



## WPLYW PARAMETRÓW ZEWNĘTRZNYCH NA WYTWARZANIE PARY W KOTLE OPALANYM

**Dominik Kreft**

*Politechnika Gdańska,  
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa,  
Instytut Oceanotechniki i Okrętownictwa,  
Zakład Siłowni Okrętowych  
ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, tel.: +48 58 347 2374  
e-mail: domkreft@pg.edu.pl*

### *Streszczenie*

*W artykule przedstawiono analizę statystyczną wpływu parametrów zewnętrznych na strumień ciepła zawartego w paliwie dołotowym do okrętowego kotła opalanego. Jako parametry niezależne wytypowano średnią dobową moc chwilową silnika głównego i agregatów prądotwórczych, temperaturę wody zaburtowej oraz zanurzenie. Analizę przeprowadzono dla czterech różnych stanów eksploatacyjnych badanego statku.*

**Słowa kluczowe:** kotły okrętowe, kocioł opalany, kocioł pomocniczy, statystyka

### **1. Wstęp**

Duże statki handlowe napędzane silnikami wolnoobrotowymi przeważnie są wyposażone w kocioł utylizacyjny i kocioł pomocniczy (opalany). Na mniejszych statkach, nie uwzględniając jednostek specjalnych, (do około 100 m długości i 5 tys. ton nośności) z powodu niewielkich potrzeb grzewczych, rezygnuje się z użycia pary jako czynnika grzewczego. Zazwyczaj wykorzystuje się niezależne podgrzewacze elektryczne dla każdego odbiornika. Należy wspomnieć, że zgodnie z ograniczeniem zawartości siarki w paliwie według konwencji Marpol aneks VI [2], wiele statków rezygnuje z używania paliwa ciężkiego, którego instalacja była głównym odbiornikiem ciepła. Stąd też na statkach napędzanych paliwem lekkim lub LNG, instalacja grzewcza parowa lub olejowa staje się nieuzasadniona ekonomicznie.

Podczas eksploatacji statku, kocioł utylizacyjny powinien zaspokoić całkowite zapotrzebowanie na ciepło podczas stanu pływania w morzu. Kocioł opalany znajduje się wtedy w stanie oczekiwania i ewentualnie może pokryć podwyższone zapotrzebowanie na ciepło np. podczas gwałtownego obniżenia temperatury zewnętrznej lub przy uruchomieniu się wielu

odbiorników ciepła jednocześnie [1]. Głównym celem działania kotła opalanego jest dostarczenie pary grzewczej podczas stanu postoju w porcie. W czasie gdy statek znajduje się przy nabrzeżu silniki główne zostają wyłączone i tym samym kocioł utylizacyjny nie wytwarza pary za pomocą spalin.

Tytułowa analiza została przeprowadzona dla wytypowanego statku towarowego. Jest nim kontenerowiec którego dane przedstawiono w poniższej Tabeli 1 [5].

Tabela 1. Specyfikacja badanego statku

Długość między pionami	294,05 m
Szerokość	32,29 m
Zanurzenie maksymalne	12,3 m
Nośność	65710 t
Rok budowy	2009
Silnik główny (SG)	Wartsila 7RT-flex96c; 40040 kW; 102 rpm
Agregaty prądotwórcze (AP)	3x Man B&W 9L32/40 4500kW; 720 rpm 1x Man B&W 8L32/40 4000kW; 720 rpm
Pojemność zbiorników paliwa ciężkiego	5933 m <sup>3</sup>
Prędkość maksymalna	24,8 kn
Czas uzyskania pomiarów	01.02.2016 – 28.02.2019

Ponadto statek wyposażony był w kocioł kombinowany Saacke CBKG-5.0+5.0/7. Kocioł charakteryzował się nominalną wydajnością 5000 kg/h pary z części opalanej oraz 5000 kg/h z części utylizacyjnej. Dostosowany był do wytwarzania pary o ciśnieniu 7 bar. Wyznaczając różnicę entalpii pomiędzy parą suchą nasyconą o ciśnieniu nominalnym, a wodą dolotową o temperaturze 90 °C, można obliczyć teoretyczny strumień ciepła pary dla części opalanej kotła:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot (i_{pary} - i_{wody}) \approx 3313 [kJ/s]$$

Gdzie:

$\dot{Q}$  – strumień ciepła pary [kJ/s]

$\dot{m}$  – strumień masy pary [kg/s]

$(i_{pary} - i_{wody})$  – różnica entalpii ( $i_{pary} = 2762,7$ ;  $i_{wody} = 377$ ) [kJ/kg]

W artykule przeanalizowano zużycie paliwa przez kocioł opalany dla 4 stanów badanego statku:

- Pływanie
- Manewry
- Postój na kotwicy
- Cumowanie w porcie

Dla stanu pływania i manewrów, kocioł był zasilany paliwem ciężkim (dotyczy pływania poza regionami ECA, ponieważ statek nie był wyposażony w płuczkę spalin). Zgodnie z konwencją Marpol, podczas postoju w porcie, SG musi być wyłączony a kocioł powinien być zasilany paliwem lekkim lub odsiarczonym. Średnia wartość opała paliwa ciężkiego i ciężkiego odsiarczonego została przyjęta jako  $W_d = 39\ 000$  kJ/kg, zaś paliwa lekkiego  $W_d = 42\ 700$  kJ/kg.



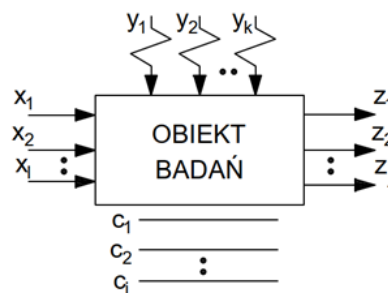
## 2. Czynniki wpływające na pobór paliwa przez kocioł opalany

Na pracę kotła wpływa wiele różnych czynników. W tym rozdziale zostaną przeanalizowane czynniki które mają wpływ na zużycie paliwa. Można je podzielić na dwie kategorie: czynniki wewnętrzne oraz czynniki zewnętrzne.

Czynniki wewnętrzne to takie które wynikają bezpośrednio z budowy kotła. Kocioł zaprojektowany jest tak, aby wytwarzać strumień pary o odpowiednim ciśnieniu zadeklarowanym przed producenta. Aby spełnić ten wymóg, do kotła dobrany jest odpowiedni palnik, pompy paliwowe wystarczającej wydajności, odpowiednia wielkość przestrzeni roboczej w komorze spalania, właściwa długość płomienia itp.

Czynniki zewnętrzne nie są związane bezpośrednio z kotłem. Przykładem może być zmienność wartości opałowej paliwa w zależności od bunkrowania go w różnych portach, wpływ na pracę kotła wynikający z jego obsługi przez załogę, a przede wszystkim zmienne zapotrzebowanie na ciepło przez odbiorniki. Jako, że projektant siłowni okrętowych nie ma wpływu na budowę kotła który zostaje zamówiony do stoczni i jest elementem modułowym, w niniejszym artykule zbadany zostanie jedynie wpływ czynników zewnętrznych na zużycie paliwa przez kocioł opalany.

Z powodu braku możliwości zmierzenia wszystkich możliwych czynników zewnętrznych wpływających na pracę kotła, zostały one podzielone na dane wejściowe, wartości stałe i zakłócenia. Na Rys. 1 przedstawiono teoretyczny graf gdzie  $x$  oznaczają dane wejściowe,  $y$  – zakłócenia,  $c$  – wartości stałe,  $z$  – dane wyjściowe.



Rys. 1 Ogólny schemat pokazujący sygnały wejściowe i wyjściowe

Dane wejściowe zostały wytypowane ze zbioru danych które zawiera dziennik maszynowy badanego statku. Pozostałe dane logicznie związane z zużyciem paliwa przez kocioł zostaną określone w modelu jako wartości stałe lub zakłócenia. Daną wyjściową (zależną) będzie godzinowe zużycie paliwa przez kocioł opalany, uśrednione dla jednej doby, wyrażone w kilogramach na godzinę. Dla stanów eksploatacyjnych pływania oraz manewrów zostały wybrane następujące dane wejściowe (niezależne):

- Średnia dobową moc chwilowa SG
- Średnia dobową moc chwilowa AP
- Zanurzenie
- Temperatura wody zaburtowej (WM)

Z kolei dla stanu eksploatacyjnego postoju na kotwicy i cumowania w porcie silnik główny był zazwyczaj wyłączony i tym samym jego obciążenie nie będzie brane pod uwagę.

Jako wartości stałe został przyjęty: typ statku, rodzaj paliwa zasilającego silnik główny oraz moc zainstalowana silnika głównego. Jako zakłócenia zostały przyjęte: wartość opałowa paliwa, stan eksploatacyjny kotła, oraz obsługa kotła przez załogę. Jako zakłócenie poprzez obsługę, można rozumieć wpływ szumowania kotła, dławienie pary zaworami, pracę z niższym od nominalnego ciśnieniem pary lub dolot paliwa o zbyt wysokiej lepkości. Również należy uwzględnić zatrzymania kotła wynikające z okresowych przeglądów lub awarii. Sprawność kotła wynika z jego stanu fizycznego i wynosi do 98% dla nowych urządzeń. Z czasem gdy płomienice i płomieniówki zostaną pokryte warstwą sadzy sprawność ta może spaść nawet do 92% [4]. Stan fizyczny kotła jest wartością nieznaną, jednakże ma dość duży wpływ na zużycie paliwa przy takim samym zapotrzebowaniu na ciepło.

### 3. Analiza statystyczna

Statek w zależności od swoich stanów eksploatacyjnych korzystał z paliw o różnych wartościach opałowych. W celu ujednoczenia analizy zdecydowano się na przeliczenie masy zużytego paliwa przez kocioł, na jednostkę dostarczonego ciepła w czasie wyrażoną w  $GJ/h$ . Aby na powrót przeliczyć strumień ciepła w  $GJ/h$  na ekwiwalent masowy paliwa lekkiego (MDO) lub paliwa ciężkiego (HFO) można skorzystać ze wzorów:

$$\dot{m}_{MDO} = 23,42 \cdot \dot{Q} \left[ \frac{kg}{h} \right]$$

$$\dot{m}_{HFO} = 25,64 \cdot \dot{Q} \left[ \frac{kg}{h} \right]$$

Dla każdego ze stanów eksploatacyjnych statku przeprowadzono analizę korelacji Pearsona zmiennych niezależnych na strumień ciepła doprowadzony do kotła w postaci paliwa. Analiza korelacji Pearsona została przeprowadzona w programie Statistica. Siłę korelacji oceniano następująco [3]:

- $|R| < 0,20$  – korelacja bardzo słaba
- $0,20 < |R| < 0,40$  – korelacja słaba
- $0,40 < |R| < 0,70$  – korelacja umiarkowana
- $0,70 < |R| < 0,90$  – korelacja silna
- $|R| > 0,90$  – korelacja bardzo silna

Zbadano również poziom istotności każdej korelacji. Jako istotne statystycznie przyjęto korelacje o poziomie istotności  $\alpha < 0,1$ . Obliczony poziom istotności zależy między innymi od ilości danych w populacji. Dla wyższych wielkości populacji będzie on niższy, dlatego dane należy analizować kompleksowo wraz ze współczynnikiem korelacji. Różne wielkości populacji wynikają z różnego czasu spędzonego w danym stanie przez statek oraz braków i błędów w uzupełnianym przez załogę dzienniku maszynowym. Liczności odpowiednich populacji mieszczą się w przedziale od 12 do 116 pomiarów.

Poniżej przedstawiono tabele korelacji strumienia ciepła doprowadzonego w paliwie do kotła od zmiennych niezależnych dla poszczególnych stanów statku. Dodatkowo pod odpowiednimi tabelami przedstawiono wykresy rozrzutu dla korelacji istotnych statystycznie.

- *Stan pływania*

Tabela 2. Tablica korelacji dla stanu pływania

	AP obc. [%]	SG obc. [%]	Temperatura WM [°C]	Zanurzenie [m]
Współczynnik korelacji $R$	0,2498	- 0,2233	0,02	- 0,315
Poziom istotności $p$	0,434	0,253	0,92	0,294
Liczność próby $N$	12	28	28	13

- *Stan manewrów*

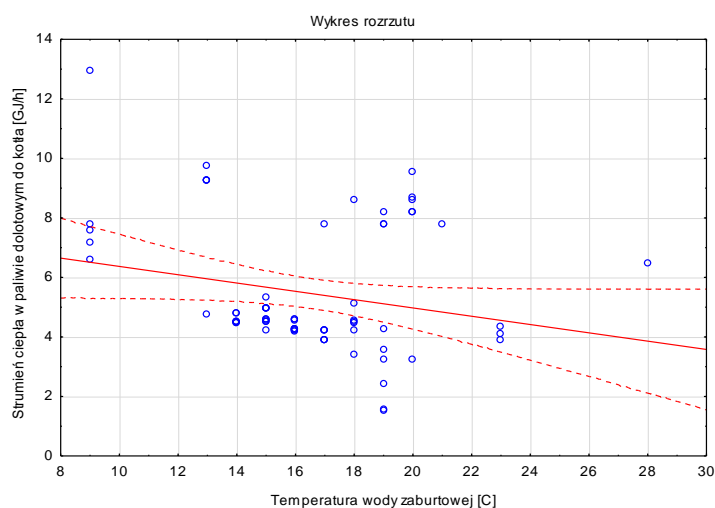
Tabela 3. Tablica korelacji dla stanu manewrów

	AP obc. [%]	SG obc. [%]	Temperatura WM [°C]	Zanurzenie [m]
Współczynnik korelacji $R$	0,0496	- 0,2290	- 0,0651	0,2803
Poziom istotności $p$	0,771	0,361	0,694	0,195
Liczność próby $N$	41	18	39	23

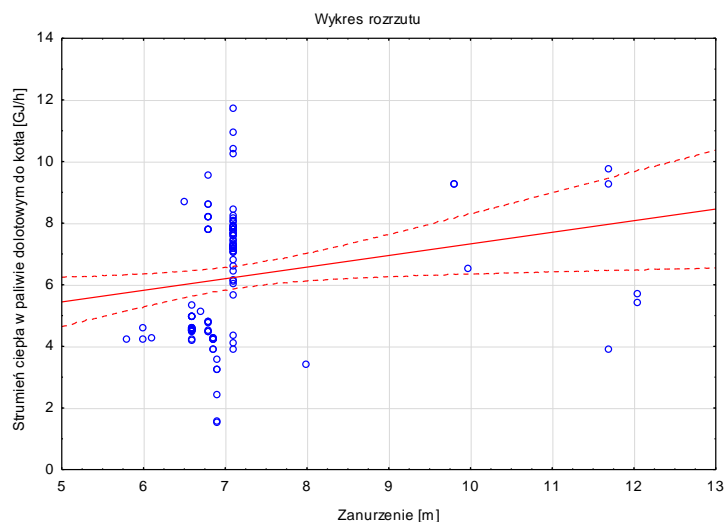
- *Stan postoju na kotwicy*

Tabela 4. Tablica korelacji dla stanu postoju na kotwicy

	AP obc. [%]	Temperatura WM [°C]	Zanurzenie [m]
Współczynnik korelacji $R$	0,1497	- 0,2230	0,2100
Poziom istotności $p$	0,2	0,062	0,024
Liczność próby $N$	75	71	116



Rys. 2 Wykres korelacji strumienia ciepła dołotowego do kotła a temperaturą wody zaburtowej

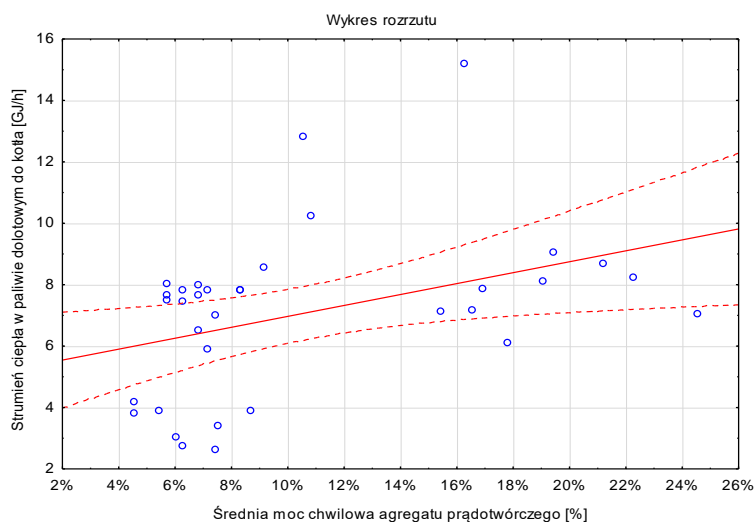


Rys. 3 Wykres korelacji strumienia ciepła dolutowego do kotła a zanurzeniem

- Stan cumowania w porcie

Tabela 5. Tablica korelacji dla cumowania w porcie

	AP obc. [%]	Temperatura WM [°C]	Zanurzenie [m]
Współczynnik korelacji $R$	0,3908	- 0,015	0,0481
Poziom istotności $p$	0,022	0,927	0,82
Liczność próby $N$	34	40	25



Rys. 4 Wykres korelacji strumienia ciepła dolutowego do kotła a średniej mocy chwilowej agregatów prądotwórczych

We wszystkich tabelach należy zwrócić uwagę na znak współczynnika korelacji. Dodatni oznacza zależność wprost proporcjonalną, a ujemny odwrotnie proporcjonalną. Logicznymi znakami korelacji byłyby:

- Dodatni dla mocy chwilowej AP, ponieważ zwiększając obciążenie generatorów, zwiększa się strumień dolutowy paliwa i tym samym ilość ciepła potrzebna do jego podgrzania. Ponadto wirówka paliwa pracuje z większą częstotliwością.

- Ujemny dla mocy chwilowej SG, ponieważ podczas pracy silnika głównego, pracuje również kocioł utylizacyjny, produkujący parę grzewczą. Czym wyższe obciążenie silnika tym większy strumień masowy spalin i możliwość wytworzenia większego strumienia pary grzewczej.
- Ujemny dla temperatury wody zaburtowej, ponieważ czym niższa temperatura, tym grzane zbiorniki kadłubowe tracą więcej ciepła które należy kompensować parą grzewczą. Ponadto przy niskich temperaturach uruchamiane są odbiorniki ciepła związane z potrzebami socjalnymi załogi.
- Dodatni dla zanurzenia, ponieważ gdy statek ma mniejsze zanurzenie, grzane zbiorniki burtowe mają mniejszą powierzchnię kontaktu z wodą morską, więc tracą mniej ciepła.

Dla stanów manewrów, postoju na kotwicy i cumowania w porcie znaki współczynników korelacji są zgodne z oczekiwaniem, zaś odwrotne znaki pojawiają się dla stanu pływania dla korelacji strumienia ciepła dolotowego do kotła z temperatura wody zaburtowej oraz zanurzeniem. Jednakże pomimo większości prawidłowych znaków, bardzo słabe lub słabe korelacje, nie powinny być brane pod uwagę, z uwagi że ich wykres rozrzutu przypomina chmurę punktów i nawet jeden oddalony punkt może zdecydować o innym znaku współczynnika korelacji. Łącznie trzy korelacje okazały się istotne statystycznie. Są to dla stanu postoju na kotwicy korelacje strumienia ciepła dolotowego z wartościami temperatury wody zaburtowej oraz zanurzenia. Obie korelacje można uznać jako słabe/bardzo słabe. Dla stanu cumowania w porcie istotna statystycznie okazała się korelacja ze średnią dobową mocą chwilową agregatu prądowórczego. Ma ona najwyższy z badanych współczynnik korelacji który można uznać za umiarkowany/słaby.

Porównując współczynniki korelacji tej samej zmiennej dla różnych stanów można zauważyć, że średnia dobowa moc chwilowa agregatów prądowórczych przyjmuje najwyższą wartość korelacji dla postoju w porcie. Korelacja średniej dobowej mocy chwilowej silnika głównego dla stanów pływania i manewrów jest na bardzo zbliżonym poziomie, tak więc dla obu stanów obciążenie ME wpływa tak samo na pracę kotła opalanego. Z kolei korelacja z temperaturą wody zaburtowej dla wszystkich stanów poza postojem na kotwicy przyjmuje wartości bliskie zero, a więc korelacja nie występuje. Korelacja z zanurzeniem praktycznie nie występuje dla stanu cumowania w porcie a jest słaba dla pozostałych. Wynika to z faktu, że podczas pobytu w porcie unika się podgrzewania zbiorników ze względów ekonomicznych.

Żadna korelacja nie jest silna ani bardzo silna. Należy przyjąć, że inne czynniki które nie były badane w tym artykule, a zostały wytypowane jako stałe bądź zakłócenia, powinny mieć bardziej znaczący wpływ na zużycie paliwa przez kocioł opalany.

#### 4. Podsumowanie

W artykule przedstawiono analizę statystyczną wpływu parametrów zewnętrznych na strumień ciepła zawartego w paliwie dolotowym do okrętowego kotła opalanego. Dla każdej ze zmiennych niezależnych określono współczynnik korelacji oraz poziom istotności. Dodatkowo przeanalizowano te parametry dla czterech różnych stanów pływania. W większości przypadków stwierdzono brak korelacji lub określono ją jako nieistotną statystycznie. Najwyższy współczynnik korelacji o wartości 0,391 otrzymano dla wpływu średniej mocy chwilowej agregatu prądowórczego na strumień ciepła w paliwie dolotowym do kotła opalanego dla stanu postoju w

porcie. Dodatkowo statystycznie istotne lecz o słabym współczynniku korelacji okazały się wpływy zanurzenia i temperatury wody zaburtowej dla stanu postoju na kotwicy. Współczynniki korelacji nie wytłumaczyły wystarczająco zmienności wartości zależnej, dlatego też należy wnioskować, że parametry niezależne które nie były tematem tego artykułu są bardziej istotne statystycznie.

## **Bibliografia**

- [1] Bocheński, D., D. Kreft, *Możliwości wykorzystania metod i modeli probabilistycznych w projektowaniu okrętowych instalacji parowych*, *J. Polish CIMEEAC*, vol. 14, 2019
- [2] IMO, *MARPOL Annex VI*, Londyn, 1997
- [3] Meissner, W., *Metody statystyczne w biologii*. Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego: Gdańsk, 2014
- [4] Perepeczko, A., *Okrętowe kotły parowe*. Wydawnictwo Morskie: Gdańsk, 1979
- [5] Werft Zhejiang Ouhua Shipbuilding, *Dokumentacja techniczna statku Blandine*, Zhoushan, 2009