



Directions of improvements of modern electrostatic precipitators

Paweł TRACZ¹, Leszek BIAŁY¹, Krzysztof WACŁAWIAK²

¹Bilfinger Elwo Sp. z o.o. ul. Bielska 44, 43-200 Pszczyna

e-mail: Pawel.Tracz@elwo.com.pl, Leszek.Bialy@elwo.com.pl

²Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Materiałowej i Metalurgii, Instytut Technologii Metali
ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice e-mail: krzysztof.waclawiak@polsl.pl

Abstract

This article presents description of construction and operation of electrostatic precipitators. Some new trends of modernisation have been mentioned. Dry precipitators are the most commonly used and built. The most important factors influencing efficiency of flue gas cleaning are velocity of the gas, solid particles concentration and size distribution, electric resistivity of particles, and supply voltage. New trends in construction lead to better economics of construction and operation. This can be done by better design of precipitator structure facility, change of topology and layout of collection and wires electrodes, improving flue gas aerodynamics of ducts between electrodes and through inlets. Especially important aspects are activities focusing on reduction of mass of electrodes and rapping elements. Operation aspects describe automatic regulation of facility for supply voltage, periods of plate rapping. In some precipitators conditioning of flue gas is implemented, which results in better dust collecting efficiency.

Keywords: electrostatic precipitators, collection electrodes, implementation.

Streszczenie

Tendencje rozwojowe w konstrukcji współczesnych odpylaczy elektrostatycznych

W artykule opisano budowę i działanie odpylaczy elektrostatycznych. Zwrócono uwagę na kierunki rozwojowe konstrukcji elektrofiltrów. W sektorze energetycznym najszerze zastosowanie mają elektrofiltry suche. Najważniejszy wpływ na sprawność odpylania mają szybkość przepływu gazu, koncentracja pyłu w gazie, rezystywność pyłu oraz napięcie zasilania. Tendencje rozwojowe skupiają się na poprawie ekonomiczności konstrukcji i działania urządzenia. Dokonuje się tego poprzez poprawę zwartości konstrukcji, zmianę topologii i rozstawienia elektrod zbiorczych oraz ulotowych, poprawę aerodynamiki przepływu spalin przez elektrofiltr. Szczególnie ważne są działania mające na celu zmniejszenie masy elektrod zbiorczych i elementów układu strzepującego. Zagadnienia eksploatacyjne skupiają się na wprowadzaniu nowoczesnych systemów energetycznych oraz systemów aparatury kontrolno-pomiarowej. W niektórych urządzeniach wprowadza się kondycjonowanie spalin, aby poprawić skuteczność odpylania.

Słowa kluczowe: elektrofiltry, elektrody zbiorcze, zastosowanie.

1. Wstęp

Obecnie problem utrzymania czystości powietrza atmosferycznego w okręgach przemysłowych dotyczy wszystkich wysoko uprzemysłowionych krajów na świecie. Budowa trwałych, ekonomicznych i wysokosprawnych urządzeń odpylających jest problemem inwestycyjnym i dotyczy wszystkich gałęzi przemysłu. Przyjęcie Dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady nr 2010/75/EU z dn. 24 listopada 2010 r. w sprawie emisji przemysłowych [1], potocznie zwanej IED (zintegrowane zapobieganie zanieczyszczeniom i ich kontrola), jest tematem szczególnie istotnym dla polskich instalacji energetycznych. Wynikające z powyższego dokumentu zaostrzone standardy dopuszczalnej emisji poszczególnych rodzajów substancji, będą determinować sektor energetyczny do stosowania wysokosprawnych urządzeń odpylających, w tym elektrofiltrów. Od 2016 r. będą

obowiązywały nowe standardy koncentracji pyłów dla istniejących i nowych źródeł spalania paliw (tablice 1.1 i 1.2). Krajowy rynek energetyczny cechuje wysoki udział węgla kamiennego i brunatnego w pokryciu potrzeb energetycznych, co bez skutecznego systemu oczyszczania spalin prowadziłoby do wysokiej emisji pyłów do atmosfery. W przypadkach odpylania dużych ilości gazów, zawierających wysokie stężenia zanieczyszczeń z procesów technologicznych, spalania paliw o niskiej kaloryczności i dużej zawartości balastu, nie można uzyskać wymaganych, wysokich skuteczności odpylania w sposób bardziej ekonomiczny niż za pomocą elektrofiltrów. Warto nadmienić, że wąskie grono producentów tych urządzeń jest zmuszone do poszukiwania przewag konkurencyjnych poprzez optymalizację konstrukcji w/w urządzeń, przy zachowaniu ich walorów użytkowych. Ma to istotne znaczenie szczególnie podczas uczestnictwa w przetargach na kompleksowe wykonanie instalacji „pod klucz” (projekt–produkcja–montaż–serwis).

Tablica 1.1. Standardy emisji pyłów dla źródeł istniejących (na podstawie [2])

Nominalna moc cieplna źródła [MW]	PYŁY [mg/m^3_n]				
	Węgiel		Paliwo ciekłe		Gaz
	Do 31.12.2015r.	Po 31.12.2015r.	Do 31.12.2015r.	Po 31.12.2015r.	Do i po 31.12.2015r.
50-100	100	30	50	30	5
100-300	100	25	50	25	5
300-500	100	20	50	20	5
>500	50	20	50	20	5

Tablica 1.2. Standardy emisji pyłów dla źródeł nowych (na podstawie [2])

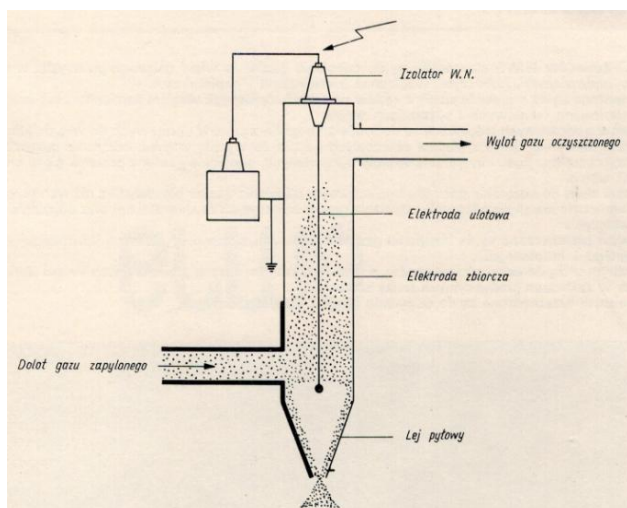
Nominalna moc cieplna źródła [MW]	PYŁY [mg/m^3_n]				
	Węgiel		Paliwo ciekłe		Gaz
	Do 31.12.2015r.	Po 31.12.2015r.	Do 31.12.2015r.	Po 31.12.2015r.	Do i po 31.12.2015r.
50-100	50	20	50	20	5
100-300	30	20	30	20	5
300-500	30	10	30	10	5
>500	50	10	30	10	5

Źródło istniejące – źródło spalania paliw, dla którego pozwolenie na budowę wydano przed dniem 7 stycznia 2013 r. lub wniosek o wydanie takiego pozwolenia został złożony przed tym dniem, i które zostało oddane do użytkowania nie później niż w dniu 7 stycznia 2014 r. Przez źródło istniejące rozumie się także źródło spalania paliw, dla którego przed dniem 1 lipca 1987 r. zamiast pierwszego pozwolenia na budowę wydano odpowiednik takiego pozwolenia [2].

Źródło nowe – źródło spalania paliw, dla którego pozwolenie na budowę wydano po dniu 6 stycznia 2013 r., lub które zostało oddane do użytkowania po dniu 7 stycznia 2014 r [2].

2. Zasada działania i główne cechy konstrukcyjne odpylaczy elektrostatycznych

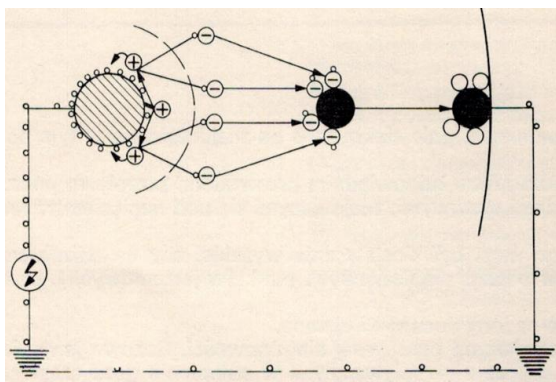
Elektrofiltr jest to urządzenie wykorzystujące zjawiska elektrostatyczne do odpylania gazów. Proces odpylania odbywa się w przestrzeni pomiędzy dwiema elektrodami, przez którą przepływa strumień odpylanego gazu. Zasada działania elektrofiltru oparta jest na wpływie jaki wywiera jednokierunkowe pole elektryczne na swobodne ładunki elektryczne [3-8]. Na rys. 2.1 pokazano schemat działania elektrofiltru.



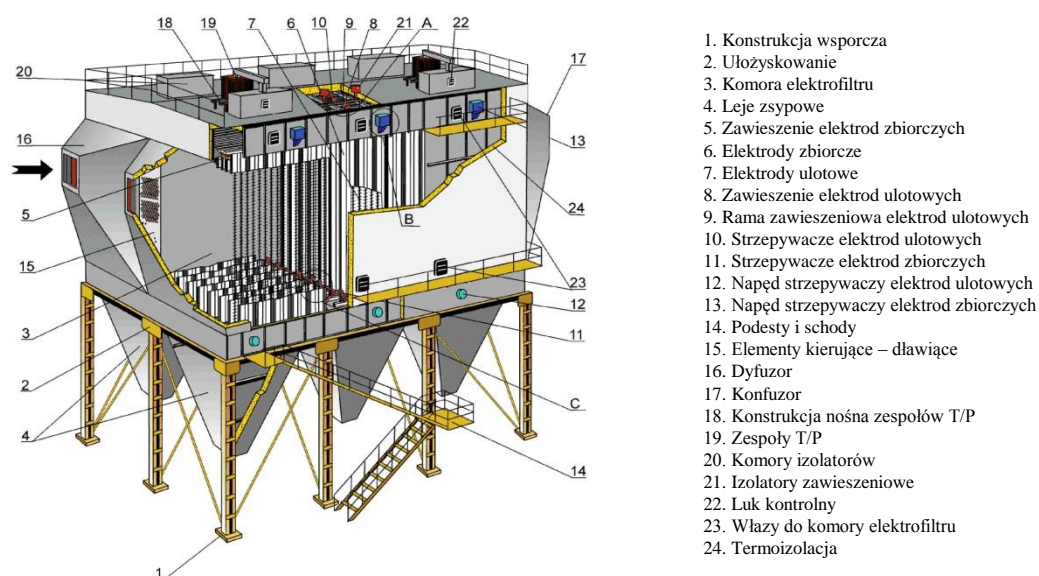
Rys. 2.1. Schemat działania elektrofiltru [8]

Zanieczyszczony pyłem lub rozpyloną cieczą gaz wprowadza się do komory między elektrodą ulotową, a elektrodą zbiorczą, wykonaną z blachy w postaci rury (elektrody rurowe), lub w postaci płyty (elektrody płytowe). Między uziemioną elektrodą zbiorczą a elektrodą ulotową, podłączoną do ujemnego bieguna źródła prądu wysokiego napięcia (do 100 kV), wytwarza się silne jednokierunkowe pole elektryczne. Po przekroczeniu krytycznej wartości napięcia (ok. 30 kV) przyłożonego na elektrody ulotowe, wokół ich powierzchni powstaje zjawisko ulotu będące źródłem elektronów – rys. 2.2. Elektrony te, poruszając się do elektrod przeciwnej biegunowości (elektrod zbiorczych), powodują jonizację gazu w przestrzeni międzyelektrodowej.

Jony gazowe z kolei zderzając się z napotkanymi cząstkami pyłu lub przez dyfuzję powodują ich ładowanie. Pod działaniem sił pola elektrycznego ujemnie naładowane cząstki przesuwały się w kierunku uziemionej elektrody zbiorczej. Po osiągnięciu powierzchni tej elektrody cząstki oddają pozyskany ładunek elektryczny i pozostają na niej do chwili, gdy bądź to wskutek działania siły ciężkości, bądź to w skutek strzepania zostaną stamtąd usunięte do zbiorczego zsypu umieszczonego w dolnej części filtru. Oczyszczony gaz uchodzi z komory. Na rys. 2.3 przedstawiono budowę typowego elektrofiltru [3-8].



Rys. 2.2. Zasada jonizacji i odpylania gazu [8]



1. Konstrukcja wsporcza
2. Ułożyskowanie
3. Komora elektrofiltru
4. Leje zsypane
5. Zawieszenie elektrod zbiorczych
6. Elektrody zbiorcze
7. Elektrody ulotowe
8. Zawieszenie elektrod ulotowych
9. Rama zawieszeniowa elektrod ulotowych
10. Strzepywacze elektrod ulotowych
11. Strzepywacze elektrod zbiorczych
12. Napęd strzepywaczy elektrod ulotowych
13. Napęd strzepywaczy elektrod zbiorczych
14. Podesty i schody
15. Elementy kierujące – dławiące
16. Dyfuzor
17. Konfuzor
18. Konstrukcja nośna zespołów T/P
19. Zespoły T/P
20. Komory izolatorów
21. Izolatory zawieszeniowe
22. Łuk kontrolny
23. Włazy do komory elektrofiltru
24. Termoizolacja

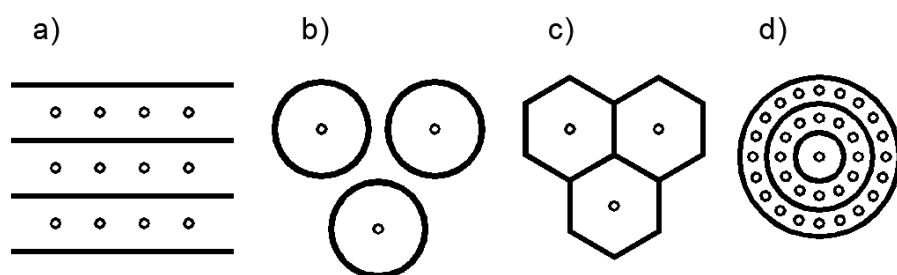
Rys. 2.3. Budowa typowego elektrofiltru poziomego [8]

Zasadniczymi częściami składowymi elektrofiltru są: obudowa (komora), wyposażenie komory, oraz elektryczny zespół zasilający.

Wyposażenie komory elektrofiltru zależy od jego typu. W elektrofiltrach typu suchego wyposażenie komory elektrofiltru stanowią: zespół elektrod ulotowych, zespół elektrod zbiorczych, zawieszenie elektrod, strzepywacze elektrod zbiorczych i ulotowych, oraz napęd strzepywaczy. W górnej części komory mieszczą się izolatory wysokiego napięcia, dolna część wyposażona jest w jeden lub kilka lejów zbiorczych wytrąconych zanieczyszczeń. Komora wykonana jest ze stali i posadowiona na konstrukcji wsporczej poprzez system łożysk, umożliwiających przemieszczanie (kompensację) po rozszerzeniu pod wpływem temperatury. W elektrofiltrach typu mokrego wyposażenie komory stanowią: zespół elektrod ulotowych, zespół elektrod zbiorczych, zawieszenie elektrod ulotowych, urządzenia nawilżające, urządzenia spłukujące.

Konstrukcja wielostrefowa elektrofiltru umożliwia wyposażenie poszczególnych stref odpylania w odrębne zespoły zasilające. Przy odrębnym zasilaniu poszczególnych stref odpylania, wysokość napięcia zasilającego można w kolejnych strefach lepiej dostosować do występujących w nich warunków gazowo-pyłowych i tym samym uzyskać wyższą skuteczność odpylania niż przy zasilaniu całego elektrofiltru z jednego źródła wysokiego napięcia. W rozwiązaniu konstrukcyjnym elektrofiltru możliwy jest podział elektryczny i mechaniczny strefy odpylania na dwie niezależne krótkie strefy (sekcjonizacja zasilania). Podział elektrofiltru na większą liczbę niezależnie zasilanych obszarów odpylania, bliżej odwzorowuje rzeczywistą wartość napięcia przebicia, co w konsekwencji pozwala na osiągnięcie większych skuteczności odpylania [8].

W zależności od wzajemnego usytuowania elektrod rozróżniamy następujące układy elektrod: płaski, współśrodkowy, rurowy lub plastrowy – rys. 2.4. Szerokie zastosowanie zyskał tzw. układ płaski (rys. 2.5-2.6), który może być stosowany przy zarówno poziomym jak i pionowym przepływie gazu przez komorę elektrofiltru, natomiast pozostałe układy stosowane są tylko w elektrofiltrach pionowych [3-8]. Najczęściej w sektorze energetycznym stosowane są elektrofiltry suche, poziome z płaskim układem elektrod – rys. 2.5-2.6.



Rys. 2.4. Układy elektrod w elektrofiltrze: a) płaski, b) rurowy, c) plastrowy, d) współśrodkowy [3]



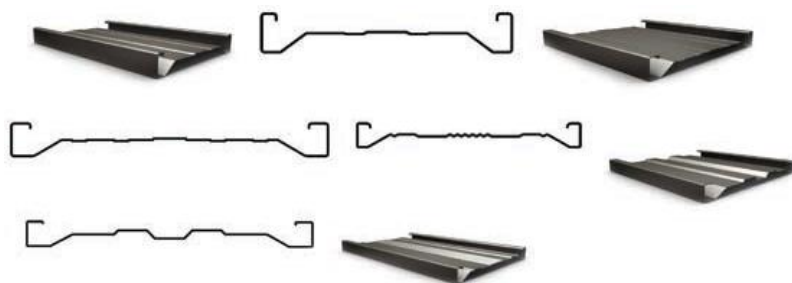
Rys. 2.5. Płaski układ elektrod (elektroda zbiorcza typu SIGMA i elektroda ulotowa ramowa taśmowa) [8]



Rys. 2.6. Płaski układ elektrod (elektroda zbiorcza typu SIGMA i elektroda ulotowa typ U) [8]

Elektrody zbiorcze

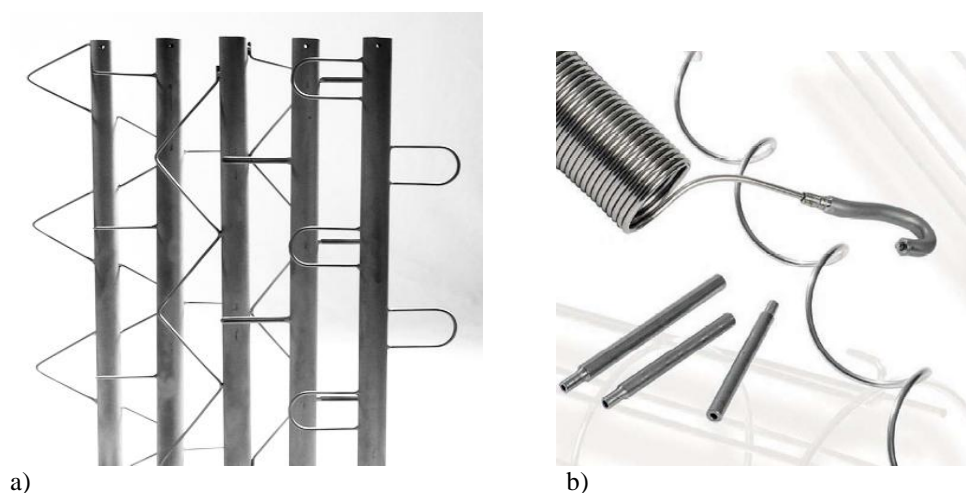
Elektrody zbiorcze obok elektrod ulotowych są najważniejszymi elementami elektrofiltru. Na rynku krajowym i zagranicznym dostępnych jest wiele odmian elektrod zbiorczych i ulotowych. Elektrody zbiorcze służą do zgromadzenia wytrąconego z aerozoli pyłu, a następnie drogą wzbudzenia w nich drgań, pył ten jest usuwany, wpada do lejów zbiorczych. Wzbudzenie drgań następuje przez uderzenie młotka przerzutowego osiowo w belkę wzbudzającą. Elektroda zbiorcza musi mieć wysoką zdolność zbiorczą osadzonego na niej pyłu w każdych warunkach ruchowych. Główni producenci urządzeń odpylających stosują profilowane elektrody zbiorcze typu Sigma – rys. 2.7. Taki kształt profilu elektrody osadczą łączy w sobie podstawowe zalety: dużą sztywność i sprężystość, zapewniające efektywne strzepywanie, korzystną charakterystykę dynamiczną, ograniczenie wtórnego pylenia, korzystne przestrzenie chwytne przeszkadzające w porywaniu już oddzielonego pyłu. Elektrody zbiorcze typu Sigma zawieszane są w górnej belce nośnej, gdzie mają ograniczoną możliwość skręcenia. Sztywno połączone z drągiem strzepującym za pomocą specjalnych łączników elektrody osadczcze typu Sigma, umożliwiają osiągnięcie podczas strzepywania przyspieszeń rzędu 100÷140 g. Skuteczność wyłapywania pyłów przez elektrody zbiorcze i łatwość ich oczyszczania z pyłu zależą nie tylko od kształtu elektrody, ale także od materiału z którego jest wykonana [3,8].



Rys. 2.7. Elektroda zbiorcza typu SIGMA [8]

Elektrody ulotowe

Odpowiednio dobrany rodzaj elektrody ulotowej ułatwia w znacznym stopniu powstanie zjawiska ulotu, a tym samym emisję wolnych elektronów. Przy rozwiązaniach konstrukcyjnych elektrod ulotowych uwzględnia się szczególnie wpływ temperatury, korozji oraz zmęczenia materiałowego wskutek strzepywania pyłów. Charakterystyka prądowo – napięciowa elektrofiltru zależy w głównej mierze od kształtu elektrod emitujących. Różnego typu elektrody charakteryzują się zupełnie różnym natężeniem prądu ulotu, a więc i gęstością prądu w polu elektrostatycznym dla identycznego napięcia zasilającego [8]. Najpopularniejszym rozwiązaniem, które występuje w krajowych i zagranicznych instalacjach jest konstrukcja elektrody ulotowej w postaci cienkościennej rury z przyspawanymi elementami emisyjnymi w postaci prętów o małej średnicy tzw. elektroda „gwoździowa”, nazywana w literaturze RDE – rys. 2.8. Na rynku występują ponadto elektrody ulotowe z elementami emisyjnymi w postaci drutu ukształtowanego w sprężynę, zamocowane w specjalnej konstrukcji ramowej – rys. 2.8.



Rys. 2.8. Różne typy elektrod ulotowych: elektroda ulotowa wykonana z cienkościennej rury z przyspawanymi elementami emisyjnymi w postaci prętów (a) oraz elektroda ulotowa sprężynowa (b) – produkcja EWES [8,10]

Warto zauważyć, że przed wprowadzeniem na rynek powyższego rozwiązania konstrukcyjnego powszechnie stosowane były elektrody ulotowe ostrzowe w postaci taśmy umiejscowionej w ramie napinającej (rys. 2.9). Z uwagi na problem pęknięcia taśmy ostrzowej, która zwisając stykała się z elektrodą zbiorczą, powodując zwarcie układu danej strefy, zastąpiono to rozwiązaniem znacznie prostszą konstrukcją. Elektrody ulotowe w postaci rury z elementami emisyjnymi pozwalają na stosunkowo łatwe kształtowanie charakterystyki prądowo – napięciowej poprzez zmianę rozstawu i kształtu elementów emisyjnych na rurze. Elektrody te cechują się dużą żywotnością i trwałością, wysokim poziomem gęstości prądu ulotu oraz korzystnymi właściwościami w przypadku pojawienia się zjawiska wtórnego ulotu.



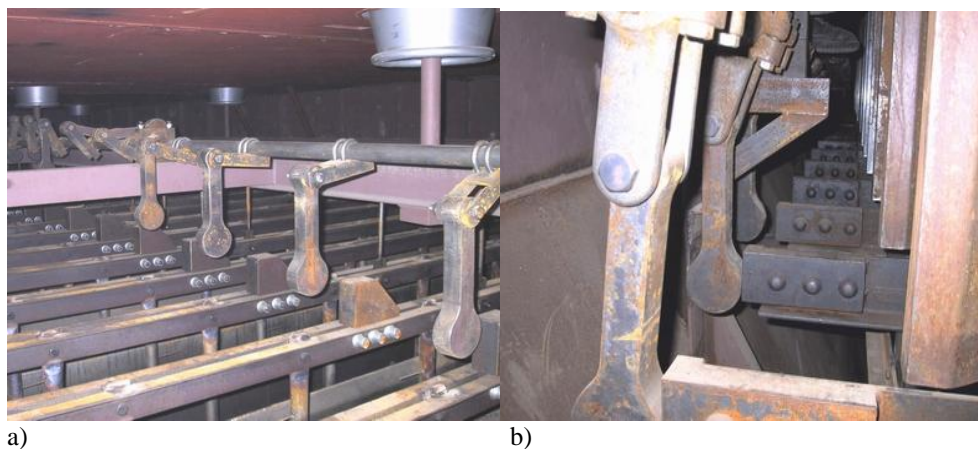
Rys. 2.9. Elektroda ulotowa w postaci taśmy kolczastej zamocowanej w ramie – efekt zrywania [8]

W elektrofiltrze wielopolowym stosowane są zwykle dwa lub nawet więcej typów elektrod emitujących. W pierwszej strefie stosuje się mniejszą podziałkę międzyelektrodową oraz elektrody wytwarzające znaczne gęstości prądu w komorze. W kolejnych strefach, wraz ze zmniejszeniem się ilości pyłu w komorze, stosuje się elektrody o małym spływie prądu i większej podziałce międzyelektrodowej. Odnotowano przypadki wyposażania elektrofiltrów w ten sam rodzaj elektrod emitujących bez zwracania uwagi na podziałkę międzyelektrodową i własności ośrodka pyłowo – gazowego [11].

Strzepywacze pyłu

Do usuwania osadzonego na elektrodach pyłu stosuje się strzepywacze mechaniczne (rys. 2.10) - układy młotków obrotowo – przerzutowych, zamocowanych na wałach napędowych. Układy napędowe strzepywaczy odznaczają się niskim zużyciem energii i umożliwiają dowolne zróżnicowanie cyklu strzepywania realizowanego za pomocą przekaźników czasowych. Dzięki temu cykl strzepywania elektrod można korzystnie zróżnicować na

poszczególne strefy odpylania w zależności od masy wytrącanego z nich pyłu. Zróżnicowany w poszczególnych strefach cykl strzeptywania zapewnia równomierną w czasie skuteczność odpylania gazów [3-9,11].



Rys. 2.10. Układ strzeptywaczy elektrod ulotowych (a) oraz zbiorczych (b) [8]

Przewody dolotowe i wylotowe

Przewody dolotowe w kształcie dyfuzorów wyposażone są w elementy kierująco-wyrównawcze złożone z szeregu łopatek oraz kierujących oraz perforowanych płyt wyrównawczych w celu zapewnienia równomiernego rozkładu prędkości przepływu zapyłonego gazu na wlocie do elektrofiltru. Jako elementy wyrównujące przepływ gazu występują sita jedno- lub wielorzędowe lub tzw. żaluzje z regulowaną wielkością okna. Przewody wylotowe w kształcie konfuzorów eliminują stosowanie progów zaporowych bądź innych elementów wyrównawczych przepływu na wlocie gazu z elektrofiltru. Współcześnie konstrukcja przewodów dolotowych i elementów kierująco-wyrównawczych projektowana jest na podstawie symulacji numerycznych.

3. Sprawność elektrofiltru

Stopień odpylania (sprawność) elektrofiltru, przy odpowiednim doborze typu oraz jego wymiarów osiąga - w zależności od rodzaju pyłu - wartość do 99,99%. Teoretyczną sprawność elektrofiltru można wyrazić wzorem:

$$\eta = 1 - e^{-k/v} \quad (1)$$

gdzie:

η – sprawność elektrofiltru; e – podstawa logarytmu naturalnego; v – prędkość przepływu gazu przez elektrofiltr, przyjmuje się od 0,2 do 4 m/s w zależności od szeregu czynników, a przede wszystkim od wielkości cząstek wytrącanego pyłu, typu elektrod zbiorczych oraz od żądanego stopnia odpylania; k – współczynnik uwzględniający parametry układu gazowo-pyłowego, warunki elektryczne panujące w elektrofiltrze oraz wymiary i konstrukcję danego elektrofiltru, m/s.

Praktycznie sprawność odpylacza można określić stosunkiem ilości wytrąconego pyłu w odpylaczu do ilości pyłu zawartego w gazie surowym, przechodzącym przez odpylacz [8].

Obliczenie sprawności odpylania można przeprowadzić przy pomocy jednego z następujących wzorów:

$$\eta = \frac{m}{m + g_2 \dot{V}_2} \quad (2)$$

$$\eta = \frac{m}{g_1 \dot{V}_1} \quad (3)$$

$$\eta = \frac{g_1 - g_2}{g_1}$$

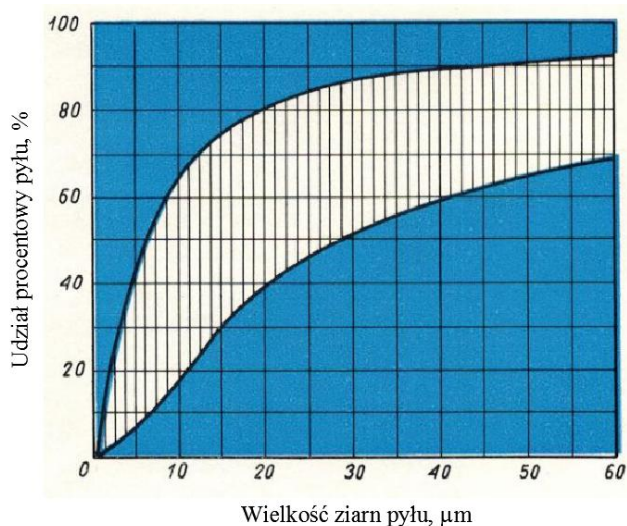
(4)

gdzie:

m – masa wytrąconego w odpylaczu pyłu w ciągu godziny, kg/h; $V_{1,2}$ – strumień gazu surowego (1) lub oczyszczonego (2), m³/h; $g_{1,2}$ – koncentracja pyłu w gazie surowym (1) lub oczyszczonym (2), kg/m³.

Koncentracja i skład frakcyjny pyłów

Jednym z podstawowych czynników wpływających na proces odpylania we wszystkich odpylaczach jest ziarnistość pyłu. Dobór odpowiedniego typu odpylacza przeprowadzany jest głównie w zależności od charakterystyki pyłu, który ma być strącony. Przy projektowaniu elektrofiltrów bierze się pod uwagę nie tylko stężenie pyłów w gazach, ale również z uwagi na selektywność elektrofiltru w zakresie odpylania najdrobniejszych frakcji pyłowych, ich skład frakcyjny i chemiczny. Typowy zakres spotykanych składów frakcyjnych pyłów z węgla kamiennego spalane go w kotłach pyłowych przedstawia rys. 3.1.



Rys. 3.1. Zakres spotykanych składów frakcyjnych pyłów z węgla kamiennego spalane go w kotłach pyłowych [8]

Prędkość przepływu

Sprawność elektrofiltru zależna jest od prędkości przepływu gazu przez elektrofiltr. Ze wzrostem ilości przepływającego przez elektrofiltr gazu sprawność jego zmniejsza się, natomiast, gdy ilość przepływającego gazu maleje sprawność elektrofiltru wzrasta. Stosowane w elektrofiltrach praktyczne prędkości przepływu wahają się w granicach od 0,4 do 2,5 m/s, zależnie od rodzaju układu gazowo-pyłowego i żądanej skuteczności odpylania. Dla różnych rodzajów spalin (z węgla kamiennego, węgla brunatnego, spalanie odpadów, hutnictwo) projektuje się różne prędkości przepływu spalin. Prędkość przepływu gazu musi być mniejsza od prędkości porywanego pyłu [13]. Istnieją dwa poglądy na modelowanie pola prędkości gazu w komorze elektrofiltru. Do lat 90-tych był rozpowszechniany pogląd, że rozkład gazu w przekroju poprzecznym komory powinien być maksymalnie wyrównany. Im jest on bardziej wyrównany, tym wyższą uzyskuje się skuteczność odpylania. W praktyce za równomierny uważa się taki przepływ, w którym różnice prędkości w poszczególnych punktach przekroju pola elektrycznego nie przekraczają 10÷20 %, przy spadku ciśnienia w elektrofiltrze 100÷300 Pa [13]. W latach 90-tych zapoczątkowano badania nad wpływem skośnego rozkładu prędkości gazu w komorze elektrofiltru na skuteczność odpylania. Na rynku krajowym badania takie realizowała m.in. Fabryka Elektrofiltrów Elwo S.A. Badania wykazały, że odpowiednio nierównomierne uformowane pole prędkości przepływającego gazu podwyższa skuteczność odpylania w stosunku do wyrównanych rozkładów prędkości gazu. Do chwili obecnej w/w zagadnienie jest przedmiotem badań teoretycznych i doświadczalnych wielu podmiotów z branży energetycznej, jak również jednostek naukowych dysponujących dedykowanymi systemami

komputerowymi do analiz numerycznych CFD (Computer Fluid Dynamics). Bazując na opiniach praktyków z tej dziedziny można wnioskować, że równomierny rozkład strumienia spalin w przekroju poprzecznym komory odpylacza jest na chwilę obecną częściej uwzględniany w założeniach projektowych [8]. W konsekwencji w większości instalacji krajowych stosuje się właśnie taki model przepływu spalin.

Oporność elektryczna

Oporność elektryczna pyłu wywiera duży wpływ na przebieg procesu odpylania w elektrofiltrze. Wysoka oporność elektryczna pyłu powoduje dławienie ulotu elektrody i wpływa bardzo niekorzystnie na gęstość prądu w elektrofiltrze, powodując ulot wsteczny i obniżenie skuteczności odpylania. Korzystny w procesie odpylania elektrostatycznego zakres oporności właściwej pyłu mieści się w granicach od 10^4 do 10^{11} Ω m. Pyły o niższej i wyższej oporności właściwej nastęrczają przy odpylaniu trudności [8].

Temperatura i wilgotność

Oporność elektryczna pyłu oraz wytrzymałość elektryczna gazu na przebicie zmieniają się w zależności od temperatury i wilgotności gazu. Informację tą bierze się pod uwagę przy budowie elektrofiltrów ze względu na rośnienie kwasów i przebieg procesu odpylania.

4. Podział elektrofiltrów i zastosowanie

Elektrofiltry w zależności od konstrukcji uwarunkowanej przeznaczeniem urządzenia można podzielić na siedem grup ze względu na [8]:

- **układ stref ładowania i zbierania:**
 - elektrofiltry z rozdzielonymi strefami ładowania i zbierania – stosowane do dokładnego oczyszczania powietrza;
 - elektrofiltry ze strefami ładowania i zbierania połączonymi we wspólnym polu elektrycznym – stosowane do oczyszczania spalin i gazów przemysłowych.
- **kierunek przepływu gazu w elektrofiltrze:**
 - elektrofiltry o pionowym przepływie gazu, tzw. elektrofiltry pionowe;
 - elektrofiltry o poziomym przepływie gazu, tzw. elektrofiltry poziome.
- **układ geometryczny pola elektrycznego:**
 - elektrofiltry z układem płaskim – elektrofiltry płytowe;
 - elektrofiltry z układem współśrodkowym – elektrofiltry rurowe i płastrowe.
- **ilość stref odpylania:**
 - elektrofiltry jednostrefowe;
 - elektrofiltry wielostrefowe.
- **ilość pól elektrycznych:**
 - elektrofiltry jednopolewe – w sekcji umieszczone jest jedno pole elektryczne;
 - elektrofiltry wielopolewe – w sekcji umieszczone są szeregowo dwa lub trzy niezależne pola elektryczne.
- **ilość sekcji:**
 - elektrofiltry jednosekcyjne – gaz oczyszczany jest w jednej strudze;
 - elektrofiltry wielosekcyjne – gaz oczyszczony jest w kilku strugach w oddzielnych częściach komory.

Elektrofiltry stosowane są do odpylania gazów w wielu gałęziach przemysłu:

- **Energetyka:**
 - odpylanie spalin z gazów z kotłów parowych i rusztowych opalanych węglem kamiennym i brunatnym, odpylanie gazów w instalacjach młynowych i suszarniach węgla.
- **Przemysł materiałów budowlanych**
 - odpylanie gazów pochodzących z suszarni i młynów surowca przy produkcji cementu, gipsu i innych materiałów budowlanych;
 - odpylanie spalin z młynów i suszarek węgla.
- **Przemysł hutniczy i gazownictwo**
 - odpylanie gazu wielkopiecowego;
 - odpylanie gazów piecowych z różnych procesów w hutnictwie żelaza i stali oraz hutnictwie metali nieżelaznych;

- odpylanie gazów z konwertorów i pieców odlewniczych;
- odpylanie odciągów.
- **Przemysł węglowy**
 - odpylanie gazów z instalacji młynowni, suszarek pracujących w przemyśle węgla kamiennego i brunatnego.
- **Przemysł chemiczny i papierniczy**
 - oczyszczanie gazów powstałych przy procesach produkcyjnych kwasu siarkowego;
 - odpylanie spalin z kotłów sodowych.

5. Aktualna sytuacja na rynku energetycznym i tendencje rozwojowe w budowie elektrofiltrów

Aspekty ekonomiczne

Obecnie głównymi aspektami decydującymi o wyborze dostawcy instalacji dla sektora energetycznego są: cena i możliwie szybki termin realizacji zlecenia, przy jednoczesnym zachowaniu walorów użytkowych dostarczanych urządzeń. Kryterium jakościowe jest sprawą drugorzędną. Taka sytuacja rynkowa wymusza na producentach urządzeń odpylających podjęcie działań w kierunku poszukiwania przewag konkurencyjnych i szeroko pojętej optymalizacji konstrukcji swoich produktów. Można zauważyć, że czasy monopolu w tej branży minęły, a szeroka grupa producentów urządzeń odpylających zaczyna poszukiwać sposobów na obniżenie kosztów całkowitego wytworzenia, co ma istotne znaczenie podczas przystępowania do przetargów na tzw. kompleksowe wykonawstwo "pod klucz", gdzie aktualnie decydują niewielkie punkty procentowe.

Do grona wiodących, światowych podmiotów zajmujących się projektowaniem i produkcją elektrofiltrów należą: Castlet Ltd., NML Inc., Hamon Group, GEA, Lodge Cottrell i FLSmidth.

Wśród krajowych podmiotów prym wiodą m.in. Rafako S.A., Bilfinger Elwo Sp. z o.o., Balcke-Dürr Sp. z o.o., Alstom Power Sp. z o.o. i Bipromet S.A. Nie wolno w tym miejscu zapomnieć o dynamicznie rozwijającym się rynku azjatyckim oraz o mniej znanych markach, które z coraz większym powodzeniem rywalizują z bardziej uznanymi graczami na rynku energetycznym.

Pomimo posiadania własnego know-how i w większości przypadków własnych wytwórni, w/w dostawcy coraz częściej posilają się kooperacją zewnętrzną w celu redukcji kosztu wytworzenia i spełnienia reżimów czasowych. Główne założenia jakościowe wynikające z norm branżowych z reguły są spełnione, ale coraz bardziej uwidacznia się tendencja zapewnienia „dostatecznego” poziomu jakości dostarczanych urządzeń, które nie powinny być zaprojektowane na wyrost. Elastyczność i umiejętność szybkiego dostosowania się i reagowania na potrzeby rynku stały się istotnymi elementami budowania przewag w odniesieniu do konkurencji. Warto również odnotować większe zainteresowanie w/w podmiotów usługami serwisowymi urządzeń odpylających, w tym elektrofiltrów, co pozwala tym podmiotom w pewnym zakresie monitorować rynek energetyczny.

Rozwój technologii w dziedzinie elektrofiltrów odbywa się w następujących kierunkach:

- optymalizacji konstrukcji (bardziej zwarta budowa);
- szerokości podziałki międzyelektrodowej;
- stabilizacji parametrów zapylnych gazów (kondycjonowanie);
- optymalizacji pracy (zmniejszenie poboru energii elektrycznej, przy jednoczesnym zmniejszeniu zużycia poszczególnych podzespołów).

Konstrukcja i technologia

Trudno poszukiwać możliwości redukcji masy całej konstrukcji elektrofiltru w jej elementach nośnych. W ostatnich latach można zauważyć, że wyposażenie komory elektrofiltru jest głównym obszarem „odchudzenia” konstrukcji. Producenci dokonują optymalizacji części mechanicznej, tj. konstrukcji elektrod zbiorczych i ulotowych, mechanizmów strzepywania, belek zawieszeniowych i drągów strzepujących. Na uwagę zasługuje fakt zastępowania określonych elementów konstrukcji, ogólnodostępnymi profilami hutniczymi, upraszczającymi finalną konstrukcję i jednocześnie eliminującymi kosztowne operacje wynikające z procesu technologicznego ich wykonania, np. spawania lub obróbki plastycznej. Dotyczy to głównie belek zawieszeniowych elektrod zbiorczych i ulotowych oraz drągów strzepujących. Taki zabieg w znaczny sposób obniża koszty wykonania i pozwala zredukować masę konstrukcji. Co więcej, coraz powszechniejsza staje się standaryzacja niektórych podzespołów konstrukcji elektrofiltru. Jako przykład można wymienić np. zastosowanie takiego samego rodzaju włazu w całym odpylaczu. Najnowszym trendem optymalizacji konstrukcji elektrofiltru jest zmiana grubości taśmy zimnowalcowanej stosowanej na elektrody zbiorcze.

Do 2000 r. do wyrobu elektrod zbiorczych powszechnie stosowano taśmy zimnowalcowane o grubości 1,5 mm, ze stali o znacznie wyższych własnościach mechanicznych niż to ma miejsce aktualnie. Obecnie standardem jest stosowanie elektrod zbiorczych o grubości 1,25, a nawet 1,2 mm i długości do 16 m. Przedział szerokości stosowanych elektrod zbiorczych typu Sigma waha się od 420 do 850 mm z tendencją do stosowania szerokich elektrod. Pozwala to zredukować koszty materiałowe i koszty wytworzenia. Determinuje to producentów elektrofiltrów do zmiany cech konstrukcyjnych całego układu strzepującego, w tym doboru prawidłowej masy młotków strzepywaczy wzbudzających drgania, sprawdzenia średnich wartości przyspieszeń układu elektrod typu Sigma oraz wyznaczenia pasma częstotliwości tych drgań [12]. Niejednokrotnie w praktyce producenci zmieniają w omawianym węzle konstrukcyjnym tylko grubość elektrody. Wiąże się to z dużym ryzykiem uzyskania niewystarczających wartości przyspieszeń drgań profilu oraz nierównomiernym ich rozkładem na całej powierzchni elektrody. Parametr ten decyduje o właściwym oczyszczaniu powierzchni osadczą elektrody na całej jej długości.

W założeniach projektowych do obecnie projektowanych elektrofiltrów do odpylania gazów odlotowych z kotłów opalanych węglem kamiennym, rozpatrywana jest podziałka międzyelektrodowa 400÷500 mm [8]. Trudno jednoznacznie stwierdzić czy w niedalekiej przyszłości wartość ta wzrośnie. Dobór optymalnej podziałki międzyelektrodowej jest na chwilę obecną zagadnieniem otwartym. Wraz ze wzrostem podziałki międzyelektrodowej wzrastają tolerancje wykonania elektrofiltrów, co jest niewątpliwie zaletą tego zabiegu (mniejsze ryzyko wystąpienia tzw. przebić). Ponadto, zwiększony zakres podziałki międzyelektrodowej wpływa korzystnie na skuteczność odpylania, natomiast należy zaznaczyć, że wymaga stosowania wysokich napięć [9,11,13]. Dla zakresu 400÷500 mm wynosi on odpowiednio 106 i 125 kV.

Kondycjonowanie spalin

Układy kondycjonowania spalin mają na celu podwyższenie skuteczności odpylania poprzez zmianę rezystywności wytrączanych z gazu cząstek pyłu. Najczęściej stosowanym rozwiązaniem technicznym kondycjonowania spalin jest wdmuchiwanie gazowego SO_3 do kanałów spalin za podgrzewaczem powietrza. W zależności od wielkości instalacji i dostępności surowców stosuje się materiał wyjściowy w postaci płynnej siarki, bądź dla małych obiektów w postaci ciekłego SO_2 . W obu przypadkach instalacje charakteryzują się zwartą budową, mieszczą się w kontenerze o długości 5÷6 m (rys. 5.1), pełną automatyzacją ruchu i odstawiania oraz samoczynną regulacją wydajności. Najczęściej stosuje się surowiec w postaci płynnej siarki. Według literatury [14] przy dawce SO_3 20–30 ppm możliwa jest redukcja emisji pyłu w zakresie 60÷90%. Na rys. 5.2 pokazano schemat instalacji kondycjonowania spalin na płynną siarkę.

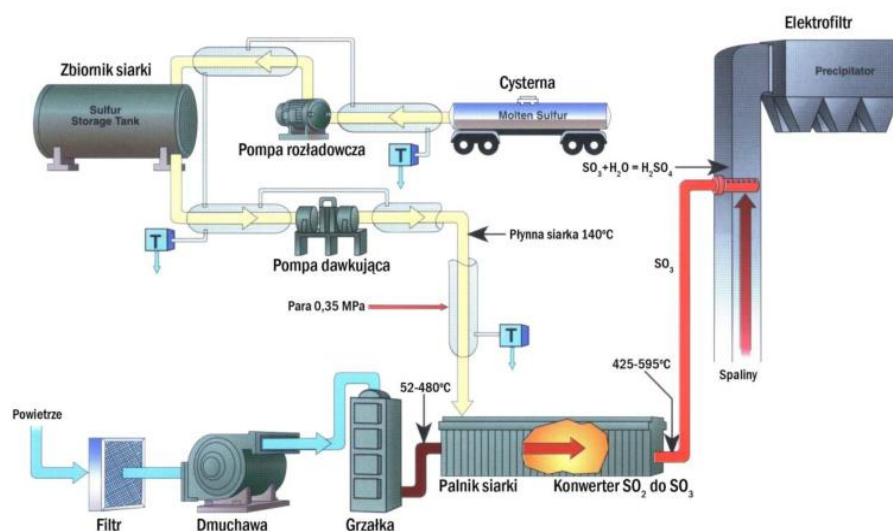


Rys. 5.1. Kontener z instalacją kondycjonowania spalin [14]

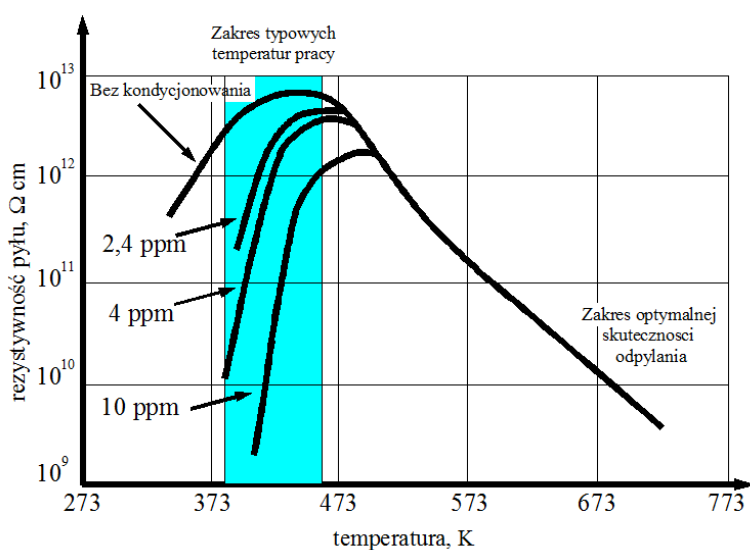
Wielkość dawki SO_3 , koniecznej do uzyskania odpowiedniej rezystywności właściwej pyłu zależy od zawartości siarki w węglu, temperatury spalin, stężenia pyłu w spalinach oraz jego składu chemicznego [13-14]. Maksimum

oporności dużej liczby pyłów, w tym emitowanych z elektrowni (rys. 5.3), występuje w przedziale temperatur $120\text{--}180^{\circ}\text{C}$.

Wzrost stężenia SO_3 w spalinach powoduje obniżenie oraz przesunięcie do wyższych temperatur przedziału występowania maksymalnych rezystywności pyłu. Im jest wyższa temperatura gazów odlotowych wprowadzanych do urządzenia, tym musi być wyższe stężenie SO_3 [14]. Zaletą instalacji kondycjonowania spalin jest jej mobilność. Koszty przeniesienia instalacji nie są wysokie. Kondycjonowanie wymaga natomiast szczególnej dbałości o szczelność elektrofiltru. W przypadku modernizacji starszych obiektów energetycznych omawiana metoda ma ograniczone zastosowanie. Inwestorzy chętniej dokonują w takim przypadku kompleksowej przebudowy elektrofiltru. Niewątpliwie koszty zakupu i eksploatacji instalacji mogą stanowić problem, natomiast może okazać się ona niezbędna w przypadku oddania do eksploatacji nowego elektrofiltru, który wykazuje niedostateczną skuteczność wychwycenia wysokorezystywnego pyłu.



Rys. 5.2. Schemat instalacji kondycjonowania spalin na płynną siarkę [14]



Rys. 5.3. Wpływ kondycjonowania gazów odlotowych SO_3 na rezystywność popiołu lotnego [13]

Układy zasilania, sterowania i monitorowania pracą elektrofiltrów

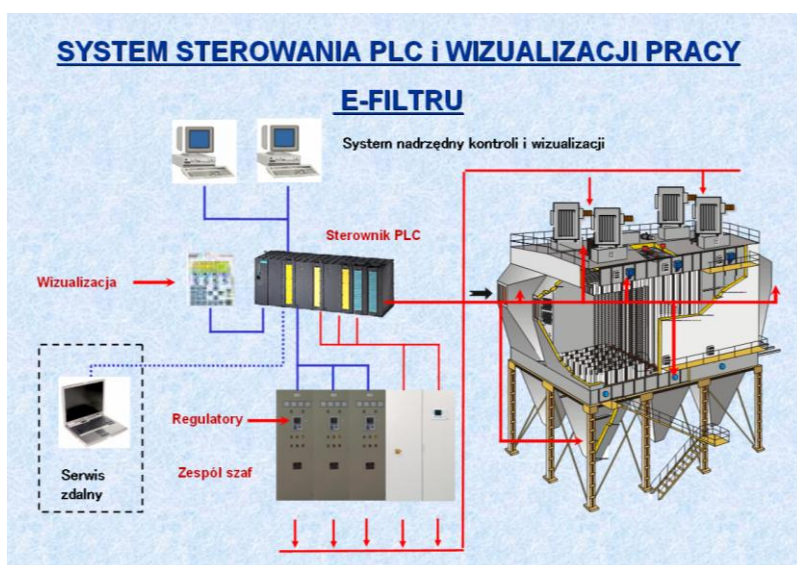
Obecnie kontrola i sterowanie pracą elektrofiltrów stają się głównym kierunkiem ich rozwoju. W porównaniu do aspektów konstrukcyjnych i technologicznych przedstawionych powyżej, ten obszar jest na chwilę obecną najbardziej rozwojowy. Zastosowanie nowoczesnych systemów komputerowych pozwala w pełni automatyzować proces oczyszczania spalin oraz sterować i kontrolować wszystkie węzły odpylacza.

Do głównych funkcji stosowanych systemów należą [15]:

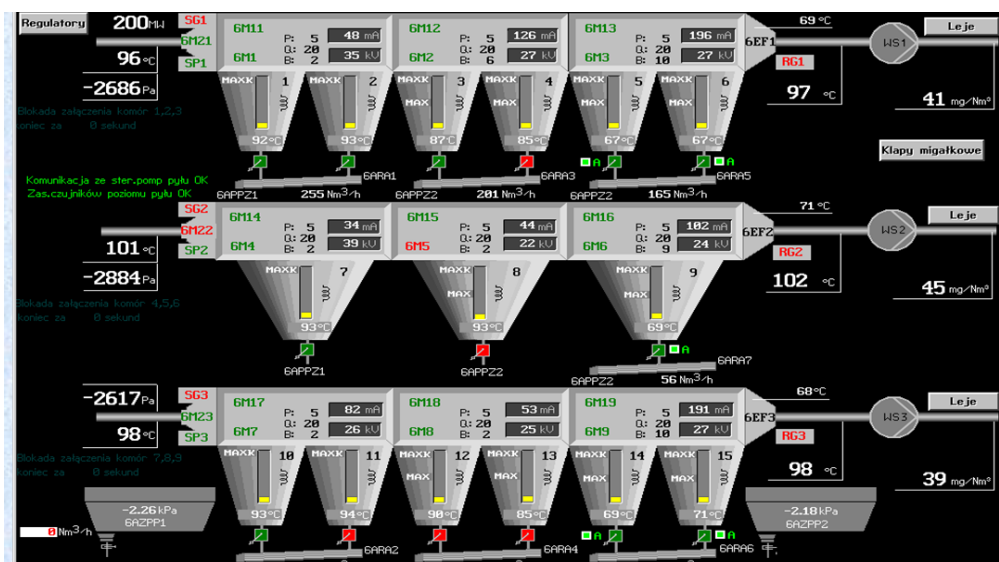
- ogólny monitoring pracy elektrofiltru;
- archiwizacja danych;
- szczegółowy monitoring pracy elektrofiltru:
 - wykresy charakterystyk i wybranych przebiegów elektrofiltru;
 - wykresy zmian wskazań pyłomierzy;
 - wizualizacja pomiarów temperatury na wlocie i wylocie elektrofiltru;
 - wizualizacja wskazań pyłomierza;
 - równoczesna wizualizacja napięć i prądów elektrofiltru;
 - wizualizacja wartości nastaw i zdalne ich dobieranie dla poszczególnych regulatorów;
- sterowanie pracą napędów strzeptywaczy;
- kontrola pracy napędów strzeptywaczy (optymalizacja cykli strzeptywania elektrod w poszczególnych sekcjach);
- zdalne nastawianie napędów strzeptywaczy;
- zdalne załączanie/wyłączanie zespołów zasilających;
- zasilanie elektrofiltrów umożliwiające zmniejszenie zużycia energii (w oparciu o pomiary z pyłomierzy);
- sygnalizacja awarii i awaryjne wyłączenie z nastawni blokowej układów zasilania i strzeptywania.

Aktualnie w elektrofiltrach stosowane są zespoły zasilające: 2 fazowe i 3 fazowe z transformatorem (energetyka zawodowa), 3 fazowe przetwornikowe (elektrofiltry wielozadaniowe), pulsacyjne (dla pyłów wysokorezystywnych). Na rys. 5.4 pokazano ideę systemu sterowania i wizualizacji pracy elektrofiltru [8].

Wiodącymi dostawcami technologii sterowania dla energetyki są: ABB, GE, Siemens. Należy podkreślić, że oprócz w/w firm, na rynku obecnych jest ok. 20 innych dostawców. Branżę tą cechuje wysoka innowacyjność i tempo postępu technologicznego, co przekłada się na coraz większą wydajność systemów sterowania dostarczanych dla sektora energetycznego.



a)



b)

Rys. 5.4. Przykładowy schemat systemu sterowania PLC i wizualizacji pracy elektrofiltru (a), oraz maska wizualizacyjna pracy elektrofiltru (b) [8]

6. Podsumowanie

Zasada działania odpylaczy elektrostatycznych nie zmieniła się od dziesięcioleci, lecz ich konstrukcja rozwija się w kierunku obniżenia masy, gabarytów przy jednoczesnej poprawie skuteczności odpylania. Elektrofiltry należą do najefektywniejszych odpylaczy stosowanych w przemyśle. Współcześnie prace konstrukcyjne skupiają się na uzyskaniu podobnych lub lepszych efektywności odpylania jednak przy mniejszej energochłonności eksploatacji. Zabiegi „odchudzania” konstrukcji skutkują mniejszą energochłonnością strzepywania pyłu. Stosuje się również automatyczne sterowanie parametrami elektrycznymi odpylacza stosownie do obciążenia urządzenia strumieniem zapyłonego gazu. Znane są również zabiegi wpływania na skład zapyłonego gazu, tzw. kondycjonowanie, zwiększające oporność właściwą pyłu w warunkach działania elektrofiltru i poprawiające skuteczność odpylania.

Literatura

1. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady nr 2010/75/EU z dn. 24 listopada 2010 r. w sprawie emisji przemysłowych (zintegrowane zapobieganie zanieczyszczeniom i ich kontrola – IED).
 2. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 4 listopada 2014 r. w sprawie standardów emisyjnych dla niektórych rodzajów instalacji, źródeł spalania paliw oraz urządzeń spalania lub współspalania odpadów, Dz. U. z 2014r. poz. 1546.
 3. Juda J., Nowicki M.: Urządzenia odpylające. PWN, Warszawa 1986.
 4. Warych J.: Oczyszczanie gazów. Procesy i aparatura. WNT, Warszawa 1994.
 5. Lutyński J.: Elektrostatyczne odpylanie gazów. WNT, Warszawa 1998.
 6. Parker K.R.: Applied Electrostatic Precipitation. Blackie Academic Professional, London 1997.
 7. Mazur M., Teisseyre M.: Podstawy teorii i konstrukcji urządzeń odpylających. Odpylacze cyklonowe i elektrostatyczne. Politechnika Wrocławska, Wrocław 1977.
 8. Materiały Fabryki Elektrofiltrów ELWO S.A. Folder reklamowy „Elektrofiltry” (niepublikowane).
 9. Szwed H.: Konstrukcyjne rozwiązania elektrofiltrów, a ich skuteczność działania. Materiały III Konferencji Naukowo – Technicznej „Eksploatacja elektrofiltrów w energetyce”. Kraków 1992
 10. Katalog reklamowy firmy EWES Stalfjader AB – Szwecja.
 11. Jędrusik M., Świerczok A.: Elektrofiltry odpylające spaliny z kotłów rusztowych. Dobór konstrukcji elektrody ulotowej. Technologie w energetyce 2/2012.
 12. Nowak A.: Optymalizacja parametrów geometrycznych bijaka oraz analiza przyśpieszeń elektrod zbiorczych elektrofiltru. Politechnika Łódzka Filia w Bielsku – Białej, 2002.
 13. Janka R.M.: Czynniki wpływające na skuteczność odpylania gazu oraz tendencje występujące w budowie elektrofiltrów. Ochrona powietrza i problemy odpadów 2003.
 14. Kondycjonowanie spalin jako alternatywa dla budowy nowego elektrofiltru – dotychczasowe doświadczenia i perspektywy. Materiały firmy Pentol–Enviro Polska Sp. z o.o., 2012.
 15. ww.ien.gda.pl, Instytut Energetyki, Oddział Gdańsk.
-