

# EKOLOGICZNE ASPEKTY OCZYSZCZANIA SPALIN ZE SPALARNI ODPADÓW KOMUNALNYCH I PRZEMYSŁOWYCH

Wojciech MOKROSZ  
Mokrosz Sp. z o.o., ul. Kozielska 2a, 47-430 Rudy  
mokrosz@mokrosz.pl

## STRESZCZENIE

Zaprezentowano możliwości wykorzystania dostępnych technologii oczyszczania spalin ze spalarni odpadów przemysłowych i komunalnych w aspekcie zoptymalizowania zagrożeń ekologicznych związanych z emisją odpadów niebezpiecznych i ścieków emitowanych z procesów po oczyszczeniu spalin. Dodatkowo zaprezentowano porównawczą analizę kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych omawianych technologii oczyszczania spalin. Na przykładzie półsuchej instalacji oczyszczania spalin, wdrożonej w Elektrowni Skawina, omówiono proces modelowania i optymalizacji kształtu reaktora pneumatycznego, odpowiedniego do zastosowań w półsuchych technologiach oczyszczania spalin ze spalarni odpadów: począwszy od badań laboratoryjnych poprzez półtechnikę do wdrożenia i badań homologacyjnych na eksploatowanym obiekcie. W referacie wskazano i omówiono optymalną dla warunków polskiej gospodarki odpadami technologię oczyszczania spalin, wskazano również na potencjalne możliwości jej wdrożenia w oparciu o rodzimy przemysł.

## OZNACZENIA

$\eta$	- skuteczność odsiarczania	
$c_p, c_k$	- stężenia $SO_2$ , początkowe i końcowe,	$mg/m_n^3$
$Ca/S$	- stosunek molowy reagentów odniesiony do całego strumienia $SO_2$ w spalinach, $Ca/S$ ,	$mol/mol$
$\Delta t$	- różnica temperatur pomiędzy końcową temperaturą spalin i temperaturą adiabatycznego nasycenia spalin,	$K$
$a$	- powierzchnia właściwa sorbentu,	$m^2/g$
$c_{HCl}$	- początkowe stężenia $HCl$ , w spalinach,	$mg/m_n^3$

## 1. Wstęp

Spalanie odpadów jest kontrowersyjną, ale skuteczną metodą ich utylizacji. Termiczna utylizacja odpadów powoduje zmniejszenie ilości odpadów oraz umożliwia przetworzenie zawartej w nich energii chemicznej – dzisiejsze technologie pozwalają na redukcję od 80% objętości odpadów (bez przetwarzania żużla) do 95% (z przetwarzaniem żużla). Redukcja masy wynosi od 60 do 70%. Głównymi produktami po spalaniu są żużel oraz popioły. Żużel może być wykorzystany gospodarczo, jako materiał budowlany. Popioły ze względu na zawartość w nich metali ciężkich zaliczane są do odpadów niebezpiecznych.

Spalarnie rozwiązują też problem odpadów, których składować nie można np. odpady poszpitalne, pochodzące z przemysłu chemicznego, jak i odpady pochodzące z innych gałęzi przemysłu. Dodatkowo ciągle opracowywane są nowe techniki najefektowniejszego wykorzystywania energii z procesów spalania – z przetworzeniem jej w ciepło i/lub energię elektryczną. Aktualnie w Unii Europejskiej 20% odpadów poddawanych jest termicznemu

przetworzeniu w spalarniach, a w Japonii utylizowanych jest w ten sposób 80% odpadów.

W trakcie spalania odpadów generowane są substancje szkodliwe dla człowieka i środowiska. Należą do nich między innymi dioksyny, do których zaliczamy polichlorowane dibenzoparadioksyny, polichlorowane dibenzofurany i niektóre polichlorowane bifenyle, zaliczane do dioksynopodobnych (PCDD/F). Udowodniono, iż polichlorowane dibenzoparadioksyny od wieków występowały w środowisku naturalnym. Powstają one podczas wybuchów wulkanów, pożarów lub wyładowań elektrycznych. Z badań wynika, iż nie wykryto w głębokich warstwach gleby polichlorowanych dibenzofuranów, co wskazuje na ich antropogeniczne pochodzenie.

Dioksyny nigdy nie były pożądanym produktem – nie mają zastosowania w przemyśle – toteż przez wiele lat w ogóle nie wiadano o ich istnieniu i tworzeniu się. Pierwsze odkrycia przypadają na koniec XIX w. i początek XX w. Badania źródeł emisji przypadają na lata siedemdziesiąte XX w. Natomiast dioksynopodobne – polichlorowane bifenyle były produkowane na dużą skalę głównie w latach trzydziestych XX w. Dopiero w latach sześćdziesiątych XX w. odkryto, ich silne właściwości nowotworcze.

Fenomen dioksyn polega na ich bardzo toksycznym działaniu przy bardzo małym stężeniu. Dodatkowo mają zdolności bioakumulacji i biomagnifikacji. Więc im wyżej w łańcuchu pokarmowym, poziom nagromadzenia w organizmach żywych jest wyższy.

Stan wiedzy na temat dioksyn i dioksynopodobnych jest odzwierciedleniem polityki w zakresie ochrony środowiska. Zarówno Europa Zachodnia jak i USA mają dobrze rozwinięte systemy zarówno kontroli jak i usuwania tychże związków.

W najbliższych latach Polska będzie musiała dostosować swój system przetwarzania odpadów do standardów Unii Europejskiej, stąd przewiduje się budowę 8÷10 spalarni odpadów komunalnych. W chwili obecnej w Polsce eksploatowana jest tylko jedna spalarnia odpadów komunalnych w Warszawie.

Ważnym zagadnieniem jest właściwy i przemyślany wybór technologii przetwarzania odpadów umożliwiający uzyskanie zamierzonego celu, przy dotrzymaniu obowiązujących standardów emisyjnych i zadawalającej efektywności ekonomicznej inwestycji.

## **2. Stosowane w praktyce metody oczyszczania spalin ze spalarni odpadów oraz metody redukcji związków wielkocząsteczkowych w procesie termicznego przetwarzania odpadów**

Duża różnorodność technologii oczyszczania spalin oraz metod redukcji związków wielkocząsteczkowych powoduje, że często głównym kryterium ich doboru jest koszt inwestycyjny. Jednak w dalszej perspektywie wybór taki związany jest zwykle z podwyższonymi kosztami eksploatacyjnymi instalacji oraz niedogodnościami związanymi z koniecznością utylizacji generowanych w procesie oczyszczania odpadów.

Zasadniczo technologie oczyszczania spalin i redukcji generowania w procesie utylizacji zanieczyszczeń podzielono na pierwotne i wtórne.

### **2.1. Metody pierwotne**

Metody pierwotne polegają na wyeliminowaniu i/lub ograniczeniu procesów generowania substancji szkodliwych w procesie spalania, obejmują one redukcję związków PCDD/F oraz tlenków azotu. Realizowane są poprzez zapewnienie odpowiednich warunków procesu spalania:

- utrzymanie temperatury spalania na poziomie  $>850^{\circ}\text{C}$  przy kilkusekundowym czasie

- retencji dla odpadów o zawartości chloru  $< 1\%$  mas. i zawartości  $O_2$  w splinach  $> 6\%$ ,
- utrzymanie temperatury spalania na poziomie  $> 1100^\circ C$  przy kilkusekundowym czasie retencji dla odpadów o zawartości chloru  $> 1\%$  mas. i zawartości  $O_2$  w splinach  $> 6\%$
- minimalizację zawartości CO w spalinach,
- minimalizację zawartości pyłu i chloru w spalinach (ograniczenie tzw. procesu *de novo*),
- zapewnienie odpowiedniej zawartości  $SO_2$  w spalinach.

Metody te polegają na właściwym doborze kotła, pieca, o odpowiedniej konstrukcji komory spalania, komory dopalania oraz właściwym doborze paliwa. Zastosowanie dodatkowo technologii niekatalitycznej selektywnej redukcji tlenków azotu (SNCR) w znaczny sposób ogranicza powstawanie związków PCDD/F w samym procesie spalania i oczyszczania spalin. Metody te są użyteczne w procesach przetwarzania energii w kotłach konwencjonalnych oraz we wszystkich innych procesach spalania. W przypadku kompleksowego oczyszczania spalin jest to zwykle jedna z metod ograniczania emisji PCDD/F i  $NO_x$ .

## 2.2. Metody wtórne

W procesach tych proces redukcji emisji zanieczyszczeń gazowych związany jest z kompleksowym oczyszczaniem spalin z kwaśnych zanieczyszczeń gazowych nieorganicznych (HCl, HF,  $SO_2$ ,  $SO_3$ , NO,  $NO_2$ ), metali ciężkich, PCDD/F oraz pyłów i par. Procesy te realizowane są zasadniczo w oparciu o dwie technologie oczyszczania spalin: mokrą oraz półsuchą wyposażone dodatkowo w węzły adsorpcji PCDD/F i odazotowania zwykle SNCR, rzadziej katalityczny SCR.

### 2.2.1. Metody półsuche

Metody półsuche polegają na kontaktowaniu zwykle odpylonych w elektrofiltrze gazów z sorbentem w postaci wodorotlenku wapnia i węgla aktywnego. Proces jest zwykle poprzedzony kondycjonowaniem spalin skutkującym obniżeniem ich temperatury, zwykle jednak z uwagi na powstawanie higroskopijnego chlorku wapniowego prowadzony jest w temperaturze powyżej  $120^\circ C$ . Technologie te umożliwiają skuteczne usuwanie zanieczyszczeń kwaśnych, PCDD/F, oparów oraz odpylanie do poziomu  $10-20 \text{ mg/m}_n^3$ . Usuwanie tlenków azotu realizowane jest zwykle w oparciu o technologię SNCR lub SCR.

Zaletą metod półsuchych są niskie nakłady inwestycyjne na poziomie  $360 \text{ zł/m}_n^3$  oczyszczanych spalin. Wadą wysokie koszty eksploatacyjne na poziomie  $0,0025 \text{ zł/m}_n^3$  i koszty zagospodarowania odpadów na poziomie  $0,00125 \text{ zł/m}_n^3$ . Dodatkowo w Polsce nie istnieją składowiska odpadów niebezpiecznych ze spalarni odpadów i odpady te muszą być deponowane poza granicami kraju lub poddawane stabilizacji.

Pewną odmianą tej technologii jest stosowanie wydzielonego węzła absorpcji związków PCDD/F oraz par rtęci za instalacją odsiarczania z zawracaniem węgla do procesu spalania. Rozwiązanie to jednak powoduje pewną remisję pyłu węglowego z adsorbera i w związku z tym wymagane jest skuteczniejsze odpylenie spalin w filtrze tkaninowym. Stwarza jednak możliwość łatwiejszego zagospodarowania produktu po odsiarczaniu spalin.

Odpady niebezpieczne w technologiach półsuchych to popiół z elektrofiltru oraz produkty odsiarczania spalin opcjonalnie wraz sorbentem węglowym.

### 2.2.2. Metody mokre

Metody mokre polegają na kontaktowaniu, zwykle odpylonych w elektrofiltrze, gazów w dwustopniowym absorberze natryskowym lub z wypełnieniem. W pierwszym stopniu następuje obniżenie temperatury spalin do temperatury termometru mokrego, wydzielenie pyłu oraz usuwane są łatwo absorbowalne zanieczyszczenia kwaśne HCl i HF. Czynnikiem sorpcyjnym jest woda procesowa z odwadniania gipsu lub roztwór poabsorpcyjny z drugiego stopnia absorpcji. W drugim stopniu absorpcji usuwany jest ditlenek siarki. Czynnikiem sorpcyjnym jest zawiesina węgla wapniowego. W dalszym ciągu realizowany jest proces adsorpcji PCDD/F zwykle poprzez kontaktowanie spalin sorbentem węglowym. Usuwanie tlenków azotu realizowane jest w oparciu o technologię SNCR lub SCR. Produkty odsiarczania to ścieki odprowadzane z pierwszego stopnia absorpcyjnego do instalacji oczyszczania ścieków oraz zawiesina gipsu z drugiego stopnia oczyszczania, która po odwodnieniu jest łatwa do zagospodarowania.

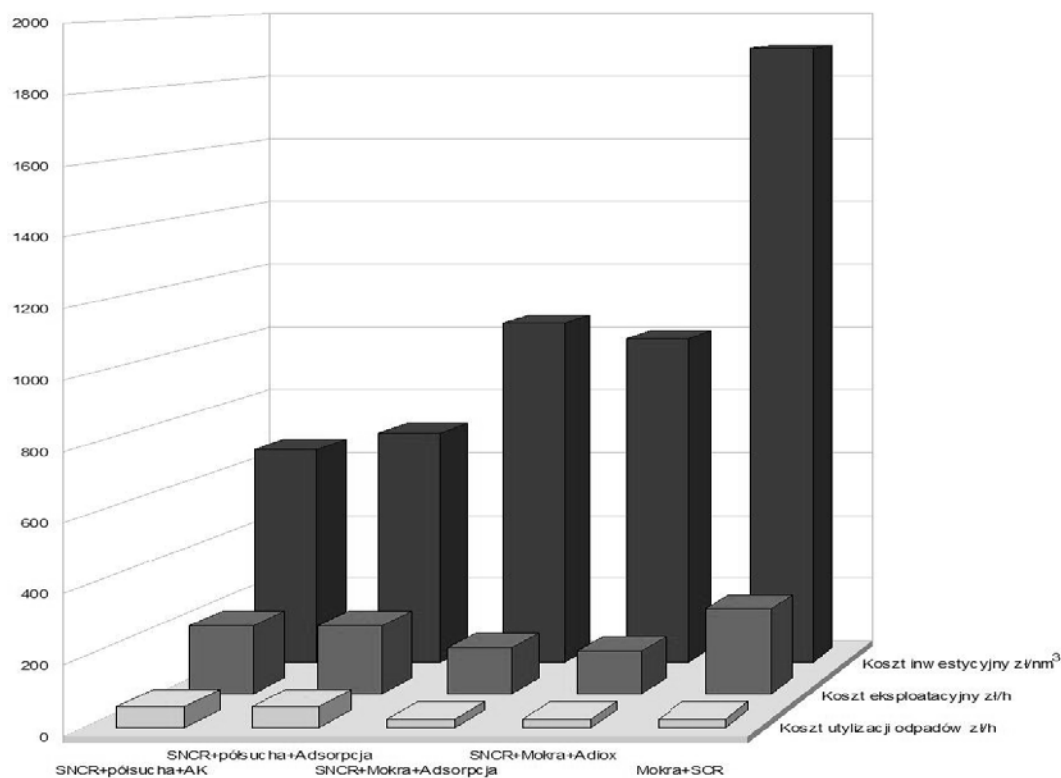
Zaletą metod mokrych są niższe koszty eksploatacyjne i łatwe do zagospodarowania produkty oczyszczania spalin. Nakłady inwestycyjne mokrych metod oczyszczania kształtują się na poziomie  $1000\div 2000 \text{ zł/m}_n^3$  oczyszczanych spalin. Koszty eksploatacyjne nie przekraczają  $0,001\div 0,004 \text{ zł/m}_n^3$  i koszty zagospodarowania odpadów  $0,0005 \text{ zł/m}_n^3$ . Dodatkowo technologia mokra nie generuje odpadów niebezpiecznych. Zaletą metod mokrych jest możliwość stosowania wypełnień polipropylenowych zawierających węgiel aktywny co dodatkowo umożliwia obniżenie kosztów eksploatacyjnych. Zalety metod mokrych związane są głównie z dwustopniową absorpcją umożliwiającą odseparowanie jonów  $\text{Cl}^-$  i łatwe zestalenie gipsu oraz łatwe odseparowanie węgla z zaadsorbowanymi PCDD/F w filtrze tkaninowym, i jego późniejszą utylizację przez spalenie.

### 3. Analiza nakładów inwestycyjnych wybranych technologii oczyszczania spalin ze spalarni odpadów

Na rysunku 1 zaprezentowano koszty oczyszczania spalin ze spalarni odpadów rozwiązanych w oparciu o technologię mokrą i pólśuchą wg różnych konfiguracjach technologicznych. Analizę przeprowadzono dla instalacji emitującej  $50\,000 \text{ m}_n^3/\text{h}$  spalin

Analiza wykresu wskazuje, że pomimo niedogodności związanych z wyższymi kosztami eksploatacyjnymi, metoda pólśucha z dozowaniem węgla aktywnego jest godną uwagi technologią oczyszczania spalin. W stosunku do metody mokrej charakteryzuje się wyższymi kosztami eksploatacyjnymi, niemniej jednak koszt inwestycyjny jest znacznie niższy, dodatkowo wymaga mniej miejsca na lokalizację, nie wymaga podgrzewu spalin i jest dużo prostsza w eksploatacji. W ostatnich latach technologia ta znajduje coraz powszechniejsze zastosowanie do oczyszczania spalin ze spalarni odpadów. W przypadku metod mokrych produkty oczyszczania są łatwiejsze do zagospodarowania, w szczególności w wariancie z węzłem SCR, jednak wysokie koszty inwestycyjne sprawiają, że rozwiązanie w takiej konfiguracji stosowane jest w przypadku spalarni przemysłowych, gdzie istnieje ryzyko dużej zmienności ilości emitowanych zanieczyszczeń gazowych.

W ostatnim czasie obserwuje się też dużą liczbę wdrożeń technologii mokrej w wersji „Adiox” opartej o pylisty sorbent węglowy imobilizowany w osnowie polipropylenowej formowany w kształcie typowych wypełnień usypowych. Technologia ta, ze względu na swoją prostotę i eliminację wielu niedogodności w stosunku do metod adsorpcyjnych opartych o węgiel aktywny stanowi atrakcyjną propozycję.



Rys. 1. Porównanie kosztów oczyszczania spalin ze spalarni odpadów

#### 4. Produkty i odpady powstające w procesach spalania odpadów komunalnych

Termiczna utylizacja odpadów komunalnych związana jest z powstawaniem produktów i odpadów generowanych podczas spalania oraz w trakcie oczyszczania spalin.

Żużel jest odpadem odprowadzonym z kotła z układu mokrego odżużlenia. W przypadku właściwie zaprojektowanego kotła, żużel poddawany jest zwykle frakcjonowaniu i separacji metali żelaznych i nieżelaznych. Po sezonowaniu stanowi on pełnowartościowy produkt, który może zostać wykorzystany w budownictwie lub jako podsypka do budowy dróg.

Popiół lotny jest produktem spalania odpadów wydzielanym w ciągach konwekcyjnych kotła i/lub odpylaczu wstępnym. W zależności od temperatury panującej w poszczególnych ciągach konwekcyjnych popiół lotny można podzielić na dwa gatunki. Przyjmuje się, że popiół wydzielany w strefie temperatur powyżej 500°C nie zawiera związków PCDD/F i może on być deponowany lub utylizowany jak popioły z kotłów energetycznych. Popioły wydzielane w kolejnych ciągach kotła, reaktorze oraz odpylaczu zawierają w swoim składzie związki toksyczne i są zwykle magazynowane i deponowane wspólnie z produktem oczyszczania spalin.

Produkt poprocesowy z instalacji półsuchego oczyszczania spalin stanowi mieszaninę wydzielonych zanieczyszczeń siarczynu i siarczanu wapniowego, nieprzereagowanego sorbentu i popiołu lotnego. Produkt wydzielany w reaktorze i odpylaczu, zawiera w swoim składzie związki toksyczne oraz rozpuszczalne związki nieorganiczne (głównie CaCl<sub>2</sub>). Jest on zwykle magazynowany i deponowany wspólnie z popiołem lotnym lub stabilizowany z użyciem specjalnych dodatków mieszanek cementowo-polimerowych.

Produkt poprocesowy z instalacji mokrego oczyszczania spalin stanowi łatwy do utylizacji gips, zestalany zwykle z cementem w elementy wykorzystywane do formowania składowisk odpadów.

Ścieki z instalacji kierowane są do instalacji chemicznego oczyszczania i/lub zatężane, powstały osad może następnie zostać stopiony i poddany procesowi zeszkliwiania z wytworzeniem odpadu łatwego do zagospodarowania.

Adsorbent (koks aktywny) utylizowany jest poprzez spalenie w kotle.

## 5. Badania doświadczalne półsuchego procesu oczyszczania spalin – modelowanie i optymalizacji kształtu reaktora pneumatycznego

Badania doświadczalne przeprowadzono na pilotowych instalacjach odsiarczania spalin o różnych wydajnościach, opisanych w pracy [1]. Przeprowadzone badania umożliwiły opracowanie równania skuteczności odsiarczania uwzględniającego istotne parametry procesowe oraz określenie skuteczności usuwania innych łatwo usuwalnych zanieczyszczeń kwaśnych (HF, HCl oraz SO<sub>3</sub>). Badania uwzględniały wpływ wilgotności spalin, nadmiaru stechiometrycznego sorbentu Ca/S, powierzchni właściwej sorbentu, stężenia dwutlenku siarki, koncentracji zapylenia oraz wpływ obecności chlorowodoru i popiołu lotnego na proces odsiarczania.

Ilościowy wpływ wybranych parametrów na skuteczność odsiarczania, dla Ca(OH)<sub>2</sub> jako sorbentu przedstawiono w postaci równań empirycznych opisujących skuteczność procesu odsiarczania [1] w dwóch zakresach końcowej temperatury spalin:

$$\eta_{SO_2} = 1 - \exp\left(-1,5 \cdot \Delta T^{-0,5} \cdot a^{0,4} \cdot x_{HCl}^{0,04} \cdot \left(\frac{Ca}{S} \cdot k_{rec}\right)^{0,34}\right) \quad \text{dla } T < 373 \text{ K} \quad (1)$$

zakres stosowalności równania (1):

$$\begin{aligned} \Delta T &= 10 \div 45 \text{ K} & a &= 10 \div 21 \text{ m}^2/\text{g} & x_{HCl} &= 1 \div 500 \text{ mg}/\text{m}_n^3 \\ k_{rec} &= 5 \div 100 & Ca/S &= 1,0 \div 1,25 \text{ mol}/\text{mol} \\ \text{błąd korelacji } \delta &= \pm 15\% \end{aligned}$$

$$\eta_{SO_2} = 1 - \exp\left(-0,07 \cdot \Delta T^{0,3} \cdot \left(\frac{Ca}{S} \cdot k_{rec}\right)^{0,4}\right) \quad \text{dla } T < 373 \text{ K} \quad (2)$$

zakres stosowalności równania (2):

$$\begin{aligned} \Delta T &= 45 \div 250 \text{ K} & k_{rec} &= 5 \div 100 & Ca/S &= 1,0 \div 1,25 \text{ mol}/\text{mol} \\ \text{błąd korelacji } \delta &= \pm 5\%. \end{aligned}$$

W trakcie badań w całym zakresie zmienności parametrów procesowych potwierdzono wysokie skuteczności usuwania pozostałych zanieczyszczeń kwaśnych:

- skuteczność usuwania chlorowodoru (HCl) >95%
- skuteczność usuwania fluorowodoru >85% dla stężeń HF w spalinach <50 mg/m<sub>n</sub><sup>3</sup>
- skuteczność usuwania trójtlenku siarki >90% dla stężeń SO<sub>3</sub> w spalinach <50÷250 mg/m<sub>n</sub><sup>3</sup>.

Opisane powyżej badania posłużyły do zaprojektowania przemysłowej instalacji odsiarczania spalin z reaktorem pneumatycznym w ZEC Łódź o wydajności 550 000 m<sub>n</sub><sup>3</sup>/h . Projekt zakładał zastosowanie reaktora pneumatycznego o kształcie cylindrycznym, poprzedzonego przewężeniem w formie zwężki Venturiego, mającej na celu wyrównanie profilu prędkości.

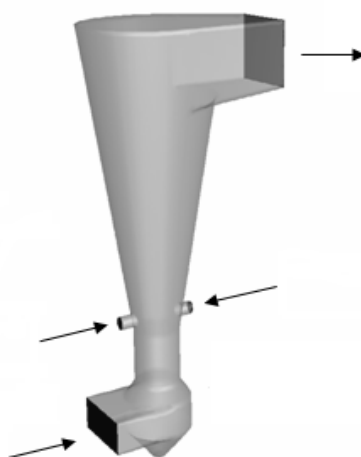
Zrealizowany reaktor pneumatyczny o geometrii jw. umożliwił uzyskanie zakładanych parametrów procesowych, jednak w trakcie długotrwałej eksploatacji wykazywał pewne niedogodności związane z nierównomiernym profilem prędkości. Dodatkowo przy mniejszych obciążeniach występowały skłonności do tworzenia na ściankach reaktora nawisów produktów odsiarczania.

W celu rozszerzenia możliwości aplikacyjnych oraz wyeliminowania opisanych niedogodności rozpoczęto poszukiwania mające na celu, w oparciu o dotychczas posiadane doświadczenia, opracowanie nowej konstrukcji reaktora. Dodatkowym celem opracowania nowej konstrukcji reaktora było uzyskanie wyższych efektywności procesu odsiarczania oraz ograniczenie kosztów inwestycyjnych, i eksploatacyjnych instalacji odsiarczania.

W celu określenia optymalnego kształtu reaktora, przeprowadzone zostały dodatkowe badania laboratoryjne. Pozwoliły one na określenie geometrii reaktora umożliwiającego wytworzenie odpowiedniej dla procesu odsiarczania koncentracji sorbentu w całej objętości reaktora.

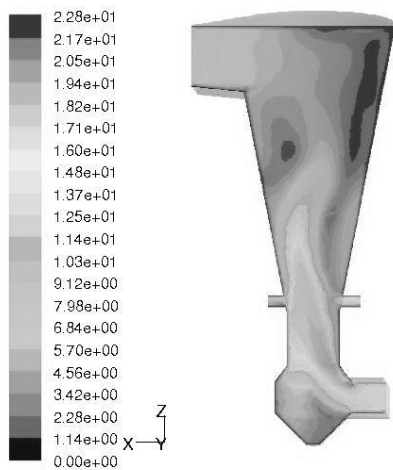
Istota rozwiązania polegała na tym, że poprzez odpowiednie ukształtowanie geometrii reaktora w formie odwróconego stożka ściętego, uzyskano odpowiednie ukierunkowanie przepływu spalin wlotowych w sposób umożliwiający wyrównanie profilu prędkości oraz uzyskanie wewnętrznej cyrkulacji sorbentu w obrębie reaktora (rys. 1).

Wewnętrzna cyrkulacja transportowanego aerozolu generowana jest w osi pionowej reaktora w szerokim zakresie zmienności przepływu spalin. Położenie wiru wewnętrznej cyrkulacji jest związane ze specyficzną ściśle określoną geometrią kształtu aparatu. Dodatkowo, duże szybkości spalin w warstwie przyściennej nie pozwalają na tworzenie się nawisów i narostów, oraz powodują samooczyszczanie się ścian reaktora. Rozwiązanie to przyczynia się do zmniejszenia koncentracji pyłu w odprowadzonych spalinach, przez co możliwe jest stosowanie odpylaczy o mniejszych gabarytach lub zwiększenie stężenia reagentów w reaktorze.

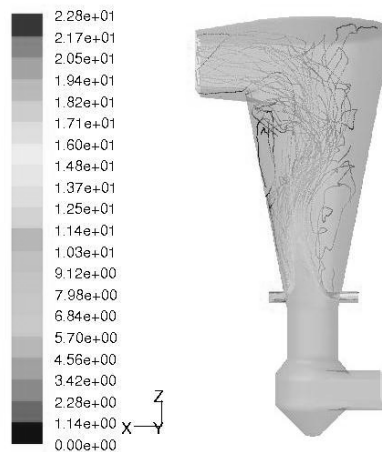


Rys. 1. Geometria reaktora pneumatycznego

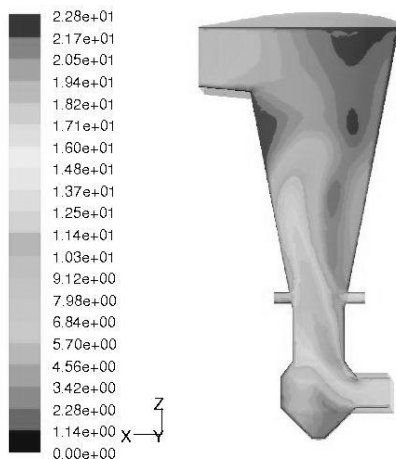
Obliczenia CFD wykorzystano do symulacji przepływu oraz jako narzędzie ilustrujące proces powiększania skali. Na rysunkach 2÷5 przedstawiono rozkłady prędkości średnich w aparacie dla  $w = 15 \text{ m/s}$  na wlocie i różnych średnic  $d_{p3} - 70 \text{ }\mu\text{m}$  i  $10 \text{ }\mu\text{m}$ . Ostatecznie, w oparciu o te obliczenia, RAFAKO S.A. zdecydowało się na wdrożenie badanego reaktora, co zaowocowało trzema wdrożeniami.



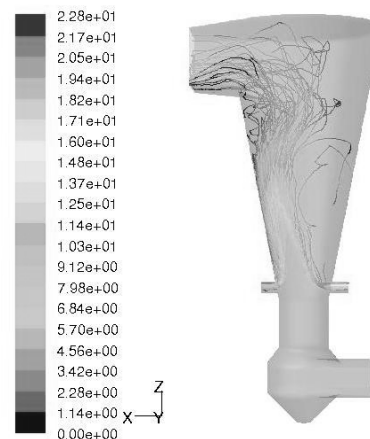
Rys. 2. Rozkład prędkości średnich  
w = 15 m/s



Rys. 3. Trajektorie i prędkości  
cząstek sorbentu  $d_{p3} = 70 \mu\text{m}$



Rys. 4. Rozkład prędkości średnich  
w = 15 m/s



Rys. 5. Trajektorie i prędkości  
cząstek sorbentu  $d_{p3} = 10 \mu\text{m}$

Uzyskiwany w praktyce efekt odsiarczania wg tej technologii jest lepszy niż uzyskany w trakcie badań laboratoryjnych oraz w wyniku obliczeń CFD. Aktualnie prowadzone są szczegółowe badania na eksploatowanych obiektach rzeczywistych zmierzające do walidacji posiadanych modeli oraz rozszerzenia zastosowań analizowanego reaktora o technologie oczyszczania spalin ze spalarni odpadów.

Analizowany reaktor pneumatyczny w stosunku do innych znanych i stosowanych w technice oczyszczania spalin ze spalarni odpadów rozwiązań charakteryzuje się znacznie



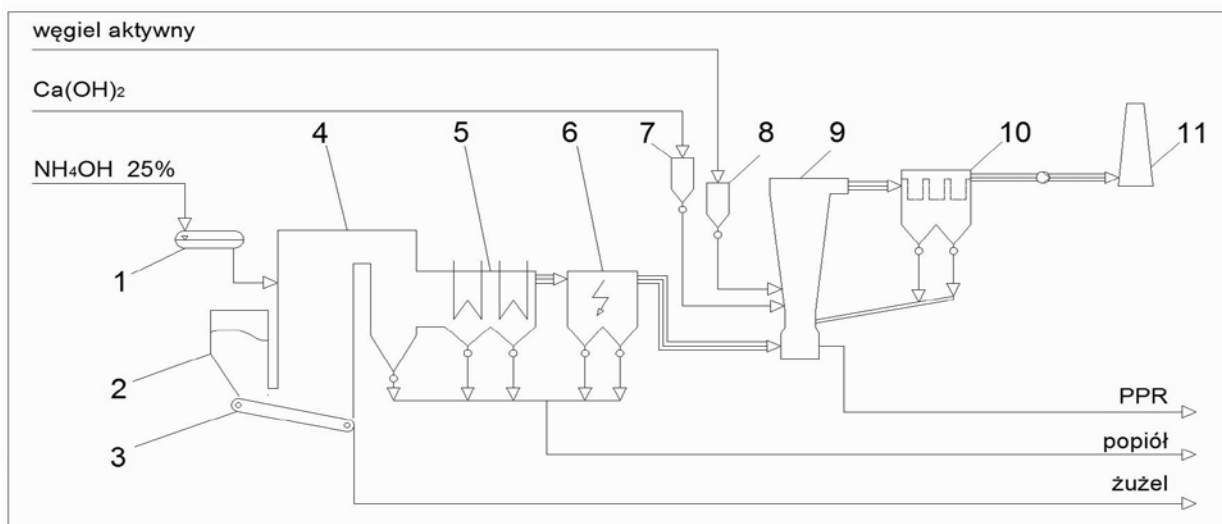
większym stopniem wykorzystania sorbentu. Nadmiary stechiometryczne w wyniku wielokrotnej cyrkulacji sorbentu w reaktorze zbliżone są do stechiometrii co w stosunku do reaktora rozpyłowego związane jest z generowaniem dwukrotnie mniejszego strumienia odpadu.

## 6. Wybór optymalnej technologii oczyszczania

Wskazanie jednoznacznie optymalnej technologii nie jest możliwe, niemniej jednak współczesna instalacja oczyszczania spalin powinna:

- wykorzystywać tzw. metody pierwotne – procesy ograniczające tworzenie związków wielkocząsteczkowych poprzez odpowiedni dobór komory spalania i dopalania, dobór paliw o odpowiedniej zawartości chloru i siarki, dozowanie addytywów redukujących emisję tlenków azotu i powstawanie PCDD/F (technologia SNCR);
- w minimalny sposób obciążać środowisko naturalne; dobrane technologie powinny w sposób kompleksowy utylizować generowane odpady, nie zaś zamieniać je na inne ilościowo czy też doprowadzać do powstawania trudnych do utylizacji odpadów niebezpiecznych;
- charakteryzować się szybką stopą zwrotu inwestycji, gwarantującą uzyskanie kredytowania; każdorazowo należy uwzględniając koszty eksploatacyjne, koszty remontowe, koszty zagospodarowania odpadów.

Opracowywane ostatnio analizy oraz przygotowywane zapytania ofertowe wskazują na zainteresowanie pól suchą technologią oczyszczania wraz z węzłami SNCR i dozowaniem pylistego węgla aktywnego. Na rysunku 6 zaprezentowano przykładowy schemat technologiczny spalarni odpadów wraz z węzłem oczyszczania spalin.



Rys. 6. Oczyszczanie spalin ze spalarni odpadów; 1 – SNCR, 2 – palenisko, 3 – ruszt, 4 – komora dopalania, 5 – kocioł, 6 – elektrofiltr, 7 – zbiornik sorbentu, 8 – zbiornik adsorbentu, 9 – reaktor pneumatyczny (oczyszczanie spalin), 10 – filtr tkaninowy, 11 – komin

Stały rozwój pól suchych technologii oczyszczania spalin związany z powstawaniem nowych efektywnych reaktorów kompleksowo i efektywnie oczyszczających spaliny oraz rozwój technologii utylizacji odpadów i niski koszt inwestycyjny, stwarzają szansę na liczne aplikacje tej technologii w warunkach Polskiej gospodarki odpadami.

Dodatkowo aktualnie eksploatowana jedyna w Polsce spalarnia odpadów w Warszawie, zrealizowana została również w oparciu o półsuchą technologię oczyszczania spalin.

## **6. Podsumowanie i wnioski**

Zaprezentowano porównawczą analizę kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych omawianych technologii oczyszczania spalin. Na przykładzie półsuchej instalacji oczyszczania spalin wdrożonej w Elektrowni Skawina omówiono proces modelowania i optymalizacji kształtu reaktora pneumatycznego, odpowiedniego do zastosowań w półsuchych technologiach oczyszczania spalin ze spalarni odpadów, począwszy od badań laboratoryjnych poprzez półtechnikę, do wdrożenia i badań homologacyjnych na eksploatowanym obiekcie. Dodatkowo wskazano optymalną dla warunków polskiej gospodarki odpadami technologię oczyszczania spalin.

Na podstawie przeprowadzonych badań oraz analizy pracy dwóch uruchomionych instalacji z nowego typu reaktorem pneumatycznym stwierdzono, że badany reaktor może zastąpić dotychczas stosowany reaktor pneumatyczny gwarantując lepszy efekt odsiarczania.

Zastosowanie przebadanego rozwiązania pozwala na obniżenie kosztów inwestycyjnych reaktora do 40% oraz kosztów eksploatacyjnych w zakresie 10÷15%.

Uzyskane w trakcie eksploatacji IOS w Elektrowni Skawina wysokie skuteczności odsiarczania spalin na poziomie >98% wskazują na powstawanie w obrębie reaktora konturu wewnętrznej cyrkulacji.

Wskazaniem jest szczegółowe przebadanie wdrożonych w ostatnich miesiącach obiektów i walidacja dotychczasowych korelacji uzyskanych w wyniku badań laboratoryjnych oraz obliczeń CFD.

Opisany reaktor pneumatyczny, w stosunku do innych stosowanych w technice rozwiązań, charakteryzuje się dużym stopniem wykorzystania sorbentu co predysponuje go do zastosowań w technologiach oczyszczania spalin ze spalarni odpadów z uwagi na generowanie mniejszej ilości odpadów.

## **Literatura**

1. Mokrosz W., Odsiarczanie spalin w reaktorze pneumatycznym z recyrkulacją sorbentu. Weryfikacja modelu., Inż. Chem. Proc., 2004, 25, 1327
2. Fluent 6.3 documentation.