

PAWELSKI Jan

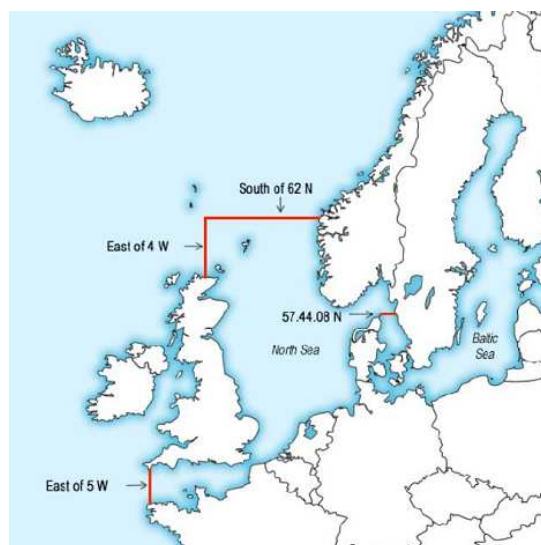
METODY REDUKCJI EMISJI TLENKÓW SIARKI STOSOWANE NA STATKACH W CELU SPEŁNIENIA PRZYSZŁYCH WYMAGAŃ ANEKSU VI KONWENCJI MARPOL, WCHODZĄCYCH W ŻYCIE 1 STYCZNIA 2015 ROKU

Streszczenie

W artykule przedstawiono różne metody redukcji emisji tlenków siarki, stosowane na statkach, w celu spełnienia obecnych i przyszłych wymagań aneksu VI konwencji MARPOL odnośnie limitów emisji tlenków siarki do atmosfery. Dużo uwagi poświęcono dostosowaniu się do bardzo ścisłych limitów obowiązujących w strefach ograniczenia emisji na morzu. Opisane są zalety i niedostatki przytoczonych metod.

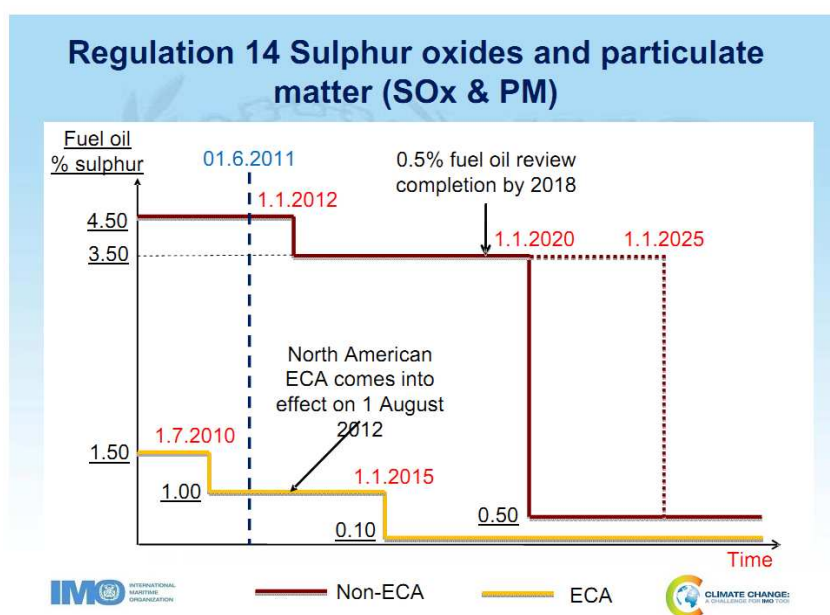
WSTĘP

Wody europejskie objęte są obszarem ograniczenia emisji tlenków siarki (SO_x) znanym jako ECA (Emission Control Area) i wprowadzonym przez załącznik VI konwencji MARPOL (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships). Na poniższym rysunku przedstawione są granice ECA dla wód europejskich:



Rys. 1. Obszar ograniczenia emisji tlenków siarki dla wód europejskich
Źródło: [2]

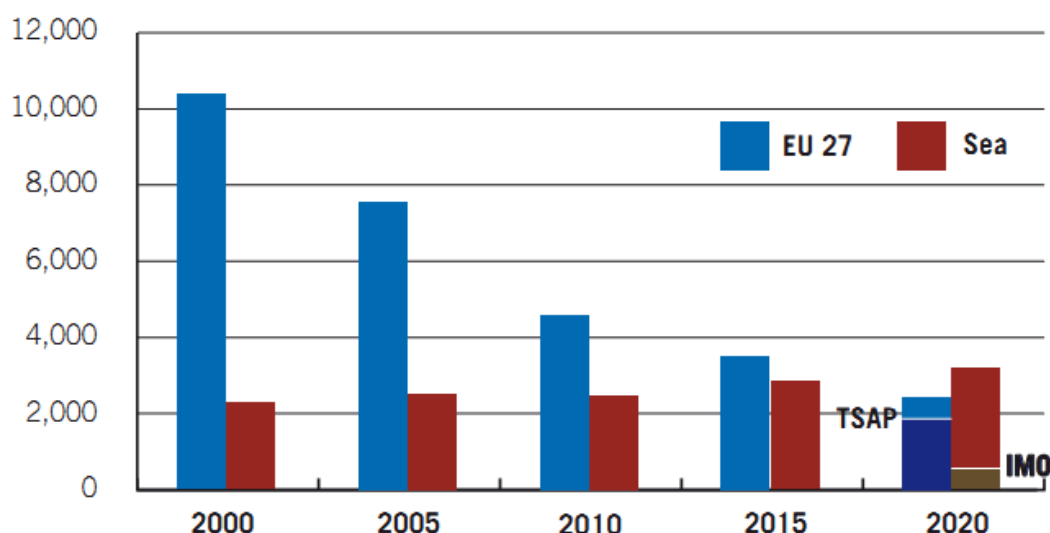
Na mocy konwencji MARPOL wprowadzono ograniczenia maksymalnej zawartości siarki (wagowo) w paliwie żeglutowym dla globalnych obszarów morskich oraz stref ograniczenia emisji zgodnie z podanym na rysunku poniżej harmonogramem:



Rys. 2. Terminy wprowadzania ograniczeń emisji SOx na akwenach globalnych oraz morskich obszarach ograniczenia emisji.

Źródło: [5]

Dzięki podjętym w porę działaniom uniknięto spełnienia się scenariusza, w którym ilość SOx generowana przez europejską żeglugę miałyby przekroczyć w 2020 roku poziom tlenków siarki uwalnianych do atmosfery ze źródeł lądowych.. Jedną z prognoz wzrostu emisji SOx przedstawia poniższy wykres:



Rys. 3. Przewidywana emisja SOx w tysiącach ton z podziałem na źródła lądowe i żeglugę, bez uwzględnienia ograniczeń nałożonych na statki.

Źródło: [4]

Ponieważ aneks VI konwencji MARPOL ma na celu ograniczenie zanieczyszczenia powietrza, dlatego oprócz zakazu stosowania paliw o dużej zawartości siarki dopuszcza

również inne sposoby ograniczania emisji SO_x do atmosfery, które dają porównywalne rezultaty. Obecnie stosowane są w praktyce następujące metody:

- paliwa o niskiej zawartości siarki,
 - olej gazowy lub napędowy o zawartości siarki 0,1 % lub poniżej,
 - skroplony gaz ziemny (LNG),
- systemy płukania gazów spalinowych,
 - płuczki mokre o obiegu otwartym (użycie ograniczone przepisami lokalnymi),
 - płuczki mokre o obiegu zamkniętym,
 - płuczki hybrydowe,
 - płuczki suche,

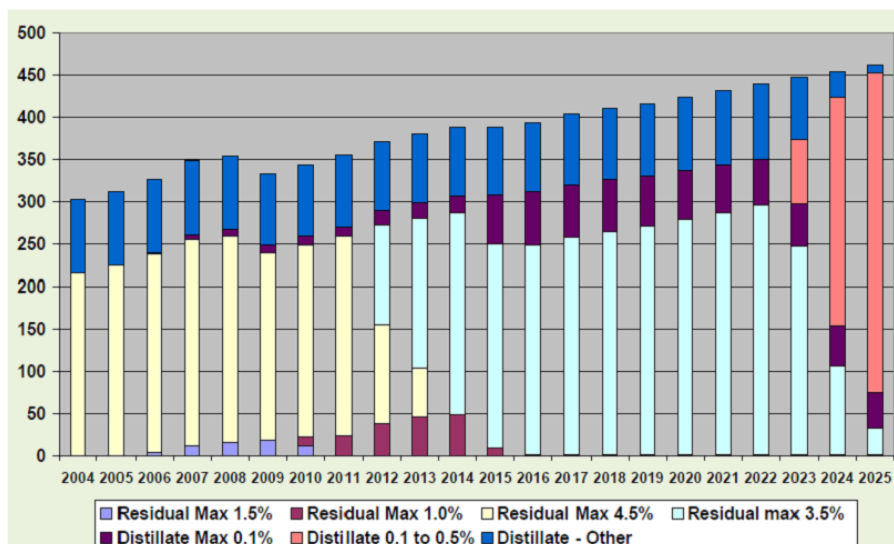
Każda z wymienionych powyżej metod będzie posiadała swoje zalety ale również będzie obciążona szeregiem niedogodności.

1. PALIWA O NISKIEJ ZAWARTOŚCI SIARKI

Najbardziej bezpośrednim sposobem spełnienia przyszłych wymogów aneksu VI konwencji MARPOL jest zastąpienie obecnie używanych paliw żeglugowych przez takie, w których zawartość siarki nie będzie większa niż 0,1 % wagowo. Tak niska zawartość siarki praktycznie eliminuje z użytku paliwa ciężkie. Obecnie stosowane procesy technologiczne nie pozwalają na dokładne usuwanie siarki z ciężkich frakcji. Z tradycyjnych paliw płynnych do dyspozycji pozostanie ciężki olej gazowy, popularnie określany jako MGO (Marine Gas Oil), który jest też produkowany w wersji o zawartości siarki 0,1 % jako LSMGO (Low Sulphur Marine Gas Oil). Innym paliwem, które powoli znajduje coraz większe zastosowanie w żegludze jest skroplony gaz ziemny najczęściej określany jako LNG (Liquified Natural Gas).

1.1. Ciężki olej gazowy o małej zawartości siarki (LSMGO)

Dyrektywa Unii Europejskiej 2005/33/EC dotycząca paliw żeglugowych zabrania sprzedaży na rynkach unijnych MGO o zawartości siarki powyżej 0,1 % oraz wprowadza ograniczenia dotyczące maksymalnej zawartości siarki w paliwach żeglugowych zgodne z aneksem VI konwencji MARPOL [9]. Zastosowanie LSMGO jako paliwa nie powoduje większych zmian w konstrukcji systemów paliwowych, ale pewne modyfikacje mogą być konieczne. Towarzystwa klasyfikacyjne już od pewnego czasu zwracają uwagę na potencjalne problemy związane z przejściem na paliwo o niskiej zawartości siarki. Nowy rodzaj paliwa może wymagać instalacji dodatkowych, dedykowanych zbiorników paliwowych. Istniejące pompy paliwowe, które były przeznaczone dla cieczy o większych gęstościach mogą wymagać wymiany na inny typ. Lekkie paliwo może ulec odparowaniu w podgrzewanej instalacji paliwowej i tworzyć gazowe zatopy. Niska lepkość oraz gorsze właściwości smarne LSMGO będą sprzyjały szybszemu zużyciu elementów smarowanych paliwem. Oleje silnikowe stosowane na statkach mają dobraną całkowitą liczbę zasadową do zawartości siarki w paliwie. Optymalną ochronę silnika można tylko zapewnić stosując olej dostosowany do stopnia zaszarczenia paliwa.[1]. Wzmożony popyt na ten rodzaj paliwa (na wykresie poniżej określonego jako „Distillate Max 0.1%”) spowoduje nieuchronny wzrost jego ceny, która obecnie jest już znacznie wyższa od paliwa powszechnie stosowanego w żegludze. Prognozy wzrostu popytu na LSMGO przewidują gwałtowny jego wzrost w 2015 roku, jak na rysunku poniżej:



Rys. 4. Prognozowany popytu na paliwa płynne.

Źródło: [8]

Fińskie ministerstwo transportu i komunikacji przeprowadziło analizę wpływu prognozowanego wzrostu cen paliwa na codzienne koszty eksploatacyjne statku do przewozu kontenerów, której wyniki podane są poniżej:

Tab. 1. Wpływ minimalnych i maksymalnych szacunków wzrostu cen paliw na codzienne koszty statku kontenerowego, koszty podane w euro [8]

Vessel type	Fuel costs € per travel day	Percentage increase	Vessel costs € per travel day	Percentage increase
Container vessels	24,200		36,000	
- Heavy fuel oil 1%	25,900-29,400	7 - 22 %	37,700-41,200	5 - 15 %
- Heavy fuel oil 0.5 %	27,200-31,200	12 - 29 %	39,000-43,000	8 - 20 %
- Light fuel oil 0.1 %	41,900-44,600	73 - 84 %	53,700-56,400	49 - 57 %
Container feeder vessels	15,081		23,184	
- Heavy fuel oil 1%	16,100-18,400	7 - 22 %	24,200-26,500	5 - 14 %
- Heavy fuel oil 0.5 %	17,000-19,500	12 - 29 %	25,100-27,600	8 - 19 %
- Light fuel oil 0.1 %	26,100-27,800	73 - 84 %	34,200-35,900	48 - 55 %

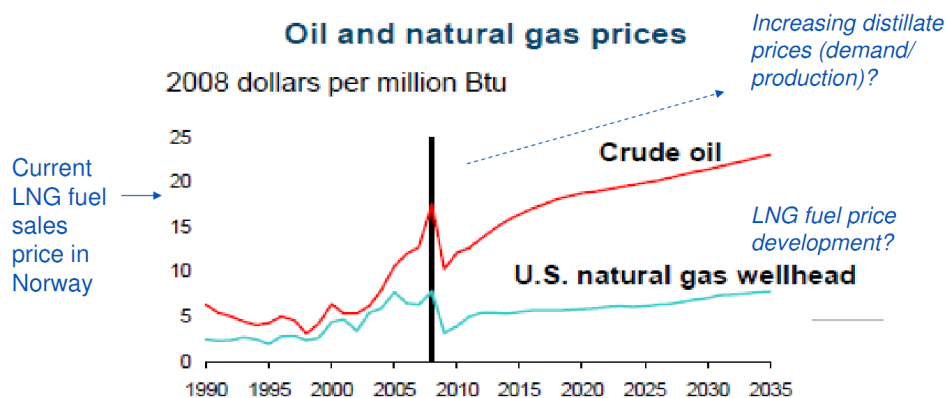
Z powyższej analizy wynika, że dla odcinka podróży wewnątrz obszaru ograniczenia emisji codzienne koszty statku rosną o ponad 50 % z powodu przewidywanych znacznych wzrostów cen paliwa o zawartości siarki do 0,1 %.

1.2. Skroplony gaz ziemny (LNG)

Gaz ziemny już od dawna był wykorzystywany na morskich instalacjach wydobywających ropę i gaz do zasilania silników spalinowych i turbin gazowych. Przemysł żeglowski nie był zainteresowany gazem jako paliwem do momentu rozpoczęcia masowych przewozów LNG drogą morską. Zostały opracowane technologie budowy zbiorników do transportu skroplonego gazu a część przewożonego ładunku używano do napędu gazowców.

Wzrost cen ropy naftowej i tradycyjnych paliw płynnych zwrócił uwagę armatorów na paliwo gazowe, którego ceny pozostawały stabilne i niskie. Długoterminowe prognozy amerykańskiej organizacji rządowej EIA (Energy Information Administration) wskazują na długofalowy wzrost cen ropy naftowej przy stabilnych cenach gazu ziemnego. Opublikowana przez EIA prognoza przedstawia cenę miliona Btu (British thermal units, 1 British thermal unit \approx 1055 Jouli) dla ropy i gazu do 2035 roku, wyrażona w dolarach amerykańskich. Graficzne przedstawienie prognozy pokazane jest na poniższym rysunku:

Growing predicted price disparity oil /gas



Rys. 5. Rosnąca rozbieżność cen energii dla ropy naftowej i gazu ziemnego.
Źródło: [4]

Dodatkowym impulsem do wzrostu zainteresowania gazem jako paliwem żegludowym jest ograniczenie emisji szkodliwych związków do atmosfery. Unijne normy przewidują maksymalną zawartość siarki w ziemnym gazie do 30 mg/m^3 . Uwzględniając średnią gęstość gazu ziemnego uzyskuje się wynik 39 mg/kg co stanowi niecałe 40% limitu określonego konwencją MARPOL. Spalanie gazu ziemnego przynosi dodatkowe korzyści dla środowiska w postaci redukcji emisji szkodliwych substancji do atmosfery. Do takich korzyści należą [8]:

- 20 – 30 % zmniejszony poziom emisji CO₂,
- 75 – 89 % redukcja tlenków azotu (testy na rzeczywistych silnikach),
- minimalny poziom emitowanych cząstek stałych.

Zastosowanie LNG jako paliwa niesie za sobą konieczność przystosowania statku oraz silnika i instalacji paliwowej do spełnienia określonych wymagań technicznych oraz bezpieczeństwa. Zbiorniki paliwowe najczęściej są wykonywane jako zbiorniki ciśnieniowe, które nie wymagają wtórnej bariery. Ten typ zbiorników niezbyt dobrze wykorzystuje przestrzeń w kadłubie, która jest dostępna dla pomieszczenia paliwa. Problem ten można często rozwiązać umieszczając zbiorniki na pokładzie, co często jest stosowane przy zakładaniu instalacji gazowej na istniejącym już statku. Zbiorniki należy zaopatrzyć w skuteczny system odprowadzania ewentualnych przecieków płynnego gazu, ponieważ stal używana do konstrukcji kadłubów pęka w zetknięciu z cieczą o temperaturze $-163 \text{ }^\circ\text{C}$. Bunkrowanie ciekłego paliwa gazowego nie nastęrcza większych problemów, ale załoga musi być przeszkolona w zakresie obchodzenia się z cieczą kriogeniczną. Instalacja doprowadzająca gaz do silnika powinna posiadać podwójne ścianki z pustą przestrzenią wypełnioną gazem obojętnym lub czystym, suchym powietrzem oraz zdalnie sterowany zawór odcinający. Pomieszczenie siłowni musi posiadać zwiększoną wydajność systemu

wentylacyjnego, aby zapewnić pełnych 30 wymian powietrza na godzinę w celu zapobieżenia tworzeniu się mieszaniny wybuchowej. Siłownia musi być wyposażona w system wykrywania gazów palnych w powietrzu. Pełna lista wymagań stawianych przez towarzystwa klasyfikacyjne jest znacznie dłuższa i wykracza poza zakres tego referatu. Większość znanych producentów oferuje obecnie szereg silników okrętowych przystosowanych do pracy tylko na gazie lub też mogących pracować zarówno na paliwie gazowym jak i ciekłym. Oferta obejmuje silniki wolnoobrotowe oraz średnioobrotowe. Silniki wolnoobrotowe starej generacji mogą być dostosowane do pracy na gazie, ale jest to zabieg dosyć kosztowny.. W obecnej chwili terminale LNG świadczące usługi bunkrowe rozmieszczone są głównie na wybrzeżach norweskich i szwedzkich. Istniejące terminale zajmujące się importem lub exportem LNG mogą dość szybko uruchomić swoje stacje bunkrowe. W Norwegii istnieją już wyspecjalizowane statki zajmujące się zaopatrywaniem innych jednostek w skroplony gaz ziemny.

2. SYSTEMY PŁUKANIA GAZÓW SPALINOWYCH

Usuwanie tlenków siarki z gazów spalinowych za pomocą płukania wodą ma długą historię w zastosowaniu lądowym i morskim. Już dawno stosowano mokre płuczki do usuwania SO_x ze spalin kotłów w dużych elektrowniach oraz systemach gazu obojętnego (inert gas) na tankowcach. Pojawienie się wymogów ograniczenia emisji tlenków siarki i innych substancji szkodliwych zawartych w konwencji MARPOL spowodowało wzrost zainteresowania techniką płukania spalin jako metodą alternatywną do spalania drogiego paliwa o małej zawartości siarki.. Systemy płukania spalin nadają się do instalacji na istniejących już statkach oraz jednostkach będących w budowie. Amerykański departament Transportu przeprowadził analizę kosztów instalacji do płukania spalin w zależności od mocy napędu, typu statku i typu urządzenia. Przedstawiona poniżej analiza podaje tylko koszt samego systemu płukania bez dodatkowych kosztów:

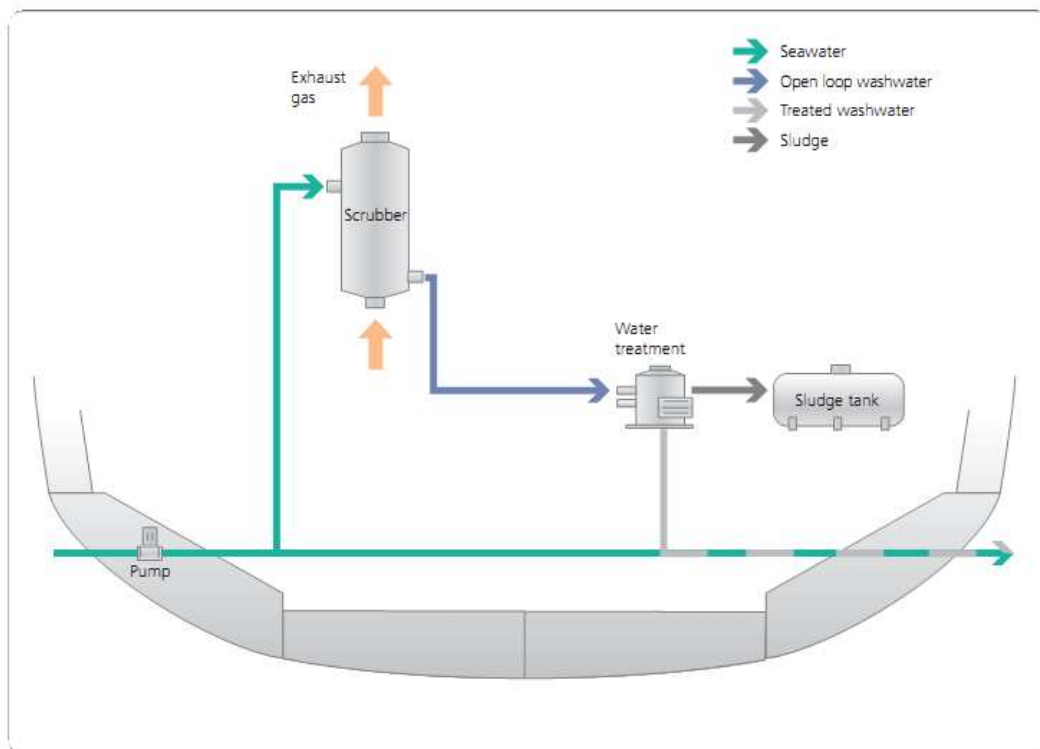
Tab. 2. Koszt samych urządzeń do płukania spalin, w dolarach amerykańskich [6]

	Open Loop	Closed Loop	Hybrid	Dry
Scrubber Ratings				
(by Engine Size)	(USD)	(USD)	(USD)	(USD)
36MW	3,100,000	3,850,000	3,600,000	6,050,000
16MW	2,900,000	3,600,000	3,120,000	3,200,000
12MW	2,000,000	2,500,000	2,220,000	1,900,000
10MW	1,800,000	2,150,000	1,920,000	1,600,000
3MW	1,300,000	1,850,000	1,560,000	1,250,000
1MW	1,000,000	1,750,000	1,260,000	930,000
Containership				
Transpacific	5,260,000	6,430,000	5,904,000	7,970,000
Containership Alaska to Puget Sound	5,060,000	6,180,000	5,424,000	5,120,000
Tankship US West Coast	3,960,000	4,730,000	4,224,000	3,520,000

Do podanych powyżej kosztów należy jeszcze doliczyć 50% wartości urządzenia jako koszt instalacji na statku i odbioru technicznego oraz 9% wartości jako koszty szkolenia załogi i opracowania niezbędnej dokumentacji.

2.1. Płuczka mokra o obiegu otwartym

System jest bezpośrednio wzorowany na wcześniejszych rozwiązaniach stosowanych w urządzeniach gazu obojętnego na tankowcach. Podstawowa zasada działania urządzenia jest przedstawiona na rysunku poniżej.

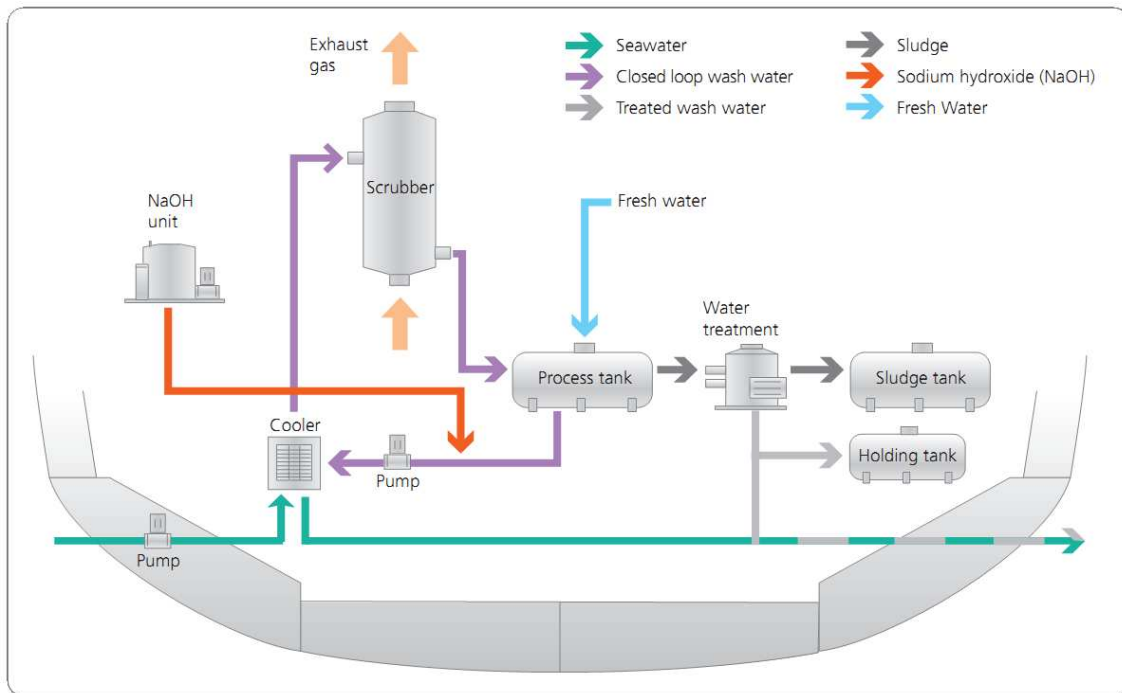


Rys. 6. Zasada działania mokrej płuczki spalin o otwartym obiegu wody.
Źródło: [7]

Woda morska o odczynie alkalicznym zobojętnia tlenki siarki w procesie płukania. Popłuczyny poddawane są procesowi filtracji, aby usunąć resztki węglowodorów oraz cząstki stałe. Osad oddzielony w trakcie filtracji jest gromadzony w zbiorniku. Przefiltrowana woda jest odprowadzana za burtę po uprzednim rozcieńczeniu dodatkową dawką wody morskiej aby uzyskać odczyn $pH > 6,5$. Woda o takim odczynie jest powszechnie uważana za bezpieczną ale istnieją ograniczenia zrzucania jej do morza w portach, ujściach rzek oraz wodach przybrzeżnych, określone przez lokalne administracje morskie. Woda w Bałtyku w miarę posuwania się na północ traci swój odczyn alkaliczny co może utrudnić działanie systemu. Spaliny przechodząc przez płuczkę ulegają ochłodzeniu, co utrudnia współpracę z systemem selektywnej katalitycznej redukcji tlenków azotu, który wymaga odpowiednio wysokiej temperatury do właściwej jego pracy. Jest to cecha właściwa dla wszystkich płuczek mokrych. Zaletą systemu otwartego są niskie koszty eksploatacyjne.

2.2. Płuczka mokra o obiegu zamkniętym

W systemie tym do płukania używana jest słodka woda z dodatkiem wodorotlenku sodu (NaOH), służącym do neutralizacji SOx. Niewielka ilość wody płuczącej jest zrzucana do morza. Obieg wody teoretycznie powinien być zamknięty, ale mała jej ilość jest zrzucana za burtę, aby zapobiec niekontrolowanemu wzrostowi kryształów siarczanu sodu i degradacji medium płuczającego. Zasadę działania systemu przedstawia poniższy rysunek.



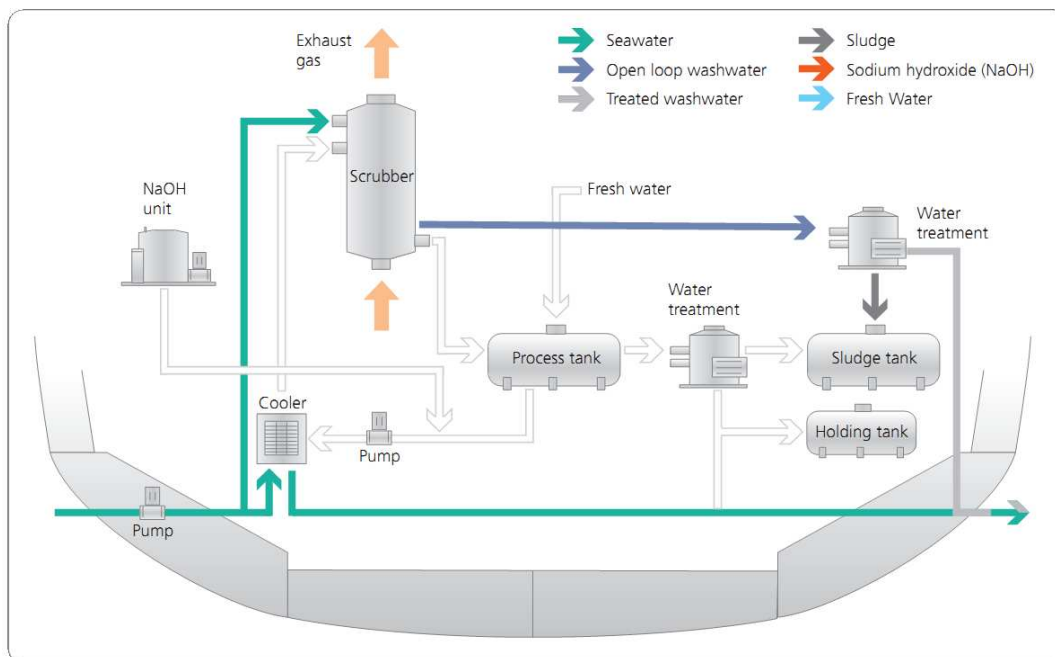
Rys. 7. Zasada działania mokrej płuczki w systemie zamkniętym.

Źródło: [7]

W systemie zamkniętym brak jest ograniczeń w pracy w rejonach przybrzeżnych oraz portach, ponieważ niewielką ilość wody, którą trzeba odprowadzać można pomieścić w dodatkowym zbiorniku oznaczonym na schemacie jako „holding tank”. Zastosowanie wodorotlenku sodu podnosi koszty eksploatacyjne, które są wyższe kosztów eksploatacji od systemu otwartego.

2.3. Płuczka mokra hybrydowa

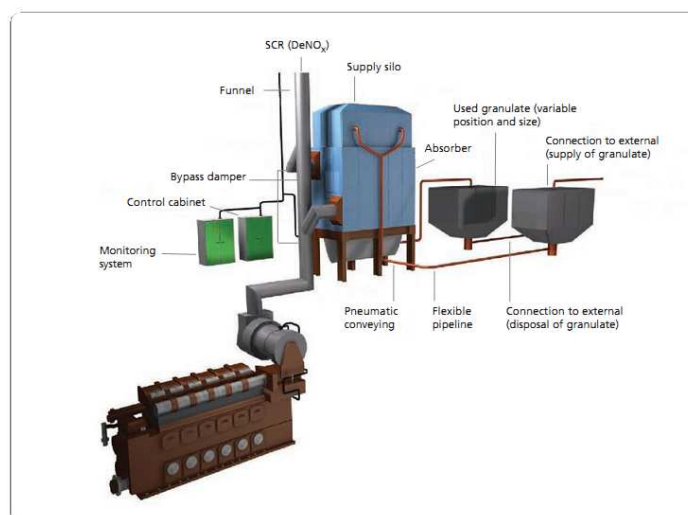
Zasada pracy tego systemu polega na przełączaniu obiegu wody z otwartego na zamknięty w zależności od potrzeb. Płuczka używa morskiej wody przy pracy w obiegu otwartym. Przy pracy w obiegu zamkniętym używana jest słodka woda. W miejscach gdzie żadna ilość wody nie może być wypompowana za burtę, używany jest dodatkowy zbiornik, podobnie jak w płuczce opisanej w punkcie 2.2. System hybrydowy łączy w sobie zalety poprzednich systemów odnośnie kosztów eksploatacji oraz wykorzystywania na obszarach gdzie zrzut wody za burtę jest zabroniony. Zasadę pracy ilustruje poniższy rysunek:



Rys. 8. Zasada działania płuczki hybrydowej.
Źródło: [7]

2.4. Płuczka sucha

W celu poprawienia współpracy płuczki z urządzeniami do redukcji tlenków azotu, zastosowano nowy rodzaj systemu oczyszczania spalin z tlenków siarki. Urządzenie to jest popularnie nazywane suchą płuczka. Zasada działania systemu polega na absorpcji tlenków siarki przez granulat wodorotlenku wapnia (CaOH) w absorberze, przez który przepływają spaliny. Sposób działania jest przedstawiony na rysunku poniżej:



Rys. 9. Zasada działania płuczki suchej (absorpcyjnej).
Źródło: [7]

W wyniku zobojętniania tlenków siarki przez wodorotlenek wapnia powstaje gips. Reakcja chemiczna zachodząca w absorberze jest egzotermiczna i dostarcza dodatkowego ciepła, które może być odzyskane. Jest to jeden z najnowszych systemów, który został wprowadzony do eksploatacji. Opracowany został w celu zintegrowania go z systemem

redukcji tlenków azotu, aby spełnić limity obowiązujące w niektórych strefach ograniczenia emisji.

PODSUMOWANIE

Istnieje wiele metod ograniczania emisji tlenków siarki, które będą spełniały obecne i przyszłe wymagania aneksu VI konwencji MARPOL. Trudno jest wskazać sposób, który byłby uniwersalny dla wszystkich typów statków i rodzaju uprawianej żeglugi. Wybór właściwej metody dla danego armatora i typu statku musi być dokonany w oparciu o dogłębną analizę ekonomiczną. Omówione powyżej metody będą się wiązać albo z dużymi nakładami kapitałowymi lub wysokimi kosztami eksploatacyjnymi w przyszłości.

BIBLIOGRAFIA

1. American Bureau of Shipping, *ABS Notes: Use of Low-Sulphur Marine Fuel for main and Auxiliary Diesel Engines*, Houston 2010
2. ECG (The Association of European Vehicle Logistic), *Sulphur Content In Marine Fuels. Briefing Report*, Brussels 2011.
3. European Environmental Bureau, *Air Pollution from Ships*. Brussels 2011
4. Graugaard C. W., *LNG as Fuel for Ship Propulsion*. Det Norske Veritas, Copenhagen 2010
5. Hughes E. *Clean Air At Sea*. European Commission, Brussels 2011.
6. Kevin J. R., *Exhaust Gas Cleaning Systems Selection Guide*. U.S. Department of Transportation, Washington 2011.
7. Lloyd's Register of Shipping., *Understanding exhaust gas treatment systems*. London 2012.
8. Ministry of Transport and Communication, Finland., *Sulphur content in ships bunker fuel in 2015*, Helsinki 2009.
9. Official Journal of European Union L 191/59, *Directive 2005/33/EC*, Brussels 2005
10. Osberg T. G., *Gas Engine Propulsion in Ships*. Det Norske Veritas, Copenhagen 2008.

REDUCTION METHODS OF EMISSION OF SULPHUR OXIDES, EMPLOYED BY VESSELS, FOR PURPOSE OF COMPLYING WITH IMPENDING REQUIREMENTS OF MARPOL ANNEX VI COMING INTO FORCE ON 1ST OF JANUARY, 2015

Abstract

Paper discussed the variety of methods currently being in use for purpose of complying with current and impending requirements of MARPOL Annex VI regarding limits of sulphur oxides emission into atmosphere. Special attention was given to ways of meeting the most strict limits applicable to emission control areas at sea. Advantages and shortcomings of each method were explained.

Autorzy:

Dr inż. **Jan Pawelski** – Akademia Morska w Gdyni, Wydział Nawigacyjny.