

WPLYW PARAMETRÓW PRACY INSTALACJI NA SKUTECZNOŚĆ ODSIARCZANIA SPALIN WEDŁUG MOKREJ METODY WAPIENNEJ

¹Michał GŁOMBA, ²Jerzy MAZUREK

¹Zakład Naukowo-Dydaktyczny Ochrony Atmosfery
Instytutu Inżynierii Ochrony Środowiska Politechniki Wrocławskiej

Wybrzeże S. Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław,

²RAFAKO Spółka Akcyjna ul. Łąkowa 33, 47-400 Racibórz

michal.glomba@pwr.wroc.pl, jerzy.mazurek@rafako.com.pl

STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono wpływ parametrów pracy instalacji odsiarczania spalin na skuteczność ich odsiarczania według mokrej metody wapiennej. Pokazano dużą zgodność zachodzącą między wartościami skuteczności odsiarczania spalin zmierzonej i obliczonej dla obiektu rzeczywistego, w którym IOS służy do odsiarczania spalin powstających w procesie spalania węgla brunatnego. Zaprezentowano wyniki szacowania wpływu zmniejszenia stężenia SO₂ w spalinach na wylocie z absorbera zdecydowanie poniżej 200 mg/m³_{nss 6%O₂} (spalin suchych i zawartości 6% tlenu), do 20 mg/m³_{nss 6%O₂}, a więc do stężenia umożliwiającego zastosowanie technologii CCS (*Carbon Capture and Storage*) ograniczania emisji CO₂ do powietrza atmosferycznego, na stopień zwiększenia wartości takich parametrów, jak straty ciśnienia spalin w IOS, moc na wale wentylatora spalin, pobór mocy przez silniki pomp tłoczących zawieszinę absorpcyjną i in.

1. Wstęp

Spośród znanych i charakteryzujących się dużą skutecznością odsiarczania spalin kotłowych najbardziej rozpowszechniona jest mokra metoda wapienna. Reagentem (sorbentem) w tej metodzie jest zmielony wapień, a produktem odsiarczania jest sztuczny gips o walorach użytkowych. Aktualnie w polskich elektrowniach i elektrociepłowniach metodę tę wdrożono na blokach o łącznej mocy 15,6 GW_e (tab.1) [1].

Tabela 1. Metody odsiarczania spalin kotłowych wdrożone w polskim systemie energetycznym

Metoda odsiarczania spalin kotłowych	Moc elektrowni i elektrociepłowni objęta odsiarczaniem spalin, GW _e	Łączna moc systemu energetycznego w Polsce, GW _e	Udział mocy objętej odsiarczaniem w mocy systemu energetycznego Polski, %
Mokra wapienna	15,60	26,0	60,00
Pólsucha	2,40		12,50
Sucha w kotłach fluidalnych (CFB, BFB)	3,25		9,23
Mokra magnezowa	0,10		0,50
Radiacyjna	0,13		0,38
Razem	21,48	26,0	82,61

Duży udział w projektowaniu i wdrożeniu instalacji odsiarczania spalin (IOS) wg mokrej metody wapiennej ma Fabryka Kotłów RAFAKO S.A. Jej dziełem są IOS w elektrowniach Jaworzno, Bełchatów, Pątnów, Ostrołęka. Aktualnie RAFAKO S.A. realizuje IOS w elektrowniach Dolna Odra (bloki nr 5 i 6), Bełchatów (blok A1) oraz w elektrociepłowni Siekierki.

Pierwsze krajowe IOS projektowano na gwarantowane stężenie SO_2 w spalinach oczyszczonych wynoszące ponad $400 \text{ mg/m}^3_{\text{n.ss } 6\% \text{O}_2}$. Aktualnie stężenie SO_2 w spalinach emitowanych z dużych źródeł nie powinno przekraczać $400 \text{ mg/m}^3_{\text{n.ss } 6\% \text{O}_2}$, albowiem od 1 stycznia 2008 r. Polska zobowiązana jest do przestrzegania standardów emisji wynikających z Dyrektywy LCP oraz pułapów zapisanych w Traktacie o Przystąpieniu Rzeczypospolitej Polskiej do UE. Wdrożenie Dyrektywy LCP nastąpiło na mocy Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 20 grudnia 2005 r. w sprawie standardów emisji z instalacji [2].

Kolejnym wyzwaniem wynikającym z kierunków działań ekologicznych UE jest projekt nowelizacji Dyrektywy IPPC, w którym zakłada się wprowadzenie od 1 stycznia 2016 r. definicji źródła emisji jako „wspólny komin”. Ponadto zaostrza on standardy emisji oraz zmienia odpowiadający im zakres mocy.

Proponowane w projekcie Dyrektywy przedziały mocy i przypisane im wymagania emisyjne dla paliw stałych (węgiel kamienny i brunatny), przedstawiono w tab. 2. Wprowadzenie definicji „wspólny komin” spowoduje, że w grupie dużych źródeł spalania paliw pojawi się dodatkowo około 800 kotłów.

Tabela 2. Proponowane dla członków UE standardy emisji SO_2 od 1 stycznia 2016 r. w projekcie Dyrektywy IPPC

Nominalna moc cieplna kotła, MW_t	Standard emisyjny SO_2 dla spalania węgla kamiennego i brunatnego $\text{mg/m}^3_{\text{n.s } 6\% \text{O}_2}$
50-100	400
100-300	250
> 300	200

Zmiany proponowane w Dyrektywie IPPC najbardziej będą odczuwalne w sektorze ciepłowni i elektrociepłowni zawodowych, gdzie dla charakterystycznych przedziałów mocy do 50 MW_t i $50-225 \text{ MW}_t$ oraz stosowanych paliw (węgiel kamienny), standardy emisji SO_2 wynoszą obecnie $1500 \text{ mg/m}^3_{\text{n.ss } 6\% \text{O}_2}$.

Z uwagi na przewidywany zaostrzony standard emisyjny od stycznia 2016 r., istniejące IOS obecnie modernizuje się, a przewidziane IOS do wdrożenia projektuje się na stężenie wylotowe SO_2 w spalinach $200 \text{ mg/m}^3_{\text{n.ss } 6\% \text{O}_2}$.

Różne systemy ograniczenia emisji CO_2 , które obecnie są w fazie testów lub projektów, mogą podyktować jeszcze większe wymagania w zakresie stopnia usunięcia SO_2 ze spalin. W niektórych technologiach (np. CCS) spaliny, przed ich skierowaniem do instalacji wydzielania CO_2 , powinny zostać odsiarczone do poziomu stężenia $20-30 \text{ mg/m}^3_{\text{n.ss } 6\% \text{O}_2}$. Przyjęcie takich wymogów może bardzo istotnie wpłynąć na parametry projektowe i rozwiązania aparaturowe przyszłych instalacji.

Aby sprostać stawianym nowym warunkom ograniczenia emisji SO_2 i małym wartościom jego stężenia wylotowego w spalinach za IOS, Fabryka Kotłów RAFAKO S.A. we współpracy z Zakładem Naukowo-Dydaktycznym Instytutu Inżynierii Ochrony Środowiska Politechniki Wrocławskiej od wielu lat prowadzi badania nad optymalizowaniem

procesów jednostkowych składających się na technologię odsiarczania spalin kotłowych według mokrej metody wapiennej. Działanie takie pozwala optymalizować skuteczność pracy aparatów procesowych, ich gabaryty, zużycie substratów, mediów pomocniczych i energii oraz ilość i jakość powstających produktów oczyszczania gazów i odpadów poprocesowych.

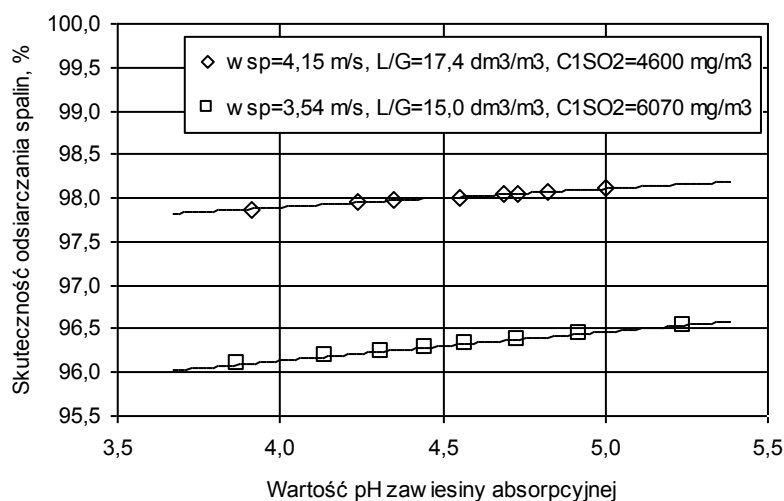
W niniejszej pracy przedstawiono wybrane wyniki prac nad optymalizowaniem procesu absorpcji SO_2 w pionowym skruberze natryskowym, wyposażonym w wielopoziomowe systemy rozpylania zawiesiny absorpcyjnej w postaci wodnej zawiesiny zmielonego wapienia.

2. Wpływ parametrów pracy IOS na skuteczność odsiarczania spalin

Podczas wieloletniej praktyki związanej z projektowaniem i eksploatacją IOS zebrano bogaty materiał, na który składają się opracowane w Zespole Pracowni Projektowych IOS RAFAKO S.A. projekty IOS i opracowania dokumentujące wyniki pomiarów gwarancyjnych oraz monitorowania parametrów pracy IOS w Elektrowniach Bełchatów, Pątnów, Ostrołęka i Jaworzno III.

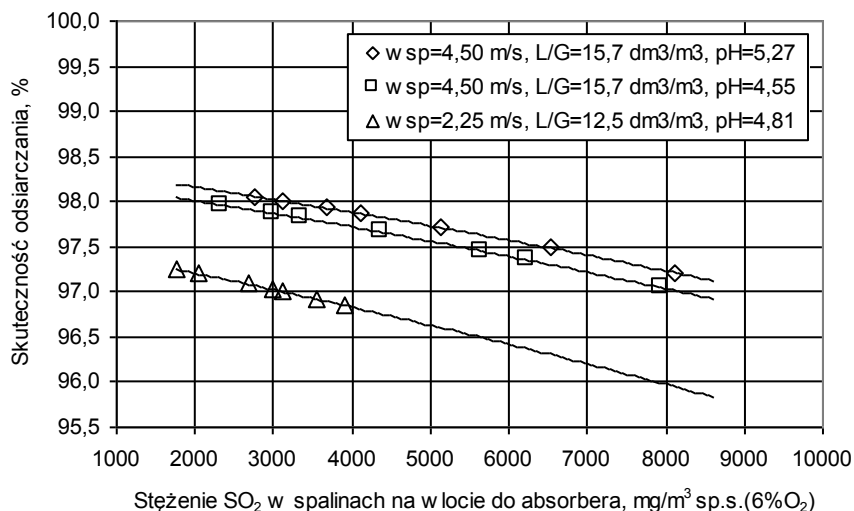
Powstały opracowania dotyczące optymalizowania procesu absorpcji SO_2 w pionowych skruberach natryskowych [1, 3, 4], które umożliwiły ustalić zależność skuteczności odsiarczania spalin od prędkości spalin w absorberze, stosunku L/G (liquid to gas ratio), wysokości strefy zraszania w absorberze, wartości pH zawiesiny absorpcyjnej, jej gęstości, zawartości w spalinach pary wodnej, stężenia SO_2 na wlocie do absorbera i in.

Zależność skuteczności odsiarczania spalin od wartości pH zawiesiny absorpcyjnej dla ustalonych prędkości spalin w absorberze, stężenia SO_2 na wlocie do absorbera, i stosunku L/G przedstawiono na rys. 1.



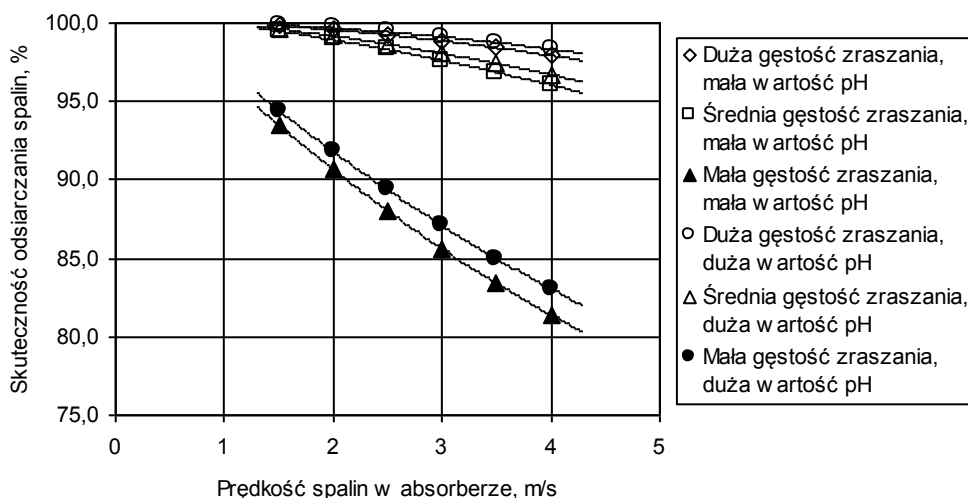
Rys. 1. Zależność skuteczności odsiarczania spalin od wartości pH zawiesiny absorpcyjnej Dla ustalonych prędkości spalin, stężenia SO_2 na wlocie do absorbera, i stosunku L/G

Zależność skuteczności odsiarczania od stężenia SO_2 w spalinach na wlocie do absorbera dla ustalonych prędkości spalin, stosunki L/G i wartości pH zawiesiny absorpcyjnej przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Zależność skuteczności odsiarczania od stężenia SO_2 w spalinach na wlocie do absorbera dla ustalonych prędkości spalin, stosunki L/G i wartości pH zawiesiny absorpcyjnej

Wpływ prędkości spalin w absorberze dla dużych i małych wartości pH zawiesiny absorpcyjnej oraz małych, średnich i dużych gęstości zraszania ($L_c = 50-150 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$) na skuteczność odsiarczania przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Zależność skuteczności odsiarczania od prędkości spalin w absorberze w warunkach dużych i małych wartości pH zawiesiny absorpcyjnej oraz małych, średnich i dużych gęstości zraszania

3. Weryfikacja równania modelowego opisującego skuteczność odsiarczania spalin w pionowym absorberze natrykowym

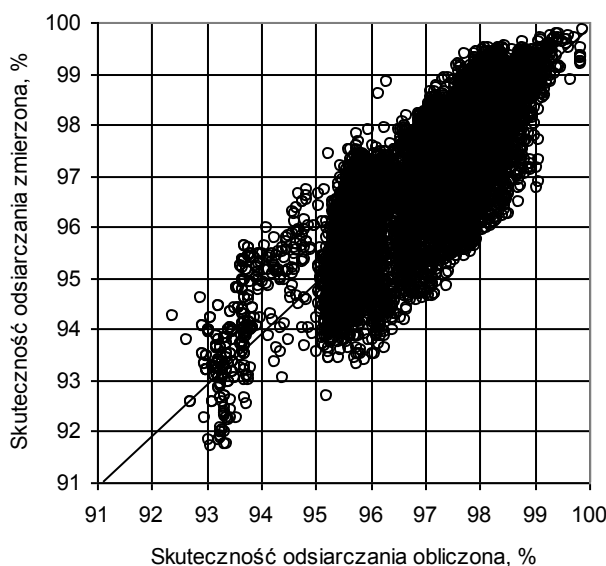
Opracowane równania korelacyjne (na podstawie pobranych z systemu monitoringu parametrów pracy IOS wyników pomiarów) poddawano weryfikacji. Z upływem czasu pracy nad udoskonalaniem modelu obliczeniowego procesu odsiarczania spalin w absorberze powstało kilka takich równań. Ten sposób postępowania pozwolił stwierdzić, które z opracowanych równań charakteryzuje się największą zbieżnością wyników obliczeń z

wynikami pomiarów skuteczności odsiarczania. Ze zrozumiałych względów opracowane równania nie mogą być udostępnione (w rozumieniu art. 11, ust. 4 ustawy o zwalczaniu nieuczciwej konkurencji [5] stanowią tajemnicę RAFAKO S.A.). O jakości jednego z opracowanych równań korelacyjnych dla IOS w elektrowni spalającej węgiel brunatny świadczy uzyskana zależność między zmierzoną i obliczoną skutecznością odsiarczania spalin, przedstawiona na rys. 4.

Maksymalne odchylenie obliczonej skuteczności odsiarczania wg opracowanego równania korelacyjnego od wartości zmierzonej wynosi: +2,778% i -2,587%, a średnie: +0,56% i -0,434%. Statystyki przeprowadzonej regresji wielokrotnej są następujące:

- Wielokrotność $R = 0,99871$,
- $R^2 = 0,99742$,
- Dopasowany $R^2 = 0,99738$,
- Błąd standardowy $S_e = 0,06662$,
- Obserwacje: 25720.

Do przeprowadzenia regresji wielokrotnej wykorzystano 25720 wyników pomiaru skuteczności odsiarczania, zgromadzonych przez 3 miesiące monitorowania parametrów pracy IOS (w systemie wyniki zapisywano co 10 minut). Otrzymano dużą wartość współczynnika korelacji wielokrotnej, co świadczy o bardzo dobrym dopasowaniu powierzchni regresji do danych empirycznych



Rys. 4. Zależność między zmierzoną i obliczoną skutecznością odsiarczania spalin

4. Wpływ zadanej skuteczności odsiarczania spalin i rodzaju spalanego węgla na wybrane parametry techniczne i technologiczne IOS

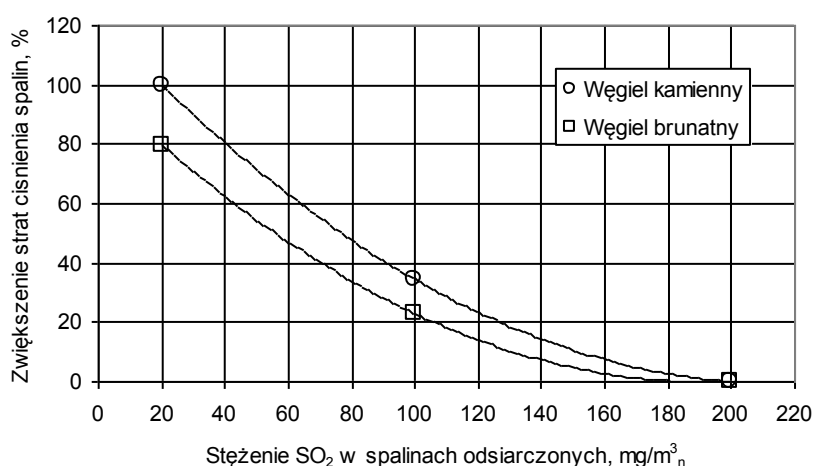
Instalacje odsiarczania spalin według mokrej metody wapiennej z równie dobrym powodzeniem odsiarczają spaliny powstające w procesie spalania węgla brunatnego, jak i węgla kamiennego. Nie znaczy to, że ten sam efekt odsiarczania w tych instalacjach osiąga się przy takim samym zużyciu kamienia wapiennego, zapotrzebowaniu wody, mocy na wale wentylatora wymuszającego przepływ spalin przez instalację i pobieranej mocy przez silniki pomp absorbera [6].

Warto prześledzić kształtowanie się wartości tych parametrów z uwzględnieniem w bilansach rodzaju spalanego węgla oraz dążeniu do osiągnięcia w odsiarczanych spalinach na wylocie z absorbera stężenia SO_2 o wartości umożliwiającej zastosowanie technologii usuwania ze spalin kotłowych dwutlenku węgla, znanej pod nazwą CCS (*Carbon Capture and Storage*), często zwanej sekwestracją CO_2 .

W rozważaniach tych za punkt odniesienia przyjęto standard stężenia emisyjnego SO_2 w spalinach odsiarczonych $200 \text{ mg/m}^3_{\text{nss } 6\% \text{O}_2}$, a stężenie docelowe, wynikające z potrzeb stosowania technologii CCS, ustalono na $20 \text{ mg/m}^3_{\text{nss } 6\% \text{O}_2}$.

Jest oczywiste, że wraz z dążeniem do zmniejszania stężenia SO_2 w spalinach na wylocie z absorbera straty ciśnienia spalin będą zwiększać się. Jest to spowodowane tym, że w celu zmniejszania stężenia SO_2 należy w absorberze rozpylać odpowiednio więcej zawiesiny absorpcyjnej, której strumień objętości jest skierowany przeciwnie do kierunku przepływu spalin.

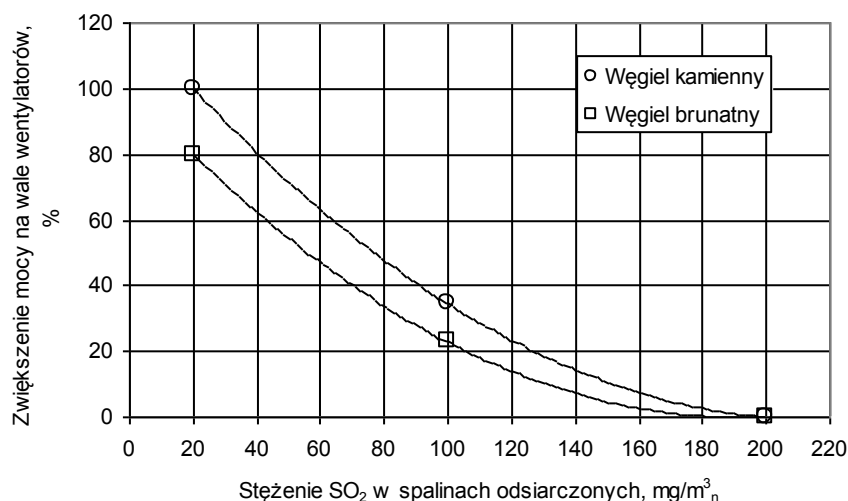
Przeprowadzona analiza wykazała, że stopień zwiększania się strat ciśnienia spalin w absorberze będzie większy w przypadku odsiarczania spalin, powstających w procesie spalania węgla kamiennego (rys. 5). Warto zwrócić uwagę na bardzo znaczące zwiększanie się strat ciśnienia wraz z dążeniem do uzyskania bardzo małych wartości stężenia SO_2 w spalinach odsiarczonych.



Rys. 5. Zależność stopnia zwiększania się strat ciśnienia spalin w IOS od stężenia SO_2 w spalinach na wylocie z absorbera

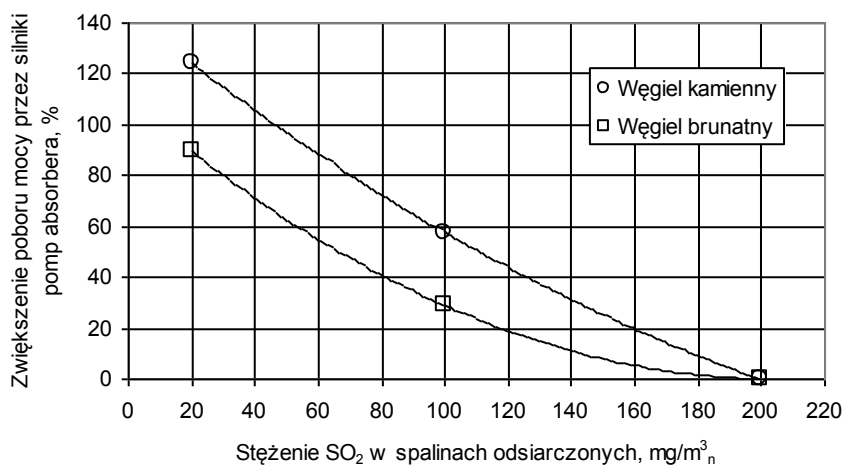
W ślad za zwiększaniem się strat ciśnienia spalin w IOS zwiększa się pobór mocy przez silnik wentylatora transportu spalin (rys. 6). Ten parametr ma większe wartości w przypadku odsiarczania spalin powstających w procesie spalania węgla kamiennego.

W znacznym stopniu zmniejszenie stężenia SO_2 w spalinach odsiarczonych jest zależne od ilości rozpylanej w absorberze zawiesiny zmielonego kamienia wapiennego, wyrażane stosunkiem L/G . Towarzyszy temu zwiększanie się poboru mocy przez pompy tłoczące zawiesinę absorpcyjną do absorbera (rys. 7).



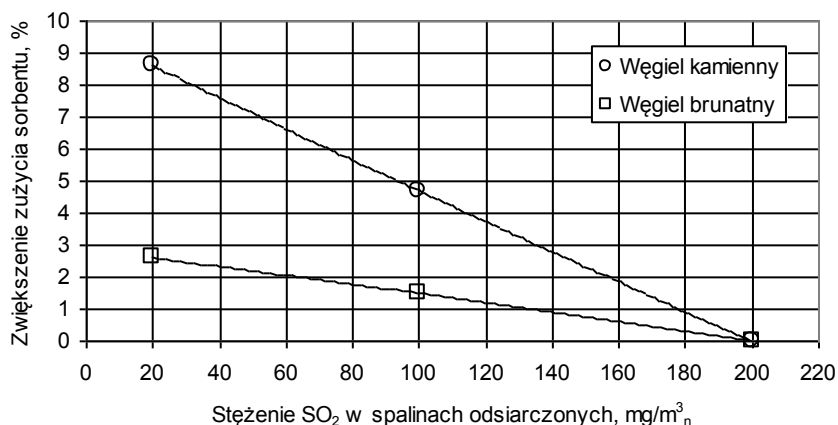
Rys. 6. Zależność stopnia zwiększania się mocy na wale wentylatora wymuszającego przepływ spalin w IOS od stężenia SO₂ w spalinach na wylocie z absorbera

Tak, jak w poprzednich przypadkach, obserwuje się, że odsiarczanie spalin powstających w procesie spalania węgla kamiennego z dużą skutecznością wymaga większego wzrostu poboru mocy niż podczas odsiarczania spalin powstających w procesie spalania węgla brunatnego.



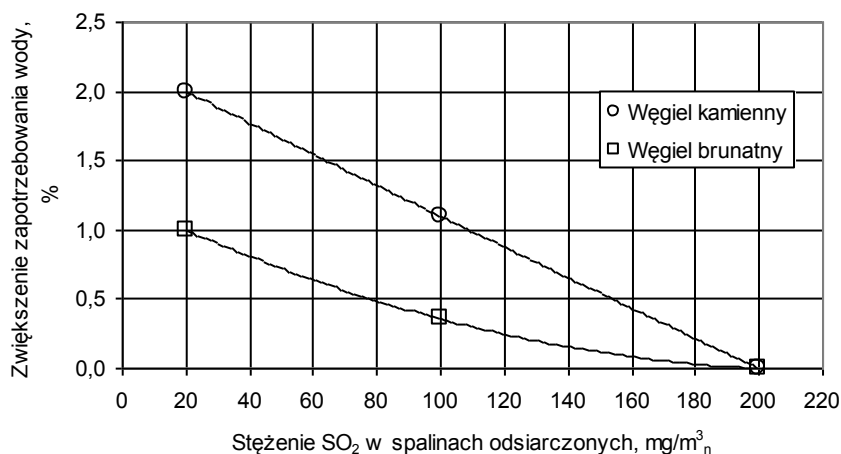
Rys. 7. Zależność stopnia zwiększania się poboru mocy przez silniki pomp tłoczących zawieszinę absorpcyjną do absorbera IOS od stężenia SO₂ w spalinach na wylocie z absorbera

Konsekwencją zwiększania skuteczności odsiarczania spalin w IOS jest zwiększanie stopnia zużycia reagenta. Dla odsiarczania spalin pochodzących ze spalania węgla kamiennego stopień zwiększania zużycia zmielonego kamienia wapiennego jest większy niż w przypadku odsiarczania spalin powstających w procesie spalania węgla brunatnego (rys. 8). W obu przypadkach dążenie do osiągnięcia małych wartości stężenia SO₂ w spalinach odsiarczonych ma niewielki wpływ na stopień zwiększenia zużycia reagenta.



Rys. 8. Zależność stopnia zwiększania się zużycia kamienia wapiennego w IOS od stężenia SO₂ w spalinach odsiarczonych

Najmniejszy z analizowanych stopni zwiększania parametrów charakteryzujących pracę IOS jest stopień zwiększenia zapotrzebowania wody świeżej (rys. 9).



Rys. 9. Zależność stopnia zwiększania zapotrzebowania wody w IOS od stężenia SO₂ w spalinach odsiarczonych

Znacznie większy przyrost stopnia zapotrzebowania na wodę dla instalacji odsiarczania spalin odprowadzanych z kotła opalanego węglem kamiennym wynika z większej zawartości chlorowodoru w oczyszczanych spalinach, który niemalże w 100% jest absorbowany zawiesiną absorpcyjną.

Aby utrzymać stężenie chlorków w zawieszynie absorpcyjnej na dopuszczalnym poziomie (30000 ppm) z IOS należy odprowadzać odpowiedni strumień cieczy (traktowanej jako ścieki) do mechaniczno-chemicznej oczyszczalni ścieków. W oczyszczalni ścieków zachodzi redukcja zawartości m. in. chlorków, fluorków, popiołu lotnego, metali ciężkich i innych zanieczyszczeń.

5. Podsumowanie

Na podstawie doskonalenia procedur projektowania IOS, działających według zasad mokrej metody wapiennej, oraz zdobywanych doświadczeń podczas monitorowania wielu

parametrów technicznych i technologicznych, prowadzenia pomiarów rozruchowych oraz gwarancyjnych na rzeczywistych obiektach, wyposażonych w IOS, zgromadzono duży zasób wyników, które nieustannie wykorzystuje się do optymalizowania procesów jednostkowych prowadzonych w urządzeniach i aparatach instalacji.

W działaniach nad optymalizowaniem pracy absorbera wykorzystuje się dziesiątki tysięcy zgromadzonych wyników pomiarów parametrów, od których zależy skuteczność odsiarczania spalin i jakość otrzymywanego sztucznego gipsu. W celu udoskonalania i zwiększania dokładności obliczania skuteczności odsiarczania spalin w absorberze natryskowym do równań korelacyjnych wprowadza się jako zmiennych niezależnych nawet 10 parametrów. Równania te poddaje się weryfikacji.

Pozwala to obliczać (projektować) skuteczność odsiarczania spalin z bardzo dużą dokładnością. Średnie odchylenie wyników pomiarów skuteczności odsiarczania spalin od wyników obliczeń są na poziomie 0,5%, a nawet mniejszym, natomiast maksymalne są mniejsze od 2,5%.

Równocześnie opracowuje się korelacje zachodzące między parametrami pracy absorbera, a skutecznością odpylania oraz usuwania ze spalin chlorowodoru i fluorowodoru.

Z myślą o przyszłości, do priorytetów współpracy Zakładu Naukowo-Dydaktycznego Instytutu Inżynierii Ochrony Środowiska Politechniki Wrocławskiej z RAFAKO SA należy zaliczyć analizy i badania zmierzające do określenia parametrów pracy IOS zapewniających osiągnięcie w niej skuteczności odsiarczania ponad 99% (stężenie SO₂ w spalinach odsiarczonych rzędu 20-30 mg/m³_{nss} 6%O₂, co ma stworzyć warunki do stosowania w elektrowniach krajowych technologii CCS usuwania ze spalin CO₂, jego transportu i składowania, czyli sekwestracji CO₂.

Tak bardzo duże skuteczności oczyszczania spalin generują pewne skutki i potrzeby natury technicznej, inwestycyjnej i ekonomicznej.

W pracy poruszono zagadnienie stopnia zwiększenia niektórych parametrów energetycznych (zwiększenie strat ciśnienia spalin w IOS, mocy na wale wentylatora wymuszającego przepływ spalin, poboru mocy przez silniki pomp tłoczących zawieszoną absorpcyjną) i materiałowych (zwiększenie zużycia kamienia wapiennego w IOS i zapotrzebowania wody świeżej).

Literatura

1. Głomba M., Mazurek J., Krahl S.: Badania nad modelem odsiarczania spalin-rozwoj modelu obliczeniowego. VII Konferencja. Usuwanie szkodliwych substancji stałych i gazowych ze spalin kotłowych. Słok k. Bełchatowa, marzec 2010, 121-140.
2. Rozporządzenie Min. Środowiska z dnia 20.12.2005 r. w sprawie standardów emisyjnych z instalacji. Dz. U. Nr 260, poz. 2181 z późn. zm.
3. Głomba M., Mazurek J.: Badania modelowe i obiektowe nad procesem odsiarczania spalin metodą wapienną. Konferencja. Instalacje odsiarczania spalin. Rozwoj technologii i doświadczenia eksploatacyjne. Słok k. Bełchatowa, marzec 2008, 143-154.
4. Głomba M., Mazurek J., Krahl S.: Badania nad modelem procesu odsiarczania spalin kotłowych według mokrej metody wapiennej oraz własne know-how w zakresie odsiarczania spalin kotłowych. Jubileuszowa Konferencja Kotłowa 2009, z okazji 60-lecia Fabryki kotłów RAFAKO SA w Raciborzu. Aktualne problemy budowy i eksploatacji kotłów, Szczyrk, październik 2009, 233-252.
5. Dziennik Ustaw nr 47, poz. 211 z 1993 r. z późniejszymi zmianami.

6. Mazurek J., Kobyłańska M., Lassak J.: Konfiguracja i parametry instalacji odsiarczania spalin dla bloku klasy 900 MW. Konferencja. Usuwanie szkodliwych substancji stałych i gazowych ze spalin kotłowych. Słok k. Bełchatowa, marzec 2010, 75-97.