

PAWLAK Małgorzata

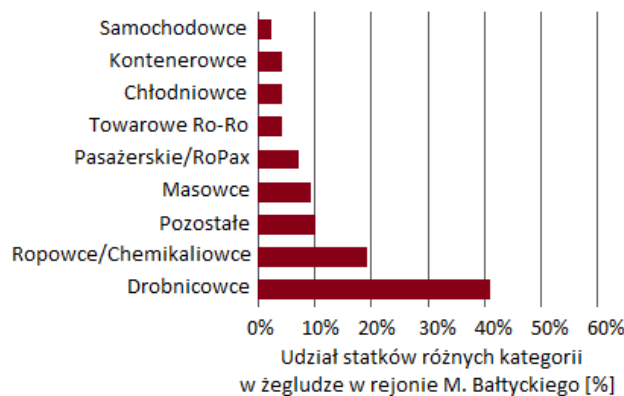
## ZASTOSOWANIE LNG DO NAPĘDU STATKÓW CELEM OGRANICZENIA EMISJI TOKSYCZNYCH SKŁADNIKÓW SPALIN JEDNOSTEK PŁYWAJĄCYCH W REJONIE MORZA BAŁTYCKIEGO

### Streszczenie

Wymogi VI Załącznika Konwencji MARPOL nakładają na armatorów obowiązek zastosowania takich rozwiązań technologicznych, aby dopuszczalne poziomy emisji toksycznych składników spalin morskich silników okrętowych nie były przekraczane. W artykule wskazano na możliwości rozwiązania tego problemu poprzez zastosowanie paliwa LNG do napędu statków, co pozwoli znacznie ograniczyć emisję SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, cząstek stałych i CO<sub>2</sub>. Jednocześnie, analizując koszty inwestycyjne i eksploatacyjne, metoda ta wykazuje przewagę konkurencyjną nad technologiami oczyszczania spalin.

### WSTĘP

Na przestrzeni ostatnich dziesięcioleci stan środowiska Morza Bałtyckiego uległ znacznemu pogorszeniu, między innymi w wyniku intensywnego rozwoju żeglugi na tym akwenie. Uśredniając dane z ostatnich kilku lat, wielkość przewozu towarów w rejonie Morza Bałtyckiego szacuje się na około 820 milionów ton rocznie, co stanowi około 10% wszystkich transportowanych dóbr drogą morską na świecie i powoduje uznanie Morza Bałtyckiego za akwen charakteryzujący się bardzo dużym natężeniem ruchu – wg danych pozyskiwanych z systemu Automatycznej Identyfikacji Statku (AIS), w dowolnym momencie na Bałtyku operuje około 2 tysięcy statków. Najliczniejszą grupę jednostek pływających w tym rejonie stanowią drobnicowce (około 40%) oraz zbiornikowce olejowe i chemikaliowce (około 20%) (rys.1).

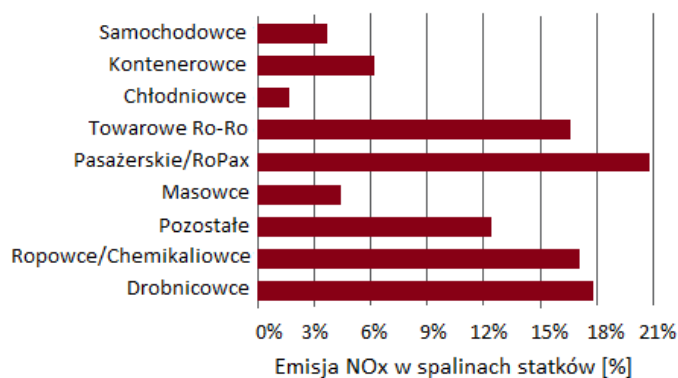


**Rys. 1.** Procentowy udział statków różnych kategorii w żegludze w rejonie Morza Bałtyckiego

Źródło: [1]

Temu intensywnemu ruchowi statków towarzyszą niekorzystne zjawiska zachodzące w środowisku morskim Bałtyku, które związane są z wprowadzaniem do niego zanieczyszczeń różnego rodzaju, wliczając zanieczyszczenia gazowe. Uśredniając dane z ostatnich lat, szacuje się, że jednostki pływające w rejonie Morza Bałtyckiego emitują rocznie około 150 tys. ton SO<sub>x</sub>, 400 tys. ton NO<sub>x</sub> oraz 20 mln ton CO<sub>2</sub> [1, 2].

Chociaż statki pasażerskie i Ro-Pax stanowią jedynie 5% całkowitej liczby statków ogółem operujących w rejonie Bałtyku, są odpowiedzialne za około 20% emisji NO<sub>x</sub> w spalinach wszystkich statków operujących w tym obszarze (rys.2). Z kolei, najliczniejszym w tym rejonie drobnicowcom oraz zbiornikowcom olejowym i chemikaliowcom przypisuje się odpowiednio 18% i 17% emisji NO<sub>x</sub>, zaś statki towarowe ro-ro są odpowiedzialne za około 16% emisji NO<sub>x</sub> [1]. Statki z grupy „pozostałe” to przede wszystkim mniejsze jednostki; przypisuje się im około 12%-owy udział w emisji NO<sub>x</sub>, z czego holowniki, pilotówki i pogłębiarki charakteryzują się ponad 10%-wym udziałem w emisji NO<sub>x</sub>. Z racji operowania w rejonach przybrzeżnych i w pobliżu aglomeracji miejskich, wpływ emisji zanieczyszczeń przez te jednostki na strefę przybrzeżną nie powinien być pomijany. Inne kategorie statków odznaczają się niewielkim udziałem w emisji NO<sub>x</sub> (kontenerowce – około 6%-owy udział w emisji NO<sub>x</sub>, samochodowce – około 4%-owy, a chłodniowce – około 2%-owy) [1,6].



**Rys. 2.** Procentowy udział statków różnych kategorii w całkowitej emisji NO<sub>x</sub> w spalinach jednostek pływających w rejonie Morza Bałtyckiego

Źródło: [1, 6]

Celem ochrony ekosystemów Bałtyku, podjęto liczne działania legislacyjne, skutkujące nałożeniem restrykcji odnośnie rodzaju i wielkości wprowadzanych do tego środowiska zanieczyszczeń. Morze Bałtyckie otrzymało status tzw. obszaru specjalnego (ang. *Special Area*), a także obszaru szczególnie wrażliwego (PSSA – ang. *Particularly Sensitive Sea Area*), a więc obszaru wymagającego szczególnej ochrony ze względów ekologicznych, na którym obowiązują jeszcze bardziej zaostrzone przepisy dotyczące wprowadzania zanieczyszczeń niż na pozostałych akwenach. Ponadto, w myśl przepisów zawartych z Załączniku VI Konwencji MARPOL, Morze Bałtyckie jest Obszarem Kontroli Emisji SO<sub>x</sub> (SECA – ang. *Sulphur Emission Control Area*), a niedługo będzie Obszarem Kontroli Emisji NO<sub>x</sub> (i będzie to tzw. ECA – ang. *Emissions Control Area*).

Przepisy zawarte w załączniku VI Konwencji MARPOL wyznaczają dopuszczalne poziomy emisji substancji gazowych przez statki, głównie NO<sub>x</sub> i SO<sub>x</sub>. Ograniczenia te są stopniowo wprowadzane, a najbardziej restrykcyjne dopuszczalne poziomy emisji będą obowiązywały od 2015 r. (dla poziomów emisji SO<sub>x</sub> i zawartości siarki w paliwie) i 2016 r.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Wprowadzenie normy Tier III w ECA (obszarach kontroli emisji) może zostać przesunięte na rok 2021 – wg postanowień zawartych w 2013 r. na 65-tym spotkaniu Komitetu ds. ochrony środowiska morskiego IMO (Marine Environment Protection Committee – MEPC).

(dla poziomów emisji NO<sub>x</sub>), co powoduje konieczność wprowadzenia zmian technologicznych przez armatorów jednostek pływających po Bałtyku (tab.1).

**Tab.1.** Wymogi dotyczące emisji spalin przez morskie silniki okrętowe na lata 2010-2020

Data obowiązywania	Przepis prawny	Wymóg	Zakres obowiązywania	Konsekwencje	Możliwe działania armatorów
01.01.2010	Dyrektywa UE 2005/33/EC	Zawartość siarki w paliwie <0,1% dla statków w czasie przejścia przez kanały UE lub cumujących w portach UE	Nowe oraz istniejące jednostki	a) konieczność dostosowania urządzeń, b) wyższe koszty żeglugi.	a) przejście na paliwo o zawartości siarki <0,1% w czasie przebywania w porcie lub kanałach, b) zastosowanie LNG jako paliwa.
01.07.2010	Załącznik VI Konwencji MARPOL	Zawartość siarki w paliwie <1% w obszarach SECA	Nowe oraz istniejące jednostki	a) konieczność dostosowania urządzeń lub zastosowanie technologii oczyszczania spalin, b) wyższe koszty żeglugi.	a) przejście na paliwo o zawartości siarki <1% b) stosowanie paliwa o zawartości siarki >1% przy jednoczesnym oczyszczaniu spalin, c) zastosowanie LNG jako paliwa.
01.01.2011	Załącznik VI Konwencji MARPOL	Ograniczenie emisji NO <sub>x</sub> na wszystkich akwenach pływania do poziomu Tier II, czyli o ok. 20% poniżej poziomu Tier I	Nowe jednostki (zbudowane po 01.01.2011 r.)	a) zastosowanie specjalnych silników lub technologii oczyszczania spalin, b) wyższe koszty żeglugi i koszty inwestycyjne.	a) instalacja nowych silników (lub modyfikacja istniejących), odznaczających się niską emisją NO <sub>x</sub> , b) zastosowanie silników o poziomie emisji Tier I z jednoczesnym stosowaniem technologii SCR, EGR, HAM, emulsji wodnej itp. c) zastosowanie LNG jako paliwa.
01.01.2012	Załącznik VI Konwencji MARPOL	Zawartość siarki w paliwie <3,5% (poza obszarami SECA), obniżana stopniowo do 0,5% do 2020 r. (lub później)	Nowe oraz istniejące jednostki	a) wyższe koszty żeglugi.	a) przejście na paliwo o odpowiednio niskiej zawartości siarki (od 2012 r.: zawartość siarki do 3,5%, później do 0,5%), b) stosowanie paliwa o wyższej zawartości siarki jednocześnie z technologią oczyszczania spalin, c) zastosowanie LNG jako paliwa.
01.01.2015	Załącznik VI Konwencji MARPOL	Zawartość siarki w paliwie <0,1% w obszarach SECA	Nowe oraz istniejące jednostki	a) konieczność dostosowania urządzeń lub zastosowania technologii oczyszczania spalin, b) wyższe koszty żeglugi	a) przejście na paliwo o zawartości siarki <0,1% b) stosowanie paliwa o zawartości siarki > 0,1% równocześnie z technologią oczyszczania spalin, c) zastosowanie LNG jako paliwa.
01.01.2016	Załącznik VI Konwencji MARPOL	Ograniczenie emisji NO <sub>x</sub> do poziomu Tier III w obszarach ECA, o ok. 75% poniżej poziomu Tier II	Nowe jednostki (zbudowane po 01.01.2016 r.)	a) zastosowanie technologii oczyszczania spalin (lub poniesienie kosztów dostosowania silnika), b) wyższe koszty żeglugi.	a) stosowanie technologii oczyszczania spalin, np. SCR, b) zastosowanie LNG jako paliwa.

Zródło: [1]

## 1. TECHNOLOGIE ZMNIEJSZANIA EMISJI ZWIĄZKÓW TOKSYCZNYCH W SPALINACH SILNIKÓW OKRĘTOWYCH

Spełnienie obowiązujących obecnie i w niedalekiej przyszłości wymogów prawnych, wymusza na armatorach zastosowanie różnych rozwiązań, do których m.in. należą: przejście na paliwo o niskiej zawartości siarki, wtrysk wody do powietrza doładowującego, tworzenie

mieszaniny wodno-paliwowej, wtrysk wody do komory spalania, recyrkulacja spalin – EGR (ang. *Exhaust Gas Recirculation*), systemy oczyszczania spalin – skrubery (płuczki wieżowe) w przypadku SO<sub>x</sub> oraz selektywna redukcja katalityczna – SCR (ang. *Selective Catalytic Reduction*) w przypadku NO<sub>x</sub>.

Biorąc pod uwagę różne dostępne obecnie rozwiązania technologiczne w zakresie morskich silników okrętowych, jak również przewidując dalszy rozwój tych technologii, armatorzy statków operujących w obszarach kontroli emisji stoją przed koniecznością rozważenia opcji przejścia na paliwo niskosiarkowe, instalacji systemów oczyszczania spalin z SO<sub>x</sub> i NO<sub>x</sub> lub przejścia na paliwo alternatywne charakteryzujące się niską emisją SO<sub>x</sub> i NO<sub>x</sub>, np. LNG (ang. *Liquefied Natural Gas*). Każda z tych opcji jest korzystna z punktu widzenia ochrony środowiska, natomiast różnice dotyczą przede wszystkim wysokości nakładów finansowych ewentualnego dostosowania układu paliwowego, instalacji urządzeń i ich późniejszej eksploatacji (tab.2).

**Tab. 2.** Zestawienie głównych zalet i wad trzech wybranych metod ograniczenia emisji głównych związków toksycznych (SO<sub>x</sub> i NO<sub>x</sub>) w spalinach morskich silników okrętowych

Metoda	Zalety	Wady
Paliwo niskosiarkowe (o zawartości siarki <0,1%)	Podstawową zaletę stanowią niskie koszty inwestycyjne, związane z koniecznością przeprowadzenia stosunkowo niewielkiej modyfikacji okrętowego układu paliwowego.	Podstawową wadę stanowi obecnie wysoka cena paliwa niskosiarkowego, co znacząco zwiększa koszty żeglugi. Zmiana paliwa o zawartości siarki 1,5% do 0,5% zwiększa koszty o 20-30%. Natomiast zmiana paliwa o zawartości siarki 0,5% do 0,1% zwiększa koszty o 50-60%. A zatem, przejście z paliwa 1,5% S na paliwo 0,1 % S oznaczałoby wzrost kosztów nawet o 70-90% w stosunku do ceny paliwa 1,5% S (np. LS 380) [4].  Ponadto, można zaobserwować wysoką dynamikę zmian cen paliw niskosiarkowych, nawet rzędu kilkudziesięciu procent w ciągu zaledwie kilku lat [5, 7].  Co więcej, wzrost popytu na paliwo niskosiarkowe może spowodować dodatkowe znaczne wzrosty jego ceny w przyszłości.
Urządzenia do oczyszczania spalin	Podstawową zaletę stanowi efektywność tych urządzeń w oczyszczaniu spalin. Zastosowanie skruberów (płuczek wieżowych) pozwala zmniejszyć emisję SO <sub>x</sub> nawet o 95 % w stosunku do poziomów wyjściowych, zaś zastosowanie technologii SCR pozwala obniżyć emisję NO <sub>x</sub> nawet o 90%. Ponadto, kombinacja różnych metod oczyszczania spalin pozwala uzyskać znaczącą redukcję wartości emitowanych związków toksycznych, np. połączenie technologii EGR z wtryskiem wody do powietrza doładowującego oraz kontrolą wtrysku paliwa pozwala na redukcję NO <sub>x</sub> o 60%, a technologii EGR z technologią nawilżania powietrza doładowującego – o 70% w stosunku do poziomów wyjściowych.	Podstawową wadę stanowi konieczność instalacji urządzeń, wraz z dodatkowymi systemami i układami (rur, pomp, zbiorników itd.), co wiąże się z wysokimi kosztami inwestycyjnymi – w zależności od rodzaju wybranej technologii, koszty te wahają się od kilkudziesięciu tysięcy euro (np. w przypadku technologii tworzenia mieszaniny paliwowo-wodnej, czy technologii wtrysku wody do komory spalania), do nawet dwóch milionów euro (np. w przypadku technologii SCR i skruberów). Ponadto, należy liczyć się z kosztami eksploatacyjnymi zainstalowanych urządzeń, jednak w porównaniu z kosztami inwestycyjnymi, nie są one aż tak wysokie.  Dodatkową niedogodnością jest wytwarzanie dodatkowego odpadu, pozostającego po oczyszczaniu spalin (np. szlamu zawierającego siarkę w przypadku stosowania systemów oczyszczania spalin z SO <sub>x</sub> ), który musi być odpłatnie zdawany do odpowiednich urządzeń odbiorczych w portach.  Kolejna kwestia, choć marginalna, to nieznaczne zwiększenie zużycia energii, co przekłada się na wzrost zużycia paliwa (raczej nie wyższy niż 3%-owy), co pośrednio zwiększa emisję CO <sub>2</sub> .
Paliwo LNG	Zastosowanie LNG – najczystszej dostępnej postaci paliw kopalnych,	Podstawową wadę stanowią nakłady finansowe związane z koniecznością instalacji specjalnych silników (lub

	skutkuje brakiem potrzeby instalowania dodatkowych urządzeń obniżających emisję związków toksycznych w spalinach silników okrętowych, ponieważ poziomy emisji nie przekraczają nawet najbardziej restrykcyjnych poziomów (Tier III) dla obszarów ECA.	modyfikacji istniejących), zbiorników paliwowych, specjalnie izolowanych rurociągów. W przypadku nowobudowanych statków, wyposażenie statku w odpowiednie silniki, zbiorniki, cały układ paliwowy stanowi dodatkowy koszt inwestycyjny rzędu ok. 10-20% kosztów ogółem [1, 3], w stosunku do budowy nowego statku zasilanego paliwem konwencjonalnym.
--	---	--

Źródło: opracowanie własne w oparciu o [1, 3, 4, 5, 7]

W przypadku nowych statków, zbudowanych po 01.01.2016 r., osiągnięcie poziomów emisji zdefiniowanych przez Tier III jest możliwe albo poprzez zastosowanie paliwa LNG, albo poprzez zastosowanie technologii oczyszczania spalin z NOx, np. SCR. Jednakże w przypadku wyboru technologii SCR, stosowanej z powodzeniem w instalacjach lądowych, gdzie osiąga się stopień redukcji NOx rzędu 90%, należy zwrócić uwagę na odmienny charakter pracy instalacji lądowych – długie okresy pracy pod stałym obciążeniem. Natomiast w przypadku pracy okrętowych silników ZS napędu głównego, pracujących w zmiennych warunkach obciążenia, w stanach nieustalonych, co dotyczy zwłaszcza jednostek operujących w obszarach ograniczonej emisji – ECA (które będąc akwenami trudnymi nawigacyjnie, wymagają ciągłych manewrów lub operowania ze zmniejszonymi prędkościami statku), efektywność instalacji SCR w redukcji emisji NOx może być znacznie obniżona. Należy również zwrócić uwagę na konieczność okresowej konserwacji lub wymiany katalizatora oraz na jego wrażliwość na obecność siarki w paliwie, co może powodować obniżenie wydajności technologii SCR.

## 2. KORZYŚCI Z ZASILANIA SILNIKÓW OKRĘTOWYCH LNG

Przeprowadzona powyżej wstępna analiza wybranych możliwych rozwiązań technologicznych pozwalających na spełnienie wymogów Tier III, wykazała, że wśród różnych dostępnych opcji, najkorzystniejszą z nich wydaje się być zastosowanie paliwa LNG.

### 2.1. Korzyści finansowe

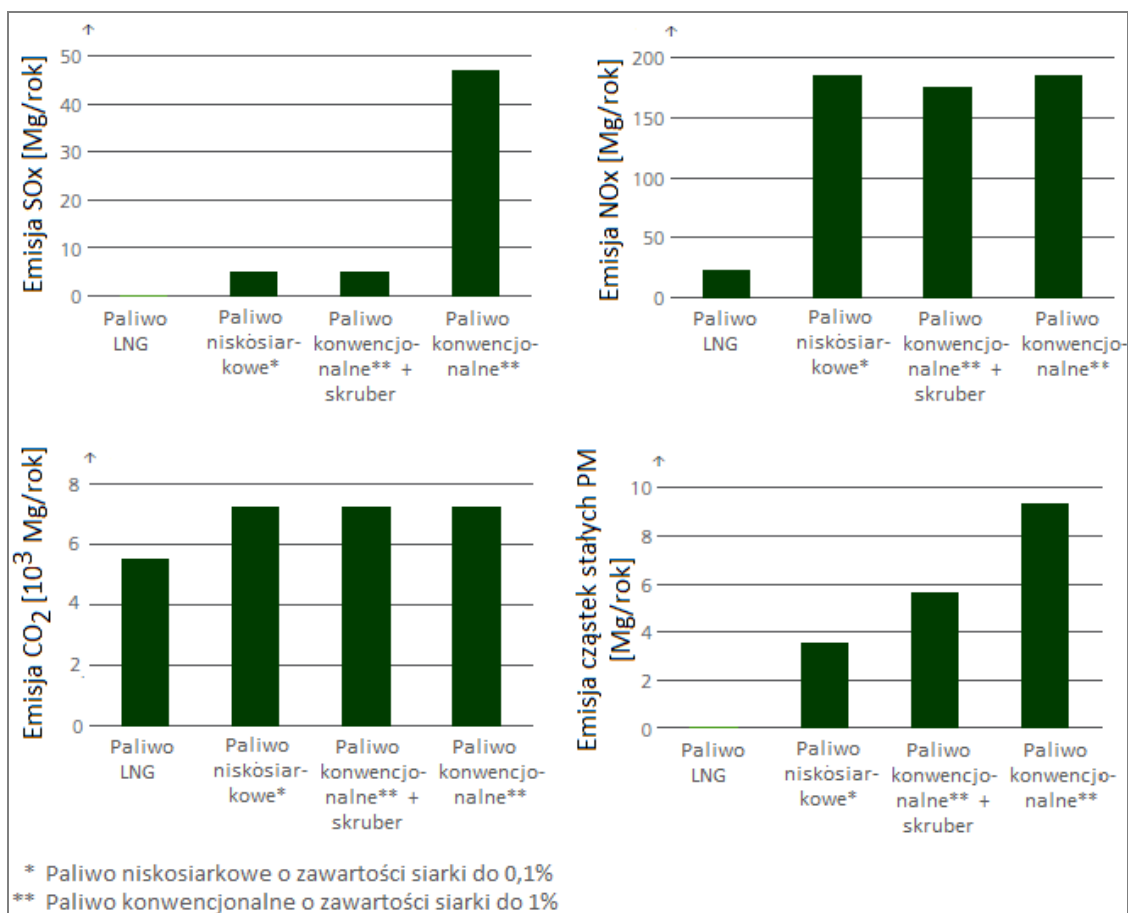
W przypadku nowobudowanych statków, korzystniejsze wydaje się poniesienie wyższych kosztów inwestycyjnych wyposażenia statków w instalacje do napędu paliwem LNG. W badaniach przeprowadzonych przez DNV, opisanych w [1] wykazano, że koszt budowy nowego statku towarowego, typowego dla żeglugi w rejonie Morza Bałtyckiego (GT=2700, silnik główny 3,3 MW, 5250 godzin żeglugi rocznie) z napędem LNG jest jedynie o 10-20% wyższy niż w przypadku, gdyby zdecydowano się na silniki zasilane olejem napędowym. Ten dodatkowy koszt inwestycyjny szacuje się na poziomie 2,6 mln euro. Natomiast w przypadku zastosowania paliwa niespełniającego wymogów określonych przez normę Tier III, koszt inwestycyjny zastosowania urządzeń oczyszczania spalin dla silnika tej wielkości szacuje się na poziomie 0,7 mln euro. Koszty związane z przejściem na paliwo o niskiej zawartości siarki (poniżej 0,1%) są niewielkie, ale, jak wspomniano wyżej, spodziewany dalszy wzrost cen paliw niskosiarkowych znacznie będzie podwyższać koszty eksploatacyjne jednostki.

Analizując koszty ponoszone podczas 20 lat eksploatacji statku, najtańszym rozwiązaniem okazuje się LNG – oszacowano, że wartość bieżąca tej opcji jest o 3 mln euro niższa niż przy zastosowaniu technologii oczyszczania spalin i 9 mln euro niższa niż w przypadku zastosowania paliwa niskosiarkowego (o zawartości siarki poniżej 0,1%) [1].

### 2.2. Korzyści dla środowiska

Z zestawionych w tab.2 sposobów technicznych spełnienia wymogów normy Tier III, zasilanie silników okrętowych statków operujących w obszarach ECA paliwem LNG

odznacza się najlepszymi właściwościami ekologicznymi. Szacuje się, że zastosowanie paliwa LNG pozwoli znacząco zmniejszyć emisję toksycznych składników spalin: NOx o 85–90%, zaś SOx i cząstek stałych PM prawie o 100% w stosunku do wartości otrzymanych przy stosowaniu obecnych paliw konwencjonalnych (o zawartości siarki do 1%). Ponadto, przewiduje się znaczący spadek emisji gazów cieplarnianych, głównie CO<sub>2</sub>, średnio o około 15–20% (rys.3) [1].



**Rys. 3.** Zestawienie szacunkowych rocznych wartości emisji [Mg] różnych substancji szkodliwych w spalinach statków zasilanych: paliwem LNG; paliwem niskosiarkowym o zawartości siarki nie przekraczającej 0,1%, czyli wartości jakie będą musiały spełniać statki operujące w obszarach SECA; paliwem o zawartości siarki nie przekraczającej 1% równocześnie z systemem oczyszczania spalin; oraz paliwem o zawartości siarki nie przekraczającej 1%, czyli wartości, która obowiązuje w obszarach SECA od 01.07.2010 r.

Źródło: [1]

Spośród technologii ograniczenia emisji związków toksycznych w spalinach silników okrętowych, w porównaniu z tymi zestawionymi w tab.2, jedynie zastosowanie paliwa LNG na statkach spełni wymogi IMO zarówno te obowiązujące od 2015 r. dotyczące emisji tlenków siarki, jak i te obowiązujące od 2016 r. dotyczące emisji tlenków azotu (Tier III). Osiągnięcie porównywalnie niskich poziomów emisji tych substancji w przypadku silników zasilanym tradycyjnym paliwem wymaga zastosowania technologii SCR (celem zmniejszenia emisji NOx) oraz skrublerów (celem zmniejszenia emisji SOx). Na obecnym etapie badań nie wiadomo czy obie te technologie będą mogły być stosowane jednocześnie i czy będą one wystarczająco efektywne. Ponadto, stosowanie paliwa LNG pozwala uzyskać niższe wartości emisji CO<sub>2</sub> i cząstek stałych PM w spalinach morskich silników okrętowych, co przy dalszej ewolucji wymogów IMO może mieć istotne znaczenie.

## PODSUMOWANIE

Uwzględniając kryteria finansowe, jak i mając na uwadze ochronę środowiska, zastosowanie paliwa LNG do zasilania głównych i pomocniczych silników okrętowych, zwłaszcza w przypadku nowobudowanych jednostek, wydaje się stanowić najlepsze rozwiązanie problemów związanych z koniecznością spełnienia zaostrzających się wymogów dotyczących dopuszczalnych poziomów emisji zanieczyszczeń w spalinach morskich silników okrętowych jednostek pływających w obszarach kontroli emisji (ECA), jakim jest m.in. Morze Bałtyckie. Wdrożenie tego rozwiązania będzie możliwe pod warunkiem rozwinięcia infrastruktury dystrybuującej gaz skroplony oraz zapewnienia bezpiecznego i sprawnego procesu zaopatrywania statków w to paliwo.

## BIBLIOGRAFIA

1. Det Norske Veritas, *Greener Shipping in the Baltic Sea*. Norway, 2010.
2. International Maritime Organisation, *Second IMO Greenhouse Gases Study*, IMO 2009.
3. Kołwzan K., Narewski M., *Study on alternative fuels for marine applications*. Clean Shipping Currents Vol.1, No.3, 2012.
4. Notteboom T., *The impact of low sulphur fuel requirements in shipping on the competitiveness of roro shipping in Northern Europe*. World Maritime University, 2011.
5. Skema *Impact Study of the future requirements of Annex VI of the MARPOL Convention on Short Sea Shipping*. Directorate-General for Energy and Transport, European Commission, Brussels, 2010.
6. Stipa T., Jalkanen J.-P., Hongisto M, Kalli J., Brink A., *Emissions of NOx from Baltic shipping and first estimates of their effects on air quality and eutrophication of the Baltic Sea*, Finish Institute of Marine Research, Finland, 2007.
7. Swedish Maritime Administration, *Consequences of the IMO's new marine fuel sulphur regulations*. SMA, Stockholm, 2009.

## LNG-FUELLED SHIPS FOR REDUCING MARINE ENGINES EXHAUSTS EMISSIONS IN THE BALTIC SEA

### *Abstract*

*Meeting demands of the MARPOL Convention, Annex VI, oblige shipowners to apply such technological solutions not to exceed emissions of toxic compounds in marine engines' exhausts. The paper indicates that LNG fuel shows great potential in reducing emissions SOx, NOx, particles PM and CO<sub>2</sub>. Moreover, this option is expected to be the most cost-efficient comparing to available exhaust treatment technologies.*

### **Autor:**

dr inż. Małgorzata Pawlak – Akademia Morska w Gdyni