

Podstawowe reakcje chemiczne:



Związki wapnia i magnezu występują w paliwie w formie węglanów (CaCO<sub>3</sub> oraz MgCO<sub>3</sub>).

Aby powstały tlenki wapnia i magnezu musi zajść zjawisko kalcynacji zgodnie z poniższymi reakcjami:



Definicja kalcynacji – odmiana prażenia polegająca na ogrzewaniu związku chemicznego (w naszym przypadku węglanów) poniżej jego temperatury topnienia w celu spowodowania częściowego rozkładu chemicznego tego związku poprzez usunięcie wody (lub innych substancji) z jego sieci krystalicznej, lub przeprowadzenie tego związku do związku prostszego z wydzielaniem lotnych substancji rozkładu (w naszym przypadku dwutlenku węgla). Kalcynacja węglanów wapnia i magnezu najintensywniej przebiega w złożu fluidalnym w temperaturze 800÷850 °C. Intensywność kalcynacji uzależniona jest również od czasu przebywania węglanów wapnia i magnezu w optymalnej strefie temperaturowej, co jest równoznaczne z prędkością powietrza fluidyzacyjnego i rodzajem paleniska.



## 5. Stosunek Ca/S.

Parametrem decydującym o skuteczności odsiarczania spalin jest proces kalcynacji oraz nadmiar związków alkalicznych w paliwie. Związki wapnia i magnezu występują praktycznie w każdym węglu kamiennym. W przypadku niewystarczającej ich ilości do odsiarczenia spalin dodatkowo dodaje się do paliwa sorbent (dolomit, kamień wapienny) lub istnieje możliwość dodania żużla ze spalania węgla w kotłach rusztowych. Profesor Zbigniew Bis uważa, że należy uwzględnić w obliczeniach skuteczności odsiarczania ilość związków alkalicznych zawartych w paliwie. Poniżej wyciąg z książki "Kotły fluidalne – Teoria i praktyka", Częstochowa 2010r. autor Zbigniew Bis, str. 259. [2].

### **Zapotrzebowanie sorbentu i całkowita ilość stałych produktów spalania (popiołu)**

Jeśli węgiel zawiera niewielkie ilości tlenu wapnia, zapotrzebowanie sorbentu dla zatrzymania siarki w kg sorbentu/kg pal można obliczyć z zależności:

$$L_s = \frac{100 S}{32 X_{CaCO_3}} \left[ \frac{Ca}{S} \right]_{mol} \quad (251)$$

gdzie:

$\left[ \frac{Ca}{S} \right]_{mol}$  - stosunek molowy wapnia do siarki,

$X_{CaCO_3}$  - zawartość  $CaCO_3$  w sorbencie.

Jeśli w paliwie znajduje się CaO w ilości  $X_{CaO}$  w kg CaO/kg pal, to ilość sorbentu niezbędna dla związania wymaganej ilości siarki będzie zredukowana. Można tego dokonać poprzez zastąpienie ilorazu  $\left[ \frac{Ca}{S} \right]_{mol}$  jego zredukowaną wartością:

$$\left[ \frac{Ca}{S} \right]_{mol}^{reduk} = \left[ \frac{Ca}{S} \right]_{mol} - \frac{32 X_{CaO}}{56 S} \quad (252)$$

259

Wyciąg nr 1. Książka Profesora Zbigniewa Bisa „Kotły fluidalne –Teoria i praktyka” [2].

W wielu polskich publikacjach pomija się związki magnezu w procesie odsiarczania. W przypadku dokładnego wyliczenia powszechnie stosowanego stosunku molowego Ca/S należy go zmodyfikować do postaci:

$Ca/S = [Ca/S] + [Mg/S] + [pozostałe związki alkaliczne, w tym sodu i potasu]$ .

Wpływ związków magnezu na skuteczność odsiarczania jest udowodniona w wielu publikacjach rosyjskich [3].

Na tym etapie nie zakładamy uwzględnienia w obliczeniach związków sodu i potasu.





**6. Obliczenie stosunku Ca/S dla węgla spalanego w PEC Suwałki Sp. z o.o.**

Poniżej przedstawiamy analizę popiołu zawartego w spalonym węglu kamiennym [4] oraz z spalania mieszanki węgla kamiennego z żużlem z kotłów rusztowych.

Oznaczenie	Zawartość [ % wag. ( % m/m )]
SiO <sub>2</sub> *	57,97
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	21,11
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	5,43
CaO *	5,23
MgO *	2,45
Na <sub>2</sub> O *	0,63
K <sub>2</sub> O *	2,14
SO <sub>3</sub> *	2,88
TiO <sub>2</sub> *	0,93
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> *	0,49
<b>suma</b>	<b>99,26</b>

Z analizy popiołu ze spalania miału węglowego wynika:

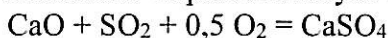
- Zawartość popiołu w spalonym miałe węglowym wynosi 16,97 %.
- Zawartość siarki w paliwie zakładamy na poziomie 0,6 %.
- Zawartość związków alkalicznych w popiele odpowiednio wynosi:
 

CaO	- 5,23 %
MgO	- 2,45 %
Na <sub>2</sub> O	- 0,63 %
K <sub>2</sub> O	- 2,14 %

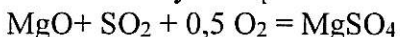
Wyciąg nr 2. Sprawozdania z badań paliwa nr próbki 897.1/14 [4].

Obliczenie stosunku (Ca + Mg)/S

Przy spalaniu węgla w złożu fluidalnym tworzący się dwutlenek siarki reaguje z tlenkiem wapnia zawartym w popiele zawartym w paliwie:



To samo odbywa się z tlenkiem magnezu:



Innymi słowy do wiązania 1 mola siarki jest potrzebny 1 mol CaO lub MgO

Masy molowe: MS = 32 g/mol  
 M<sub>CaO</sub> = 56 g/mol  
 M<sub>MgO</sub> = 40 g/mol

W czasie spalania 1 kg miału węglowego powstaje:

$$m_{\text{CaO}} = 1000 [\text{g/kg}] \cdot 0,1697 [\%/100] \cdot 0,0523 [\%/100] = 8,87 \text{ g/kg} \text{ lub } 8,87/56 = 0,158 \text{ moli}$$

$$m_{\text{MgO}} = 1000 \cdot 0,1697 \cdot 0,0245 = 4,16 \text{ gram/kg} \text{ lub } 4,16/40 = 0,104 \text{ moli}$$

$$m_{\text{S}} = 1000 \cdot 0,006 = 6 \text{ g/kg} \text{ lub } 6/32 = 0,1875 \text{ moli}$$

$$\text{Stosunek molowy (Ca + Mg)/S} = (0,158 + 0,104) / 0,1875 = 1,4$$



**7. Obliczenie stosunku Ca/S dla węgla spalanego w PEC Suwałki Sp. z o.o. przy założeniu dopalania żużla z pozostałych kotłów rusztowych.**

Aby uzyskać wydajność nominalną kotła 30 MW spalając miał węglowy (7 302 kg/h) o wartości opałowej 17 MJ/kg, potrzebna jest mieszanka węgla o wartości opałowej 22.28 MJ/kg w ilości 5 107 kg/h oraz żużla o wartości opałowej 4.72 MJ/kg w ilości 2 196 kg/h.

Oznaczenie	Zawartość [ % wag. ( % m/m ) ]
SiO <sub>2</sub> *	57,80
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	23,64
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	7,48
CaO *	4,14
MgO *	1,68
Na <sub>2</sub> O *	0,69
K <sub>2</sub> O *	1,65
SO <sub>3</sub> *	0,17
TiO <sub>2</sub> *	1,03
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> *	0,93
<b>suma</b>	<b>99,21</b>

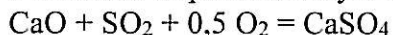
Z powyższej analizy popiołu ze spalania miału węglowego oraz żużla z kotłów rusztowych wynika:

- Zawartość popiołu w spalonym miałe węglowym wynosi 16,97 %, w dopalanym żużlu wynosi 75,85 %
- Udział popiołu z w mieszance miał węglowy + żużel z miału węglowego w proporcji 5107 / 7302 x 16,97 % = 11,87 %, z dopalanego żużla w proporcji 2196 / 7302 x 75,85 % = 22,81 %
- Zawartość siarki w paliwie zakładamy na poziomie 0,6 %.
- Zawartość związków alkalicznych w popiele z spalania miału węglowego wynosi CaO - 5,23 %, MgO - 2,45 %, Na<sub>2</sub>O - 0,63 %, K<sub>2</sub>O - 2,14 %
- Zawartość związków alkalicznych w popiele z dopalonego żużla węglowego wynosi CaO - 4,14 %, MgO - 1,68 %, Na<sub>2</sub>O - 0,69 %, K<sub>2</sub>O - 1,65 %

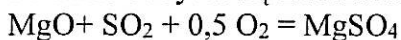
Wyciąg nr 3. Sprawozdanie z badań paliwa nr próbki 897.2/14” [5].

Obliczenie stosunku  $(Ca_m + Ca_z + Mg_m + Mg_z)/S$

Przy spalaniu węgla w złożu fluidalnym tworzący się dwutlenek siarki reaguje z tlenkiem wapnia zawartym w popiele z miału i żużla zawartym w paliwie:



To samo odbywa się z tlenkiem magnezu:



Innymi słowy do wiązania 1 mola siarki jest potrzebny 1 mol CaO lub MgO

Masy molowe: MS = 32 g/mol  
M<sub>CaO</sub> = 56 g/mol  
M<sub>MgO</sub> = 40 g/mol





Przy spalaniu 1 kg węgla powstaje:

$$m_{CaO_m} = 1000 [g/kg] \cdot 0,1187 [\%/100] \cdot 0,0523 [\%/100] = 6,21 g/kg \text{ lub } 6,21/56 = 0,111 \text{ mola}$$

$$m_{CaO_z} = 1000 [g/kg] \cdot 0,2281 [\%/100] \cdot 0,0414 [\%/100] = 9,44 g/kg \text{ lub } 9,44/56 = 0,168 \text{ mola}$$

$$m_{MgO_m} = 1000 \cdot 0,1187 \cdot 0,0245 = 2,91 g/kg \text{ lub } 2,91/40 = 0,073 \text{ mola}$$

$$m_{MgO_z} = 1000 \cdot 0,2281 \cdot 0,0168 = 3,83 g/kg \text{ lub } 3,83/40 = 0,096 \text{ mola}$$

$$m_S = 1000 \cdot 0,006 = 6 g/kg \text{ lub } 6/32 = 0,1875 \text{ moli}$$

$$\text{Stosunek molowy } (Ca_m + Ca_z + Mg_m + Mg_z)/S = 2,39$$

$$(0,111+0,168+0,073+0,096)/0,1875 = 2,39$$

### 8. Obliczenie emisji siarki zgodnie przyjętymi zasadami w Polsce dla mialu węglowego spalanego w PEC Suwałki Sp. z o.o.

Emisję tlenków siarki obliczono według wytycznych Wojewódzkiego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej [6].

Teoretyczną ilość spalin obliczono według wzorów:

$$V_z = 0,212 \cdot W_d + 1,65 + (\lambda - 1) \cdot (0,241 \cdot W_d + 0,5) + \lambda \cdot (0,241 \cdot W_d + 0,5) \cdot 1,602 \cdot y_w$$

gdzie:

$V_z$  – ilość spalin w warunkach normalnych [ $m^3/kg$  paliwa],

$W_d$  – wartość opałowa [MJ/kg],

$\lambda$  – współczynnik nadmiaru powietrza,

$y_w$  – zawartość wilgoci w powietrzu [ $kg/kg$  powietrza suchego]

Podstawowe dane kotła fluidalnego WFr-30 przyjęte do obliczeń:

W kotle fluidalnym spalana będzie mieszanka węgla kamiennego (mialu) oraz żużla o poniższych parametrach:

#### Dane mialu węglowego:

$W_d$  – wartość opałowa 21,0 – 23,0 MJ/kg

w – zawartość wilgoci  $\leq 18 \%$

p- zawartość popiołu  $\leq 18 \%$

s – zawartość siarki  $\leq 0,6 \%$

#### Dane żużla:

w – zawartość wilgoci  $\leq 30,0 - 42,0 \%$

p- zawartość popiołu  $\leq 40,0 - 45,0 \%$

#### Dane spalane paliwa (mieszanka mialu + żużel)

$W_d$  – wartość opałowa  $\leq 17,00$  MJ/kg

w – zawartość wilgoci  $\leq 19 \%$

p- zawartość popiołu  $\leq 20 \%$

Ilość spalane paliwa  $\leq 7302$  kg/h

Proporcja: mial – 5 197 kg/h i żużel – 2 195 kg/h dla wydajności kotła 30 MW

Teoretyczna ilość spalin w warunkach normalnych ze spalania mialu węglowego o wartości opałowej 22,28 MJ/kg, wydajności kotła 30 MW, sprawności 87 %, nadmiarowi powietrza 1,6 wynosi:

$$V_z = 0,212 \cdot 22,28 + 1,65 + (1,6 - 1) \cdot (0,241 \cdot 22,28 + 0,5) + 1,6 \cdot (0,241 \cdot 22,28 + 0,5) \cdot 1,602 \cdot 0,001 = 10,02 m^3/kg$$

Ilość spalane mialu węglowego wynosi:

$$m_m = 30 \text{ MW} \cdot 3600 / (22,28 \text{ MJ/kg} \cdot 0,87) = 5571 \text{ kg/h}$$

**Całkowity strumień spalin:**

$$V_n = V_z * m_m = 10,02 * 5\,571 = 55\,821 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

Emisja dwutlenku siarki (wskaźnik  $E=17$  i zawartość siarki **0,6 %**) wynosi:

$$E_{SO_2} = m_m * E * S = 5,571 \text{ [Mg/h]} * 17 * 0,6 \text{ [%]} = 56,82 \text{ kg/h}$$

**Emisja  $SO_2$  w  $mg/Nm^3$  wynosi:**

$$56,82 \text{ (kgSO}_2\text{/h} * 10^6 \text{ mg/kg} / 55\,821 = \mathbf{1\,017 \text{ mgSO}_2\text{/Nm}^3}$$

Emisja dwutlenku siarki (wskaźnik  $E=17$  i zawartość siarki **0,3 %**) wynosi:

$$E_{SO_2} = m_m * E * S = 5,571 \text{ [Mg/h]} * 17 * 0,3 \text{ [%]} = 28,41 \text{ kg/h}$$

**Emisja  $SO_2$  w  $mg/Nm^3$  wynosi:**

$$28,41 \text{ (kgSO}_2\text{/h} * 10^6 \text{ mg/kg} / 55\,821 = \mathbf{508 \text{ mgSO}_2\text{/Nm}^3}$$

Teoretyczna ilość spalin w warunkach normalnych ze spalania mieszanki mialu węglowego i żużla o wartości opałowej 17,0 MJ/kg i żużla, wydajności kotła 30 MW, sprawności 87%, nadmiarowi powietrza 1,6 wynosi:

$$V_z = 0,212 * 17 + 1,65 + (1,6 - 1) * (0,241 * 17 + 0,5) + 1,6 * (0,241 * 17 + 0,5) * 1,602 * 0,001 = 8,23 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Ilość spalanej mieszanki mialu węglowego z żużlem wynosi:

$$m_{m+z} = 30 \text{ MW} * 3600 / (17 \text{ MJ/kg} * 0,87) = 7\,302 \text{ kg/h}$$

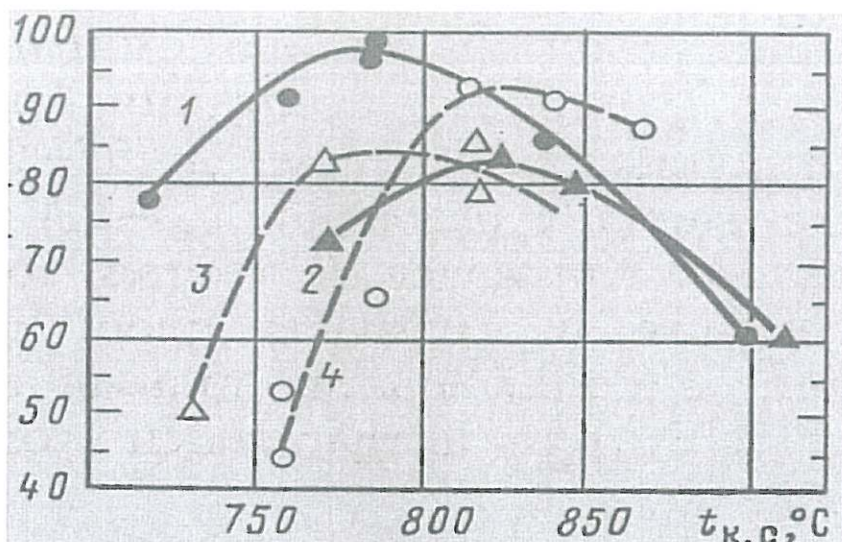
Zakładamy, że w żużlu nie ma siarki palnej i jej zawartość nie wpływa na emisję. Przy spalaniu mieszanki mialu węglowego z żużlem mamy te same emisje tlenków siarki, co spalając sam miał węglowy. Emisja tlenków siarki zależy jedynie od zawartości siarki w miale węglowym. Emisje tlenków siarki dla 0,6 % siarki w miale węglowym wynoszą 1 218  $mgSO_2/Nm^3$ .

**9. Skuteczność odsiarczania spalin w paleniskach fluidalnych.**

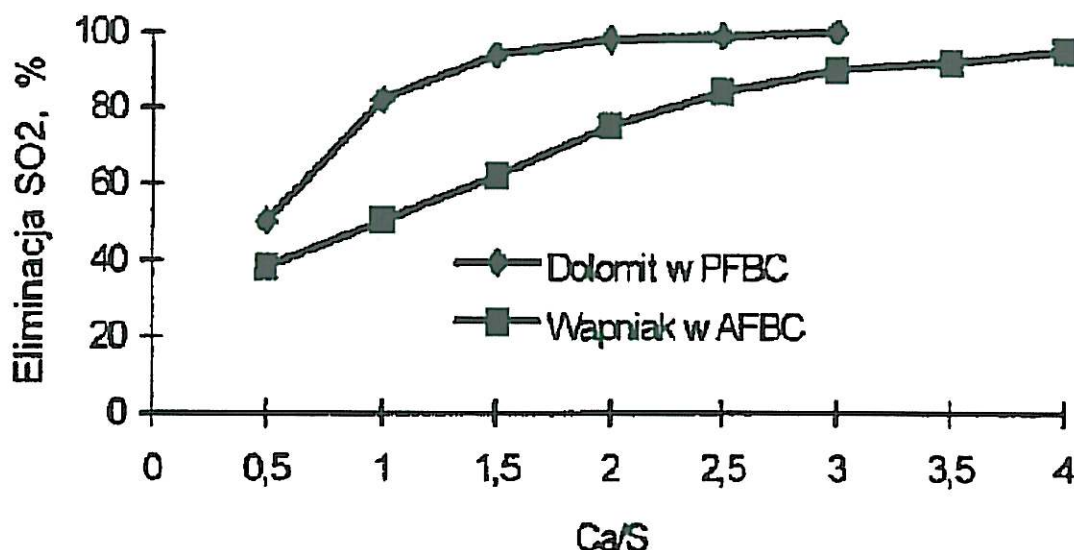
Paleniska fluidalne charakteryzują się dużą skutecznością odsiarczania (samoodsiarczania) bez budowania kosztownych i dodatkowych instalacji za kotłem. Jednakże stopień odsiarczenia spalin w technologii fluidalnej zależy od wielu czynników. W naszej opinii najważniejszym czynnikiem jest proces kalcynacji, a co za tym idzie odpowiednia temperatura złoża (patrz pkt. 3) oraz stosunek ilości związków alkalicznych do ilości siarki (Ca/S). Zakłada się, że dla kotłów fluidalnych stosunek Ca/S powinien kształtować się na poziomie 2,0. Dotrzymanie stosunku na poziomie Ca/S = 2,0 umożliwi odsiarczenie spalin w złożu fluidalnym ze skutecznością na poziomie 95 %. Z doświadczeń rosyjskich wynika, że w paleniskach fluidalnych może dochodzić do redukcji tlenków siarki bez dodawania sorbentów na poziomie od 40 do 70 %. W przypadku dodawania sorbentów skuteczność odsiarczania wzrasta do 95%. Również doświadczenia polskie potwierdzają takie możliwości.







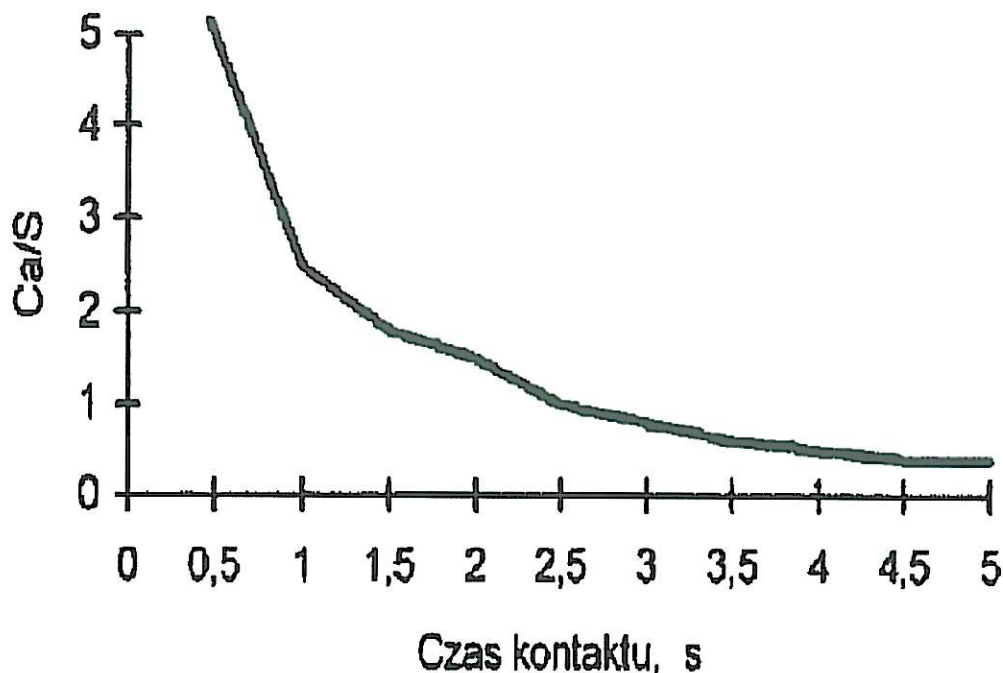
Wykres 3. Wpływ temperatury złoża na stopień związywania siarki w warstwie fluidalnym, 1-3 – węgiel pittsburski; 4 – węgiel illinojski ; stosunek molowy Ca/S = 4 (1), 2,8 (2), 2,2 (3), 2,5 (4) [3].



Wykres 4. Wpływ stosunku Ca/S na stopień wiązania siarki w warstwie fluidalnej [7].

Bardzo istotnym czynnikiem w skuteczności odsiarczania spalin jest czas przebywania związków alkalicznych w strefie optymalnych temperatur, w których zachodzi kalcynacja. W konstrukcji rosyjskiej czas ten jest dłuższy od klasycznych kotłów z fluidalnym złożem cyrkulacyjnym.





Wykres 5. Zapotrzebowanie na związki alkaliczne (Ca/S) w zależności od czasu kontaktu z siarką w optymalnych warunkach temperaturowych [7].

#### 10. Skuteczność odsiarczania spalin przy spalaniu mialu węglowego lub mieszanki mialowo-żuźlowej w PEC Suwałki Sp. z o.o.

W PEC Suwałki Sp. z o.o. planowane jest spalanie mialu węglowego lub mieszanki mialu węglowego z żuźlem z pozostałych kotłów rusztowych. Zawartość siarki w miale węglowym zakłada się na poziomie 0,6 %. Zgodnie z przeprowadzonymi analizami stosunek związków wapnia i magnezu do siarki w miale węglowym bez dodawania sorbentów wynosi  $Ca/S = 1,4$ . Spalając mieszankę mialu węglowego (4 936 kg/h) z żuźlem z pozostałych kotłów rusztowych (2 122 kg/h) stosunek wzrasta do poziomu  $Ca/S = 2,39$ .

Zgodnie z informacjami w pkt. 9 emisja tlenków siarki ze spalania mialu węglowego ( $s=0,6$ ) bez dodawania sorbentów przy skuteczności 70% będzie wynosiła  $305 \text{ mg/Nm}^3$  ( $1017 \text{ mg/Nm}^3 * 0,3$ ). Uwzględniając dodawanie żuźla z pozostałych kotłów jako sorbentu podwyższającego stosunek Ca/S emisja tlenków siarki ze spalania mieszanki mialu węglowego z żuźlem przy skuteczności 95% będzie wynosiła  **$51 \text{ mg/Nm}^3$**  ( $1017 \text{ mg/Nm}^3 * 0,05$ ). Zgodnie z obowiązującymi przepisami gwarantowany poziom emisji dwutlenku siarki wynosi  **$200 \text{ mg/Nm}^3$** .



## **11. Opis fluidalnego kotła wodnego z rusztowym dopalaniem WFr-30**

### **Podstawowe rozwiązania techniczne.**

Komora paleniskowa oraz drugi ciąg kotła WFr-30 jest zaprojektowana w układzie pionowym. Odpowiednia wysokość komory paleniskowej z wykorzystaniem powietrza wtórnego pozwala na wysokie dopalenie części palnych w spalinach. Komora paleniskowa oraz drugi ciąg zaprojektowany jest w technologii ścian szczelnych z lekką izolacją oraz opancerzeniem. Za kotłem zabudowany jest dodatkowy podgrzewacz wody z regulowanym przepływem wody. Przy projektowaniu został przyjęty pionowy, dwuciągowy przepływ spalin. Kocioł wraz z urządzeniami mieści się w założonych w SIWZ gabarytach kotłowni oraz będzie posiadać znak CE zgodnie z Dyrektywami UE. Wszystkie elementy kotła będą wykonane w Polsce.

### **Kocioł WFr-30.**

Kocioł fluidalny z rusztowym dopalaniem ma konstrukcję pionową, dwuciągową. Konstrukcja kotła fluidalnego charakteryzuje się wysoką sprawnością, przy stosunkowo niskich emisjach zanieczyszczeń. Maksymalna wysokość kotła od poziomu odzūżlania wynosi 11 700 mm. Szerokość kotła wraz z podestami obsługowymi wynosi 7 525 mm, a jego całkowita długość wraz ekonomizerem i podestami wynosi 12 900 mm. Ekran komory paleniskowej i drugiego ciągu wykonane są w technologii ścian szczelnych z rur o średnicy  $\varnothing 57 \times 4$ . Zastosowanie szczelnych ekranów pozwala wyeliminować zasysanie fałszywego powietrza, nie biorącego udziału w procesie spalania. Zastosowanie lekkiej izolacji z wełny mineralnej zapewnia łatwy dostęp do powierzchni ogrzewalnych. Zewnętrzne opancerzenie kotła wykonane z blachy trapezowej całkowicie eliminuje ciężkie, szamotowe obmurze. Zastosowanie technologii fluidalnej z dopalaniem wirowym lotnego koksiku i rusztowym oraz dodatkowej powierzchni ogrzewalnej w komorze paleniskowej w postaci ekranu rozdzielającego komorę paleniskową od komory dopalania, pozwala zmniejszyć długość kotła WFr-30, z jednoczesnym obniżeniem szybkości spalin w ciągu konwekcyjnym do 12-13 m/s. Do ograniczenia lub wyeliminowania zjawiska erozji rur zastosowano żeliwne nakładki antyerozyjne z wysoką zawartością chromu. Szczególnie dotyczy to strefy pierwszej spalania, gdzie następuje bardzo intensywna fluidyzacja złoża. Pęczki konwekcyjne kotła wykonane są z rur o średnicy  $31,8 \times 3,2$  mm oraz kolektorów o średnicy  $76 \times 4$  mm). Kocioł wyposażony jest w włazy i wzierniki, zapewniające dostęp do elementów kotła w czasie bieżącej obsługi lub naprawie. Kocioł posadowiony jest na własnej metalowej konstrukcji nośnej. Dla zapewnienia bezpiecznej pracy kocioł wyposażony jest w odpowiednią armaturę odcinającą, regulacyjną oraz zawory bezpieczeństwa wymagane aktualnymi przepisami. Dodatkowo kocioł wyposażony będzie w system AKPiA zapewniający automatyczną pracę w szerokim zakresie obciążenia. Rozpalenie kotła będzie następowało identycznie jak rozpalane są klasyczne kotły rusztowe. Do rozpalenia nie jest wymagany gaz ziemny lub olej opałowy. Do czyszczenia powierzchni konwekcyjnych kotła zostaną wykorzystane generatory fal uderzeniowych GFU-24/8. Dodatkowo, aby wyeliminować zawieszanie się węgla w bunkrach planuje się również wykorzystać dodatkowe generatory fal uderzeniowych. Na tym etapie nie planujemy wykonać instalacji do usunięcia węgla z bunkrów w czasie postojów kotła fluidalnego. W przypadkach awaryjnych opróżnianie bunkrów może nastąpić w identyczny sposób, jak w klasycznych kotłach za pomocą rusztu i odzūżlacza.





### **Komora paleniskowa**

Komora spalania kotła WFr-30 ma wymiary: szerokość 4 000 mm x długość 3 800 mm x wysokość 6 800 mm. Nad komorą spalania znajduje się komora dopalania z przejściem do drugiego ciągu. W dolnej części komory spalania zabudowany jest w osi ruszt taśmowy o szerokości użytecznej 1 500 mm i długości 5 500 mm. Paliwo do kotła podawane jest za pomocą dwóch podajników zgrzeblowych, umieszczonych symetrycznie na ścianie przedniej na wysokości 3 100 od poziomu pokładu rusztowego. Dla zapewnienia szczelności komory paleniskowej oraz zapobiegnięcia zapłonu węgla zastosowano dodatkowe powietrze osłonowe. Do podawania niedopalonego żużla z kotłów rusztowych lub materiału inertnego planowana jest zabudowa trzeciego podajnika na ścianie bocznej. Projekt kotła nie przewiduje zabudowy sklepienia zapłonowego oraz tylnego.

### **Palenisko.**

W dolnej części komory paleniskowej zabudowany jest ruszt taśmowy. Napęd będzie zabudowany w części tylnej rusztu. Pokład rusztowy będzie nachylony pod kątem  $10^{\circ}$ , w kierunku jego pracy (tylna część pokładu rusztowego jest podniesiona o  $10^{\circ}$  w stosunku do przedniej). Rusztowiny chłodzone są dużym strumieniem powietrza. Pokład rusztu podzielony jest wzdłuż długości na trzy strefy spalania. Pierwsza strefa jest przestrzenią intensywnego spalania paliwa. Paliwo z podajnika dostaje się do kotła bezpośrednio do strefy spalania. W związku z tym, że jest przewidywane spalanie paliwa z dużą zawartością drobnych frakcji, to podgrzewanie i emisja lotnych, drobniejszych cząstek paliwa odbywa się w pierwszej strefie spalania nad podkładem. Znacznie grubsze cząstki paliwa spadają na pokład rusztu i stopniowo podgrzewając się zaczynają palić się w warstwie na ruszcie. W warstwie pierwszej spalania następuje duża fluidyzacja paliwa z intensywnym spalaniem drobniejszych frakcji paliwa.

Druga strefa rusztu służy do warstwowego spalania paliwa niedopalonego w strefie intensywnego spalania. Trzecia strefa służy do dopalania części palnych i schłodzenia żużla do temperatury 100 – 150 °C.

Każda strefa jest wyposażona w oddzielny wentylator podmuchowy z parametrami technicznymi, zapewniającymi technologię wysoko forsowanego (fluidalnego) spalania w strefie pierwszej oraz warstwowego spalania paliwa stałego w strefie drugiej.

Nad paleniskom zabudowane są dysze powietrza wtórnego, które zapewniają zawirowanie spalin w palenisku. To rozwiązanie pozwala utrzymać niedopalone cząstki paliwa w przestrzeni komory paleniskowej do całkowitego wypalania się i wyeliminowania lotnego koksiku. Zawartość pyłu oraz lotnego koksiku w spalinach maksymalnie obniża się, tym samym konwekcyjne powierzchnie kotła chronione są przed erozją i tworzeniem się twardych osadów. Instalacja powietrza wtórnego zasilana jest oddzielnym wentylatorem.

### **System czyszczenia.**

Dla zapewnienia optymalnej pracy kotła z wysokimi sprawnościami planuje się zabudowę systemu czyszczenia, opartego o generatory fal uderzeniowych GFU-24/8. Ilość generatorów oraz ich rozmieszczenie zostanie określone na etapie projektowania kotła. Generatory fal uderzeniowych zasilane będą sprężonym powietrzem o ciśnieniu do 8 bar.



### **Dodatkowe elementy kotła WFr-30.**

Kocioł WFr-30 będzie wyposażony w odpowiednie schody i podesty, umożliwiające dostęp do armatury i grubego osprzętu oraz innych miejsc wymagających stałej lub okresowej obsługi. Odpowiednie włazy i wzierniki umożliwiają obserwację wnętrza kotła w czasie jego ruchu, a także wejście do środka, po odstawieniu kotła. Wszystkie zewnętrzne elementy kotła będą odpowiednio izolowane, wełną mineralną pokrytą opancerzeniem zewnętrznym, co zabezpiecza obsługę przed poparzeniem.

### **Podstawowe parametry kotła WFr-30.**

W kotle fluidalnym WFr-30 spalany będzie miał węglowy sortyment MIIA klasy 21-23/18/06 z dodatkiem mieszanki popiołowo-żuźlowej z istniejących kotłów rusztowych. Przy odpowiednim wyregulowaniu kotła będzie możliwe spalanie biomasy. Gwarantowane parametry kotła są przewidziane w czasie spalania miału węglowego.

Dane miału węglowego:

Węgiel kamienny energetyczny – sortyment M II A, typ 32.1.

$W_d$  – wartość opałowa 21,0 – 23,0 MJ/kg

w – zawartość wilgoci  $\leq 18 \%$

p- zawartość popiołu  $\leq 18 \%$

s – zawartość siarki  $\leq 0,6 \%$

Dane mieszanki popiołowo-żuźlowej:

c – zawartość węgla  $\leq (15 - 17) \%$

w – zawartość wilgoci  $\leq (30,0 - 42,0) \%$

p- zawartość popiołu  $\leq (40,0 - 45,0) \%$

### **Parametry kotła WFr-30.**

Wydajność znamionowa .....	30,0	MW
Wydajność maksymalna trwała .....	35,0	MW
Wydajność minimalna .....	15,0	MW
Zakres pracy w automatyce .....	15 ÷ 35	MW
Ciśnienie obliczeniowe.....	2,5	MPa
Ciśnienie obliczeniowe na wlocie .....	1,6	MPa
Ciśnienie absolutne na wylocie .....	1,0	MPa
Temperatura wody na wlocie .....	70,0	°C
Temperatura wody na wylocie .....	150,0	°C
Przepływ wody przez kocioł dla wydajności nom .....	320	Mg/h
Przepływ wody przez kocioł dla wydajności max.....	350	Mg/h
Opory przepływu wody przez kocioł (maks.) .....	0,25	MPa
Sprawność obliczeniowa brutto (30 MW).....	87,8	%
Sprawność obliczeniowa netto (30 MW) .....	86,0	%
Pojemność wodna kotła .....	13,5	m <sup>3</sup>
Minimalne dopuszczalne ciśnienie wody na wylocie z kotła dla temperatury wylotowej 150 °C .....	: 1,0	MPa

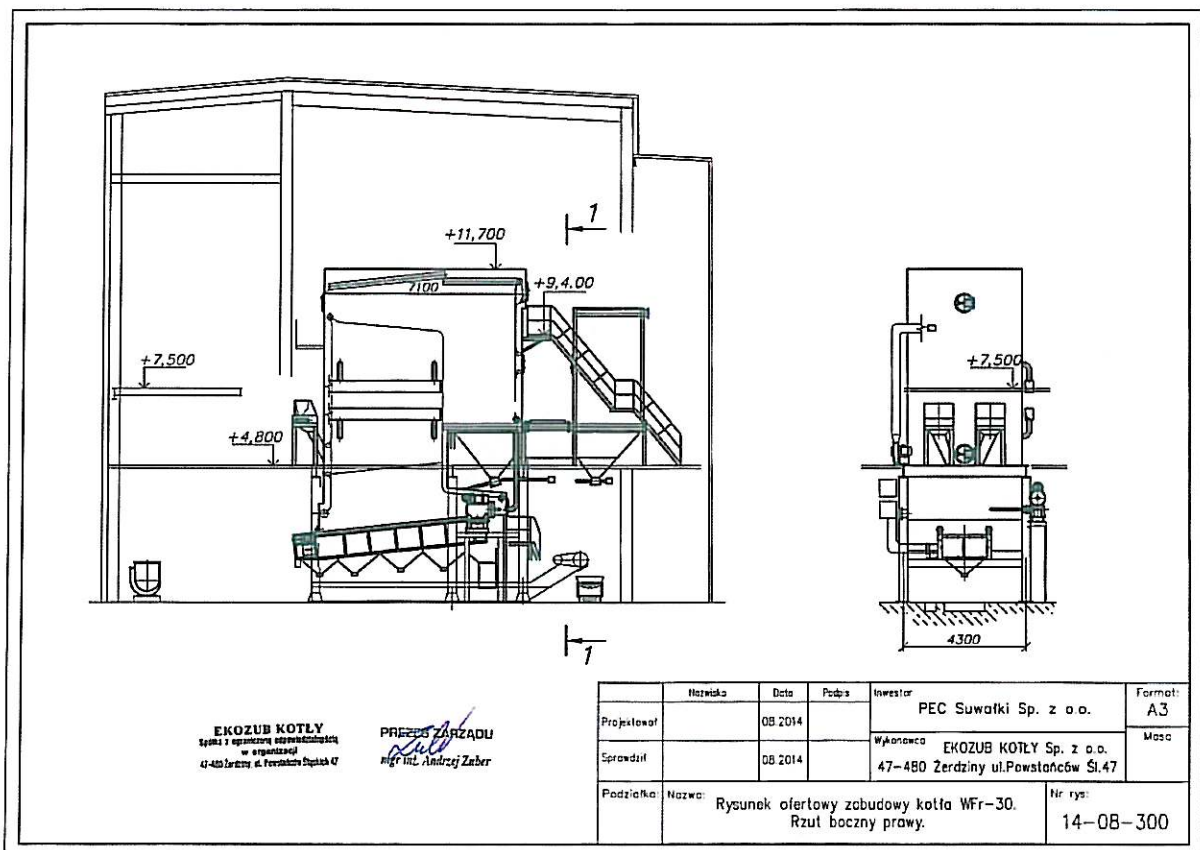


**Dane powietrza i spalin (dla wydajności znamionowej 30 MW)**

Ilość powietrza potrzebna do spalania.....	9,35	Nm <sup>3</sup> /s
Temperatura powietrza do spalania.....	20	°C
Ilość spalin na wylocie z kotła.....	16,62	Nm <sup>3</sup> /s
Temperatura spalin na wylocie z kotła.....	140	°C
Opory przepływu spalin przez kocioł.....	800	Pa
Opory przepływu powietrza.....	8 200	Pa
Podciśnienie w komorze paleniskowej.....	50	Pa
Podciśnienie na wylocie z kotła.....	850	Pa
Zawartość O <sub>2</sub> w spalinach.....	8,65	%

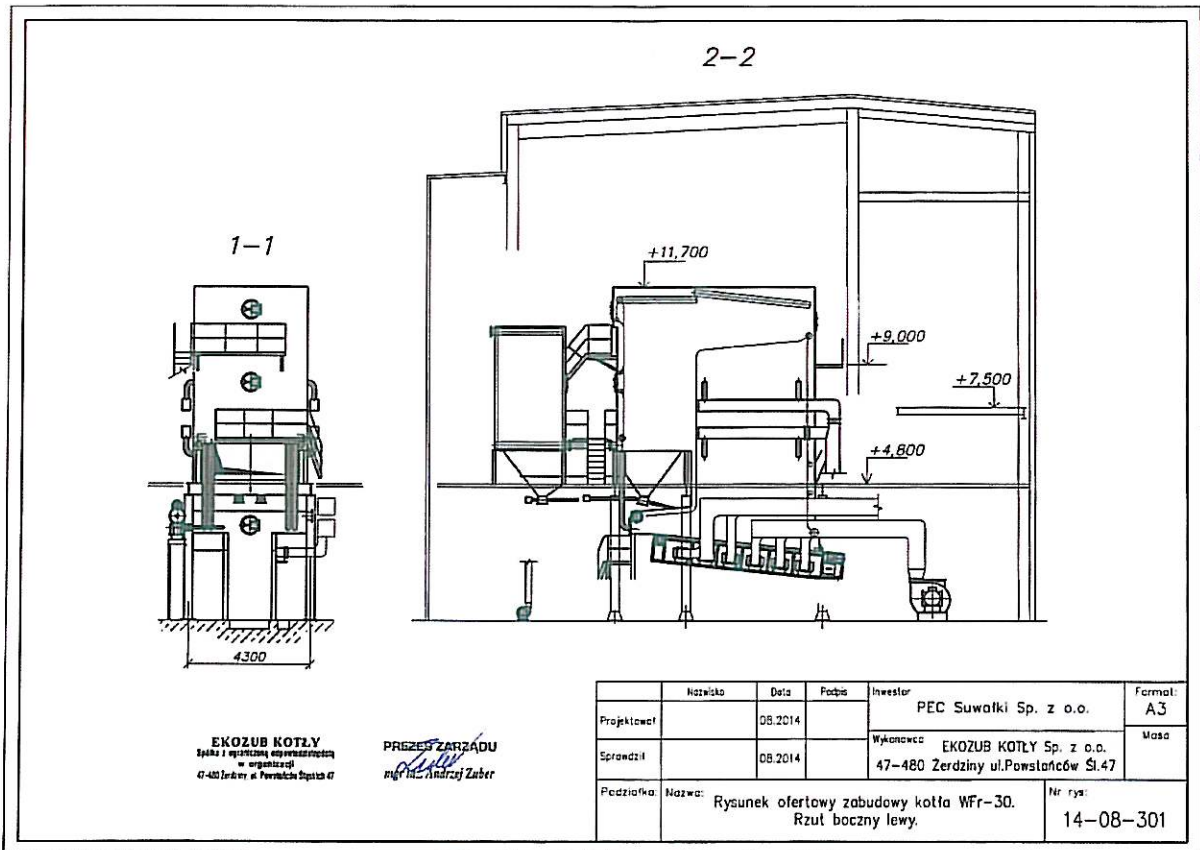
**Wielkość emisji zanieczyszczeń w spalinach za kotłem w warunkach umownych, przy zawartości tlenu 6%.**

Maksymalna zawartość pyłu za kotłem ( przed odpylaniem) .....	22	g/Nm <sup>3</sup>
Maksymalna zawartość SO <sub>2</sub> (dla S=0,6%).....	200	mg/Nm <sup>3</sup>
Zawartość NO <sub>x</sub> .....	200	mg/Nm <sup>3</sup>



Rys. 1 Zabudowa kotła WFr-30 – rzut boczny prawy.





Rys. 2 Zabudowa kotła WFr-30 – rzut boczny prawy.

### Podsumowanie.

Większość przedsiębiorstw w Polsce stoi przed problemem dotrzymania rygorystycznych norm emisji zanieczyszczeń. Aby spełnić normy emisji dwutlenków siarki ( $200 \text{ mg/Nm}^3$ ) oraz azotu ( $200 \text{ mg/Nm}^3$ ) w procesie spalania węgla kamiennego w popularnych w Polsce kotłach z paleniskami rusztowymi zaistnieje konieczność budowy kosztownych instalacji odsiarczania i odazotowania spalin. Alternatywą dla polskiej energetyki i przemysłu są kotły z paleniskami fluidalnymi, których proces spalania prowadzony jest z ograniczeniem emisji szkodliwych dwutlenków siarki i azotu. Dwutlenek siarki wiązany jest w palenisku związkami alkalicznymi w formie nierozpuszczalnego gipsu i odprowadzany wraz z żużlem. Z uwagi na niskie temperatury spalania nie tworzą się tlenki azotu, co pozwala utrzymać ich emisję poniżej  $200 \text{ mg/Nm}^3$ . Dodatkowo w kotłach z paleniskami fluidalnymi można spalać różne gatunki paliw stałych, w tym węgiel brunatny i biomasę z dużą efektywnością. Żużel z kotłów rusztowych z dużą zawartością części palnych może służyć jako dodatek do spalanej paliwa do kotłów fluidalnych. Dokładne wypalenie żużla w kotłach fluidalnych pozwala na jego wykorzystanie w budownictwie lub innych segmentach gospodarki. Z uwagi na niską zawartość części palnych w żużlu sprawność kotłów z paleniskami fluidalnymi jest wyższa od klasycznych kotłów rusztowych. Zalety kotłów z paleniskami fluidalnymi spowodują większe zainteresowanie ich budową oraz dalszym rozwojem w kotłach wodnych i parowych o mocy do 50 MW.



Literatura.

1. A. Lyngfelt, B. Lekner: Sulphur capture in fluidized bed combustors. Temperature dependence and lime conversion. Journal Inst. Energy, 1989, Vol.51.
2. Zbigniew Bis: Kotły fluidalne – Teoria i praktyka”, Częstochowa 2010.
3. A.P. Baskakov, W.W. Macnew, I.W. Raspopow: Kotły i paleniska ze złożem fluidalnym”, Moskwa 1996.
4. Główny Instytut Górnictwa: Sprawozdanie z badań nr próbki 897.1/S.C.-1/14 – Analiza składu popiołu z spalania mialu węglowego, październik 2014.
5. Główny Instytut Górnictwa: Sprawozdanie z badań nr próbki 897.1/S.C.-2/14 – Analiza składu popiołu z spalania mieszanki mialu węglowego i żużla z kotłów, październik 2014.
6. Wojewódzki Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej w Poznaniu: Zestawienie wzorów i wskaźników emisji substancji zanieczyszczających wprowadzanych do powietrza, Poznań 2011.
7. T. Trybuś: Fluidalne spalanie paliw, jako metoda ograniczenia emisji dwutlenku siarki i tlenków azotu – Ochrona Środowiska nr 2/1995.

**EKOZUB Sp. z o.o.**  
47-480 ŻERDZINY, ul. Powstańców Śląskich 47  
NIP 639 200 32 02 REGON 242798312  
32 419 85 09 • 692 495 329  
KRS 0000404144

**PREZES ZARZĄDU**  
  
mgr inż. Andrzej Zuber