

## PROBLEMATYKA EMISJI TOKSYCZNYCH SKŁADNIKÓW SPALIN SILNIKÓW LOTNICZYCH

*W artykule poruszono problematykę emisji toksycznych składników spalin silników lotniczych. Opisano specyfikę operacji lotniczych ze szczególnym uwzględnieniem etapu startu/lądowania (LTO - landing takeoff operation) oraz metody szacowania wskaźników emisji CO i NOx dla silników odrzutowych samolotów w zależności od wykonywanego manewru/etapu lotu. Bazując na dostępnych raportach i bazach danych ICAO, dokonano wyznaczenia współczynników emisji wybranych toksycznych składników spalin oraz ilości wyemitowanych zanieczyszczeń. Dokonano analizy porównawczej typowych silników stosowanych w samolotach średnio i dalekodystansowych, zarówno tych starszej, jak i nowszej generacji.*

### WSTĘP

Od lat 70tych obserwuje się dynamiczny rozwój technologiczny w każdej gałęzi transportu, co jest głównie związane z coraz większym zapotrzebowaniem na przewóz towarów i ludzi. Intensywnemu rozwojowi transportu drogowego, morskiego i powietrznego, wzrostowi liczby środków transportu, zdolności przewozowych, a także parametrów osiągowych silników towarzyszy wzrost uciążliwości dla środowiska, w tym emisji związków szkodliwych w spalinach ich silników.

Pomimo wdrażania coraz bardziej nowoczesnych rozwiązań technologicznych i konstrukcyjnych, zarówno z uwagi na kryteria ekonomiczne jak i ekologiczne, przewiduje się dalszy wzrost natężenia ruchu zwłaszcza w przypadku transportu morskiego i lotniczego, czego konsekwencją stanowi dalszy wzrost emisji toksycznych składników spalin. Dlatego też, niezwykle istotne jest szacowanie oddziaływania transportu na środowisko, podejmowanie prób ograniczenia tego negatywnego wpływu, zarówno za pomocą rozwiązań technologicznych, jak i legislacyjnych.

### 1. CHARAKTERYSTYKA EMISJI SPALIN SILNIKÓW LOTNICZYCH

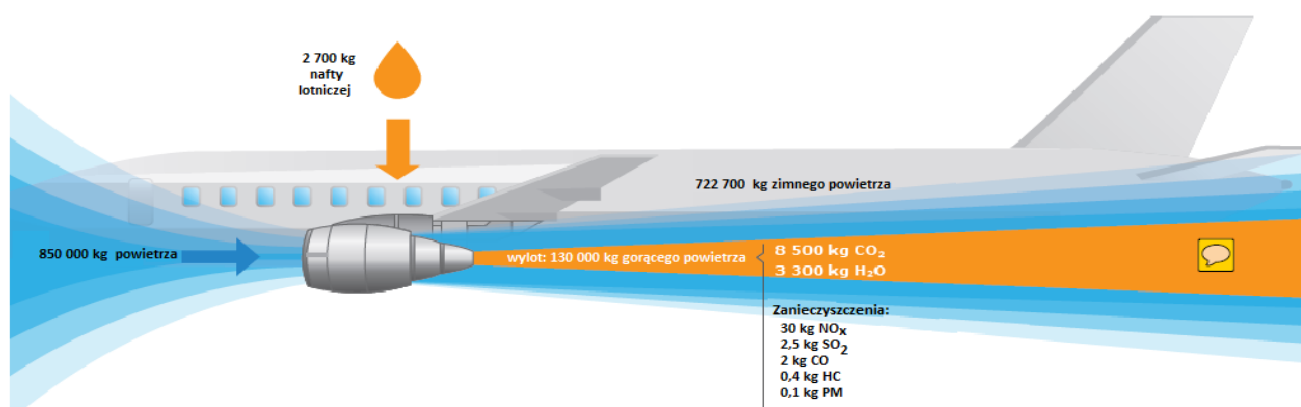
#### 1.1. Zarys problemu

Celem obniżenia zużycia paliwa oraz wartości emisji szkodliwych składników spalin silników lotniczych, prowadzi się obecnie

szeroko zakrojone badania nad opracowaniem nowych rozwiązań napędów lotniczych, na przykład napędy rozproszone, elektryczne wentylatory itp. [7]. Zastosowanie takich nowatorskich rozwiązań w nowobudowanych samolotach będzie w przyszłości skutkowało mniejszymi emisjami związków toksycznych do atmosfery. Jednakże, biorąc pod uwagę wiek samolotów i okres ich eksploatacji (10-15 lat), problem stanowią obecnie eksploatowane samoloty. Szacowanie ich wpływu na środowisko, w szczególności na jakość powietrza atmosferycznego, jest możliwe dzięki szczegółowej analizie generowanej emisji spalin w różnych fazach lotu, począwszy od operacji na płycie lotniska poprzez lot, aż do wylądowania.

W transporcie lotniczym największy udział stanowią jednostki pasażerskie średniego i dalekiego zasięgu, charakteryzujące się silnikami turbinowymi, turbośmigłowymi i wentylatorowymi o dużym ciągu jednostkowym. Zasilane są one naftą lotniczą. Paliwo to posiada wysoką wartość opałową (43 MJ), niższą od pozostałych paliw temperaturę krzepnięcia (poniżej  $-50^{\circ}\text{C}$ ), a także wysoką wartość liczby cetanowej odpowiadającej za samozapłon mieszanki, a w rezultacie ułatwiony rozruch zimnego silnika.

Spaliny lotniczych silników turbinowych zawierają: tlenki azotu ( $\text{NO}_x$ ), tlenki siarki ( $\text{SO}_x$ ), dwutlenek węgla ( $\text{CO}_2$ ), tlenek węgla (CO), niespalone węglowodory (UHC) i cząstki stałe (PM). Związki te, w wyniku dalszych reakcji fotochemicznych przebiegających w atmosferze, powodują szereg niekorzystnych zjawisk (kwaśne deszcze, smog fotochemiczny, zwiększenie stężenia ozonu troposferycznego itp.).



Rys. 1. Emisja typowego silnika dwuprzepływowego [1]

Najwięcej zanieczyszczeń do środowiska wprowadzanych jest przez te jednostki napędowe samolotów pasażerskich i transportowych, które cechują się największą mocą i największym zużyciem paliwa w stosunku do wytwarzanej siły ciągu. Największa ilość związków toksycznych wprowadzana jest w wyższych warstwach atmosfery (8-12 km n.p.m.), czyli na wysokościach na których odbywane są loty długodystansowe. Szacuje się, że tylko od 5 do 10% światowego zużycia paliwa lotniczego występuje na niskich wysokościach (do 1 km) [6].

## 1.2. Charakterystyka emisji w lotnictwie

W ujęciu globalnym, liczba lotów wzrosła znacząco w ostatnim ćwierćwieczu – o 80% między 1990 a 2014 r. i prognozuje się dalszy wzrost o kolejne 45% między 2014 a 2035 r.

W odniesieniu do wskaźników emisji związków szkodliwych w spalinach silników lotniczych, emisja CO<sub>2</sub> wzrosła z 88 do 156 mln ton (o 77%) pomiędzy 1990 a 2005r., ale zaledwie o 5% między 2005 a 2014 r. [1]. Wzrost emisji nie jest tak znaczny, w porównaniu do wzrostu liczby pasażerów w tym samym okresie czasu (2005-2014) (rys.2), co jest spowodowane lepszymi paliwami oraz wymianą starej floty samolotów na nowszą. W okresie tym, średnia ilość paliwa spalane go na pasażerokilometr w samolotach pasażerskich (z wyłączeniem prywatnych odrzutowców) zmniejszyła się o 19%. Jednakże, prognozuje się, że wprowadzanie nowych technologii nie jest w stanie zrównoważyć skutków wzrostu natężenia ruchu lotniczego w przyszłości i mimo nowych rozwiązań technologicznych, prognozuje się wzrost emisji CO<sub>2</sub> o 44% (z 144 Mt w 2005r. do 207 Mt w 2035r.).

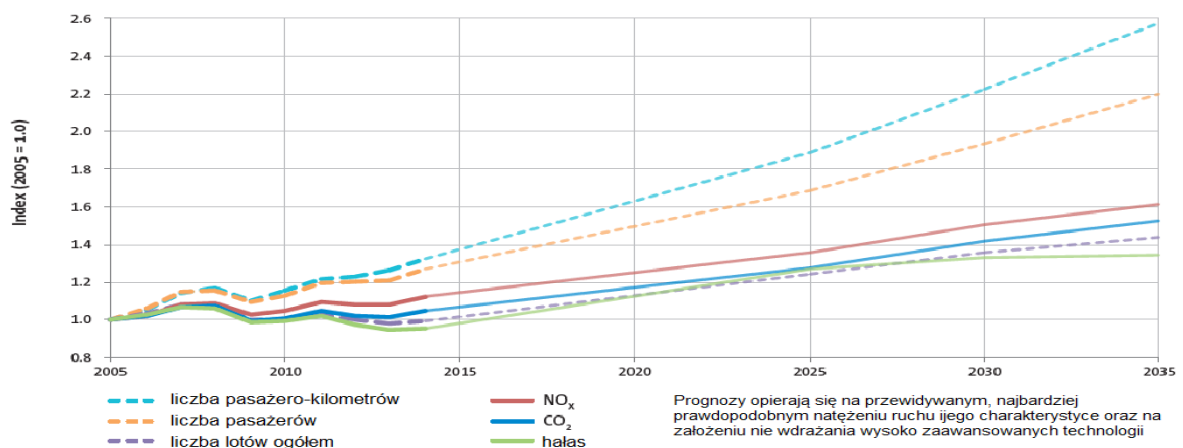
W przypadku NO<sub>x</sub>, również można odnotować znaczący wzrost ich emisji – o 85% (z 316 000 do 585 000 ton) między 1990 a 2005 r., a o 13% między 2005 a 2014r. [1]. Podobnie jak w przypadku emisji CO<sub>2</sub>, prognozuje się dalsze wzrosty emisji NO<sub>x</sub> mimo wprowadzania nowych rozwiązań konstrukcyjnych (stałe wprowadzanie wyższej temperatury spalin przed turbiną wysokiego ciśnienia) – szacuje się, że w 2035 r. emisja NO<sub>x</sub> osiągnie wartość 920 000 ton (co stanowić będzie wzrost o 42% w stosunku do roku 2005).

W okresie 2005-2014 odnotowano zmniejszenie emisji HC, CO oraz nielotnych cząstek stałych PM, ale wzrost o 7% lotnych cząstek stałych. Prognozuje się jednak, że emisja wszystkich tych związków będzie wzrastać na przestrzeni kolejnych 20 lat, co ukazano w tabeli 1.

Tab. 1. Podsumowanie prognozowanych wskaźników emisji składników spalin [1]

	2005 r.	2014 r. (procentowa zmiana wzglę- dem 2005 r.)	Prognoza w 2035 r. Zaawansowana technologia – dotychczasowa technologia (procentowa zmiana względem 2005 r.)
Średnia wartość spalane go paliwa na pasażerokilometr [kg]	0,0388	0,0314 (-19%)	0,0209 – 0,0222 (-46%) (-43%)
CO <sub>2</sub> [Mt]	144	151 (+5%)	207 – 219 (+44%) (+53%)
NO <sub>x</sub> [kt]	650	732 (+13%)	920 – 1049 (+42%) (+61%)
NO <sub>x</sub> poniżej 1 km [kt]	53,3	58,8 (+10%)	73,3 – 83,1 (+37%) (+56%)
HC [kt]	20,8	17,0 (-18%)	22,9 (+10%)
HC poniżej 1 km [kt]	7,8	6,4 (-18%)	11,0 (+40%)
CO [kt]	143	133 (-7%)	206 (+44%)
CO poniżej 1 km [kt]	52,4	48,2 (-8%)	85,5 (+63%)
PM <sub>2,5</sub> [kt]	4,18	4,47 (+7%)	6,93 (+66%)
PM <sub>2,5</sub> poniżej 1 km [kt]	0,27	0,27 (-1%)	0,41 (+50%)
PM <sub>10</sub> [kt]	2,67	2,38 (-11%)	3,16 (+18%)
PM <sub>10</sub> poniżej 1 km [kt]	0,15	0,13 (-14%)	0,17 (+11%)

Chociaż szacuje się, że w ujęciu globalnym transport lotniczy generuje jedynie 2% światowej emisji gazów cieplarnianych, około 6% tlenków azotu i poniżej 1% tlenków siarki [6], problem tych emisji nie może być pomijany ponieważ w pewnym stopniu przyczynia się do pogorszenia jakości powietrza i oddziałuje na elementy środowiska (erozja gleby, niszczenie drzewostanu, zakłócenia w fotosyntezie roślin), a także na zdrowie człowieka (choroby alergiczne, przewlekłe choroby i dysfunkcje układu oddechowego), co zwłaszcza może stanowić problem w rejonach cechujących się dużym natężeniem ruchu lotniczego. Ponadto, z powodu wysokich wartości stężeń cząstek stałych (PM<sub>2,5</sub>) oraz ozonu troposferycznego, emitowanych przez lotniska w obszarach zabudowanych, corocznie notuje się około pięciu tysięcy przedwczesnych zgonów osób mieszkających w promieniu 20 km od lotniska, zaś ponadnormatywne stężenia pyłów respirabilnych i innych cząstek stałych adsorbujących na swojej powierzchni liczne związki nowotworowe i metale ciężkie, powodują globalne straty szacowane na około 20 mld dolarów rocznie [10, 11]. Dlatego



Rys. 2. Prognozowane poziomy hałasu, emisji NO<sub>x</sub> i CO<sub>2</sub> oraz wskaźniki liczby pasażerów, pasażerokilometrów i liczby lotów ogółem w stosunku do wskaźników tych wielkości w 2005 r. [1]

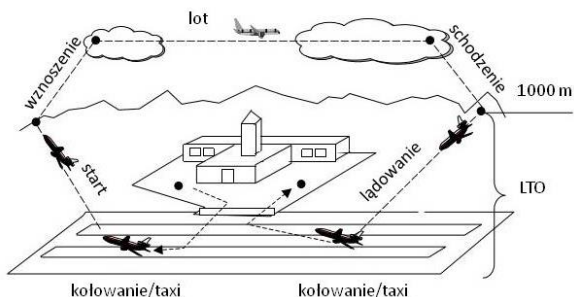
też, istotne jest podejmowanie prób obniżania zużycia paliwa i emisji spalin. Dużo uwagi w przepisach dotyczących emisji spalin z różnych środków transportu poświęca się  $SO_x$  i  $NO_x$ . Przykładowo, w odniesieniu do statków morskich kwestię tę reguluje załącznik VI do konwencji MARPOL, gdzie sukcesywnie zaostrza się limity emisji tych tlenków. W przypadku transportu drogowego, emisja CO, HC,  $NO_x$ , PM jest również limitowana i silniki spalinowe muszą spełniać normy, np. EURO6. W odniesieniu do transportu lotniczego, emisję substancji toksycznych w gazach odlotowych reguluje norma CAEP.

Najważniejszymi kwestiami regulowanymi przez normę są dopuszczalne poziomy emisji gazowych składników spalin silników turbinowych. Stosowane są tu następujące formuły [2]:

- dla węglowodorów (HC):  $Dp / Foo = 19,6$
- dla tlenków węgla (CO):  $Dp / Foo = 118$ ,  
gdzie:  
Dp - masa danego zanieczyszczenia gazowego, wyemitowana w czasie operacji LTO  
Foo - ciąg nominalny
- w przypadku tlenków azotu  $NO_x$ , wyznaczanie stosunku  $Dp / Foo$  zależy od daty produkcji silnika, jego sprężu oraz rozwijanego ciągu maksymalnego, np. dla typu lub modelu silników, dla których data wyprodukowania pierwszego poszczególnego modelu produkcyjnego była przed 1 stycznia 1996 r. oraz dla których data wyprodukowania poszczególnego silnika była przed 1 stycznia 2000 r.:  $Dp / Foo = 40 + 2\pi\omega$   
gdzie:  
 $\pi\omega$  - spręż odniesienia

### 1.3. Etapy lotu samolotu a wartości emisji składników spalin

Lot samolotu składa się z następujących faz: start, wznoszenie do wysokości przelotowej, przelot samolotu, zniżanie, lądowanie na lotnisku docelowym (rys.3).



Rys. 3. Fazy lotu samolotu [9]

Operacje startu i lądowania samolotu (LTO) można podzielić na etapy. Poszczególne etapy różnią się od siebie czasem trwania oraz wartością ciągu pracujących silników. W przypadku startu pierwszym etapem jest odpalenie silników samolotu, odbywa się przy terminalu przed wypchnięciem samolotu na drogę kołowania lub, jeżeli pojazd jest odpowiednio zorientowany, na drodze kołowania. Następnie pojazd kołuje do drogi startowej (taxi). Następuje start, ostatnim etapem jest odejście z nad lotniska na wysokość 1 km. Z kolei lądowanie samolotu dzielimy na: zniżanie nad lotnisko, lądowanie, dobieg na pasie startowym, kołowanie (taxi) do miejsca postoju (rys.4).



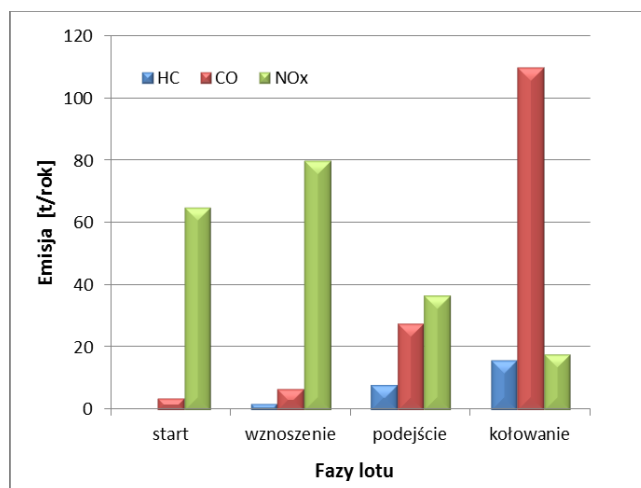
Rys. 4. Etapy operacji samolotu na lotnisku (LTO) [8]

W tabeli 2 przedstawiono rozkład ciągu zespołu napędowego w zależności od etapu operacji na lotnisku.

Tab. 2 Zakresy pracy silników podczas LTO [5]

Operacja	Zakres ciągu [%]	Czas [min]
Start	100	0,7
Odejście z lotniska	85	2,2
Podejście do lądowania	30	4,0
Taxi/bieg jałowy	7	26

W powyższej tabeli pokazano jak na poszczególnych etapach operacji lotniskowych obciążony jest silnik i w jakim czasie. Od zakresu rozwijanej mocy i czasu pracy będzie zależała emisja szkodliwych związków w spalinach. Wraz ze zmianą ciągu będą zmieniały się inne parametry pracy silnika turbinowego, jak temperatura gazów przed turbiną wysokiego ciśnienia, wydatek masowy itp. Ma to wpływ na zróżnicowanie rodzaju związków zawartych w spalinach w zależności od rodzaju manewru. Warto zaznaczyć, że LTO ogranicza się do wysokości około 1 km nad powierzchnią lotniska. Na poniższym wykresie pokazano jak zmienia się ilość i rodzaj emitowanych związków do atmosfery w zależności od wykonywanej operacji dla danego lotniska.



Rys. 5. Emisja związków toksycznych w spalinach w zależności od etapu operacji lotniskowej [9]

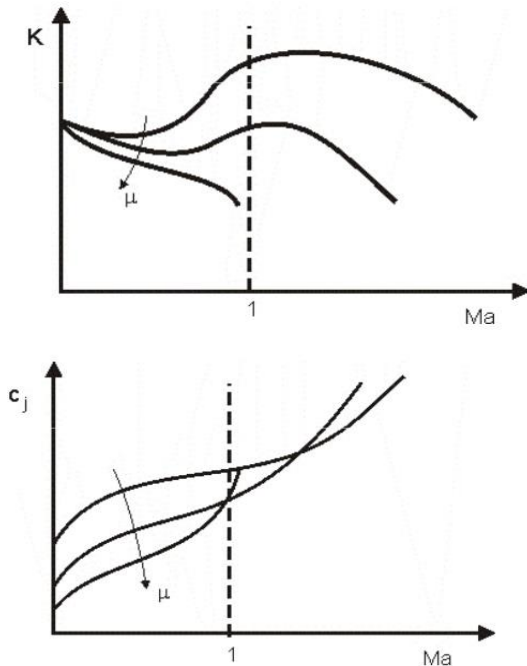
Jak można zauważyć na wykresie, największa emisja CO i HC występuje podczas operacji kołowania samolotu na płycie lotniska. Ma to związek z małym obciążeniem silnika i niepełnym spalaniem zachodzącym w komorze spalania. Z kolei największa emisja  $NO_x$  zachodzi podczas faz startu i wznoszenia. Związane jest to z tym, że silnik pracuje w swoich parametrach obliczeniowych, a reakcja spalania w komorze spalania zachodzi w sposób najbardziej zbliżony do zupełnego.

W trakcie operacji na lotnisku w samolotach weń wyposażonych, pracują jednostki pomocnicze (APU), które dodatkowo powodują wzrost emisji szkodliwych związków emitowanych do atmosfery.

## 2. METODYKA WYZNACZANIA I ANALIZA EMISYJNOŚCI SPALIN

Wartości emisji składników spalin silników samolotów można przybliżać przy pomocy wzorów matematycznych. By określić ilość zanieczyszczeń musimy znać podstawowe dane osiąговые silnika, jak ciąg czy jednostkowe zużycie paliwa. Konieczne jest także podanie czasu pracy silnika przy danym ciągu. Charakterystyki silników lotniczych zależą zarówno od wysokości, jak i prędkości lotu. Na po-

niższych wykresach (rys. 6) zaprezentowano charakterystykę prędkościową silników odrzutowych o różnym stopniu dwuprzepływowości.



**Rys. 6.** Charakterystyka prędkościowa silników dwuprzepływowych o różnym stopniu dwuprzepływowości  $\mu$ .

Warto zauważyć, że dla silnika dwuprzepływowego o dużym stopniu dwuprzepływowości wartość ciągu maleje w funkcji prędkości lotu, tj. im większy stopień dwuprzepływowości tym, wartość ciągu w pobliżu prędkości 1 Ma będzie malała. Silniki tego typu występują w obecnie eksploatowanych odrzutowcach pasażerskich. Z racji tego, iż poruszają się w zakresie 0,6-0,9 Ma nie potrzeby stosowania silników o zdolnych do lotu naddźwiękowego. Z kolei im większy stopień dwuprzepływowości, tym jednostkowe zużycie paliwa jest mniejsze czyniąc ten rodzaj napędu najbardziej ekonomicznym.

Aby wyznaczyć wartości emisji w sposób analityczny, można zastosować następujące zależności [3]:

$$E_{CO} = EI_{CO} \cdot K \cdot c_j \cdot t \cdot z \quad (1)$$

$$E_{NOx} = EI_{NOx} \cdot K \cdot c_j \cdot t \cdot z \quad (2)$$

$$E_{HC} = EI_{HC} \cdot K \cdot c_j \cdot t \cdot z \quad (3)$$

gdzie:

- $E_{CO} / E_{NOx} / E_{HC}$  – emisja poszczególnych substancji [g],
- $EI_{CO} / EI_{NOx} / EI_{HC}$  – współczynniki emisji dla poszczególnych substancji, zależące od typu silnika i zakresu ich pracy [g/kg],
- $K$  – ciąg silnika [N],
- $c_j$  – jednostkowe zużycie paliwa [kg/(N·s)],
- $t$  – czas pracy silnika przy danej wartości ciągu [s],
- $z$  – liczba silników.

Podstawowe dane dotyczące emisji związków szkodliwych przy lotniskach, a także metodologia wyznaczania emisji są dostępne w literaturze przedmiotu [1,2,3,4]. Korzystając z tych danych, możliwe jest wyznaczenie emisji szkodliwych składników spalin silników lotniczych. Tabele 3, 4 i 5 zawierają dane dotyczące średniej emisji CO, NOx oraz HC dla operacji na lotnisku (LTO) oraz współczynniki do

wyznaczania emisji w poszczególnych zakresach pracy dla silników stosowanych w samolotach Boeing 737 oraz Airbus A320. W tabelach 3, 4, 5 porównano te same wskaźniki emisji dla różnych silników – zarówno tych ze starszych generacji samolotów, jak i tych obecnie montowanych. W tabelach 6, 7, 8 podano emisje i współczynniki emisji dla silników stosowanych w samolocie Boeing 767 oraz dla porównania – dla silników z Boeinga 777 oraz Boeinga 787 Dreamliner. Oznaczenie „Dp/Foo” opisuje sumę stosunków masy danego zanieczyszczenia gazowego wyemitowanego podczas danego cyklu pracy do odpowiadającego mu ciągu silnika.

**Tab. 3.** Współczynniki emisji i wartości emisji CO podczas LTO dla silników samolotów B737 i A320 [4]

silnik	$EI_{CO\_Start}$ [g/kg]	$EI_{CO\_wznoszenie}$ [g/kg]	$EI_{CO\_podejście}$ [g/kg]	$EI_{CO\_jałowy}$ [g/kg]	$E_{Srednie} = Dp/Foo$ dla CO [g/kN]
CFM56-7B26/3	0,25	0,16	3,07	30,94	46,81
PW JT8D	1,2	1,9	9,4	35,0	134,7
PW1130G-JM	0,17	0,25	4,55	19,48	23,7
CFM Leap1A	0,22	0,27	2,74	21,40	25,97

Analizując powyższe dane, można zauważyć wzrost wartości współczynników emisji CO dla etapu biegu jałowego. Emisja generowana przez nowsze silniki (PW1130G-JM oraz CFM Leap1A) jest dużo niższa niż przez starsze konstrukcje (CFM56-7B26/3 oraz PW JT8D).

**Tab. 4.** Współczynniki emisji i wartości emisji NOx podczas LTO dla silników samolotów B737 i A320 [4]

silnik	$EI_{NOx\_Start}$ [g/kg]	$EI_{NOx\_wznoszenie}$ [g/kg]	$EI_{NOx\_podejście}$ [g/kg]	$EI_{NOx\_jałowy}$ [g/kg]	$E_{Srednie} Dp/Foo$ NOx [g/kN]
CFM56-7B26/3	21,79	17,08	8,93	4,27	40,71
PW JT8D	18,9	14,6	5,8	2,75	56,1
PW1130G-JM	21,16	16,33	8,99	6,78	29,6
CFM Leap1A	18,77	11,16	8,67	4,63	23,64

Analizując dane zawarte tabeli 4, można zauważyć, że współczynniki emisji dla NOx są większe dla etapów startu i wznoszenia, odwrotnie niż w przypadku emisji CO.

**Tab. 5.** Współczynniki emisji i wartości emisji HC podczas LTO dla silników samolotów B737 i A320 [4]

silnik	$EI_{HC\_Start}$ [g/kg]	$EI_{HC\_wznoszenie}$ [g/kg]	$EI_{HC\_podejście}$ [g/kg]	$EI_{HC\_jałowy}$ [g/kg]	$E_{Srednie} Dp/Foo$ HC [g/kN]
CFM56-7B26/3	0,02	0,02	0,05	1,75	2,58
PW JT8D	0,40	0,45	1,4	10,0	36,8
PW1130G-JM	0,03	0,03	0,04	0,07	0,10
CFM Leap1A	0,02	0,02	0,04	0,28	0,36

Wartości współczynników emisji zawarte w tabeli 5, podobnie jak w przypadku współczynników emisji CO, są najniższe dla etapów startu i wznoszenia, dwukrotnie wyższe dla etapu podejścia, natomiast dla etapu biegu jałowego, mogą być nawet kilkukrotnie wyższe.

**Tab. 6.** Współczynniki emisji i wartości emisji CO podczas LTO dla silników samolotów B767, B777 oraz B787 [4]

silnik	$EI_{CO\_Start}$ [g/kg]	$EI_{CO\_wznoszenie}$ [g/kg]	$EI_{CO\_podejście}$ [g/kg]	$EI_{CO\_jałowy}$ [g/kg]	$E_{Srednie} Dp/Foo$ CO [g/kN]
PW JT9D	0,9	0,9	5,5	66,7	118,9
PW 4000	0,44	0,57	2,00	21,86	30,5
GE CF650A	0,43	0,49	4,35	24,04	32,16
RR RB 211	2,48	4,14	26,38	93,17	205,3
GE Genx	0,32	1,73	2,81	16,39	23,2
RR Trent 1000	0,12	0,15	1,58	15,66	19,08
GE90-94G	0,53	0,45	0,77	8,73	11,26

Dla silników samolotów dalekiego zasięgu, współczynniki emisji i wartości emisji zawarte w tabeli 6, zachowują podobną tendencję jak w przypadku danych zestawionych w tabeli 3. Można zauważyć, że emisja osiąga wyższą wartość w przypadku samolotów dalekiego zasięgu z racji większego ciągu rozwijanego przez silniki, niezależnie od tego czy są to współczesne silniki (PW 4000, GE Genx, RR Trent 1000, GE90-94G), czy silniki starszej generacji (PW JT9D, GE CF650A, RR RB 211). Różnice w wartościach współczynników emisji CO na różnych etapach lotu wynikają z wartości temperatury – im wyższy ciąg silnika, tym wyższa temperatura spalania w komorze spalania i tym wyższe wartości współczynników emisji.

**Tab. 7. Współczynniki emisji i wartości emisji NOx podczas LTO dla silników samolotów B767, B777 oraz B787 [4]**

silnik	E <sub>NOx_Start</sub> [g/kg]	E <sub>NOx_wznoszenie</sub> [g/kg]	E <sub>NOx_podejście</sub> [g/kg]	E <sub>NOx_jalowy</sub> [g/kg]	E <sub>Srednie Dp/Foo NOx</sub> [g/kN]
PW JT9D	44,9	34,9	9,4	3,3	68,7
PW 4000	28,1	22,9	11,6	4,8	48,1
GE CF650A	27,17	23,27	9,72	3,4	47,86
RR RB 211	34,32	25,63	8,05	2,70	54,3
GE Genx	17,22	11,54	9,27	4,66	24,97
RR Trent 1000	40,41	31,77	15,09	5,64	53,8
GE90-94G	46,67	35,87	13,29	5,4	55,81

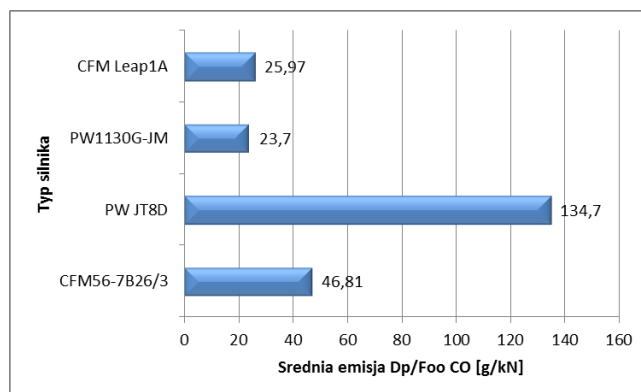
W tabeli 7 dla emisji NOx można zaobserwować podobne zależności jak wcześniej, tj. wzrost emisji NOx wraz ze zwiększeniem ciągu silników.

**Tab. 8. Współczynniki emisji i wartości emisji HC podczas LTO dla silników samolotów B737 i A320 [4]**

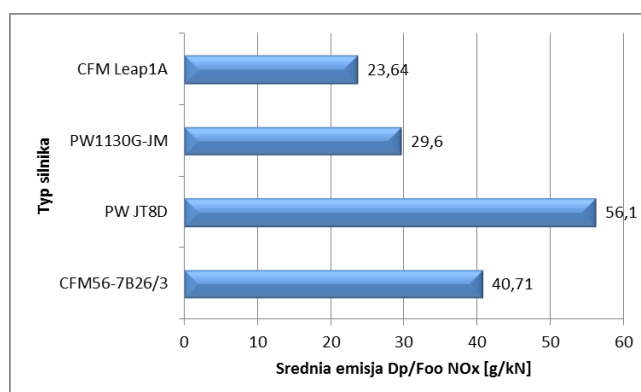
silnik	E <sub>HC_Start</sub> [g/kg]	E <sub>HC_wznoszenie</sub> [g/kg]	E <sub>HC_podejście</sub> [g/kg]	E <sub>HC_jalowy</sub> [g/kg]	E <sub>Srednie Dp/Foo HC</sub> [g/kN]
PW JT9D	0	0	0,5	24,5	42
PW 4000	0,06	0,01	0,13	1,92	2,6
GE CF650A	0,15	0,14	0,31	2,72	3,66
RR RB 211	0,36	0,39	7,73	65,37	132,8
GE Genx	0,02	0,02	0,06	0,58	0,77
RR Trent 1000	0,00	0,00	0,00	0,04	0,04
GE90-94G	0,04	0,04	0,05	0,41	0,51

Jak można zauważyć, podobnie jak w przypadku emisji CO, wartości emisji HC będą wzrastać wraz ze zmniejszaniem ciągu silnika (najniższe wartości emisji są przy starcie, najwyższe przy biegu jałowym). Dla silników PW JT8D oraz PW JT9D oraz RR RB 211, zauważono bardzo wysokie współczynniki emisji, co jest spowodowane dużo starszą konstrukcją tych silników (budowane w latach 70-tych XXw.).

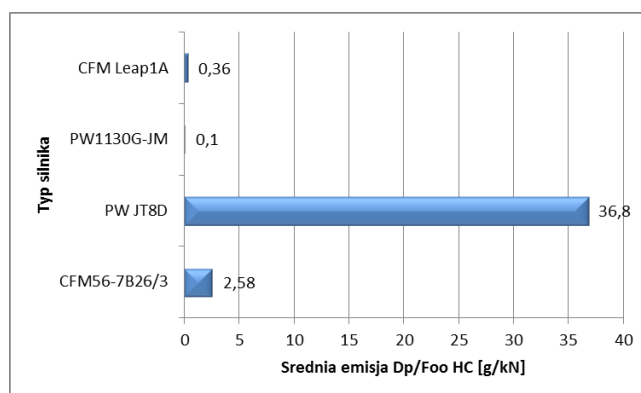
By łatwiej porównać emisję z poszczególnych silników, bazując na powyższych tabelach, dokonano prezentacji graficznej emisji napędów na poniższych wykresach (rys.7–12). W ten sposób można łatwiej porównać parametry emisyjności spalin silników nowej generacji ze starszymi konstrukcjami.



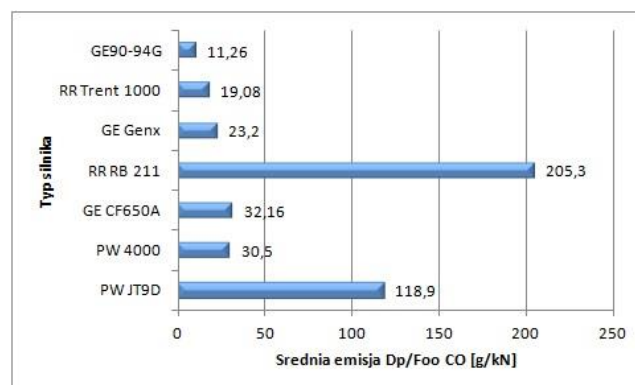
**Rys. 7. Emisja CO dla silników stosowanych w samolotach średniego zasięgu**



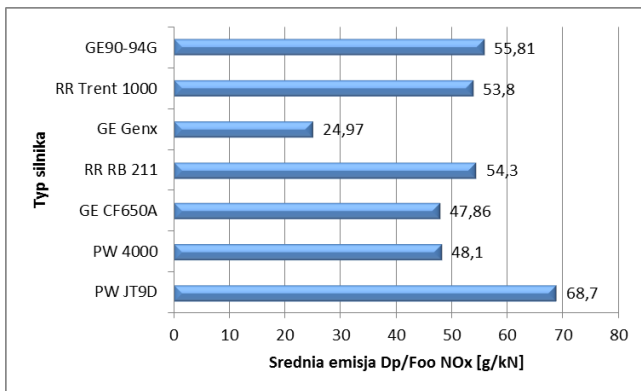
**Rys. 8. Emisja NOx dla silników stosowanych w samolotach średniego zasięgu**



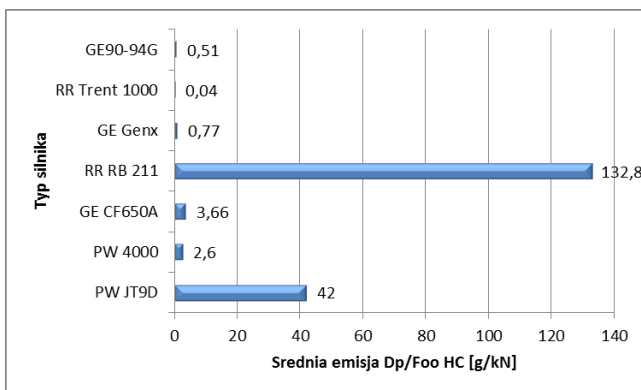
**Rys. 9. Emisja HC dla silników stosowanych w samolotach średniego zasięgu**



**Rys. 10. Emisja CO dla silników stosowanych w samolotach dalekiego zasięgu**



**Rys.11.** Emisja NOx dla silników stosowanych w samolotach dalekiego zasięgu



**Rys.12.** Emisja HC dla silników stosowanych w samolotach dalekiego zasięgu

Jak można zauważyć na wykresach, silniki nowszej generacji (PW 4000, GE Genx, RR Trent 1000, PW1130G-JM, CFM Leap1A) charakteryzują się parokrotnie niższą emisją CO i HC niż silniki starszego typu (PW JT8D, PW JT9D, RR RB 211, CFM56-7B26/3). Związane jest to z dopracowaniem konstrukcji komór spalania oraz optymalizacją samego przebiegu procesu spalania. Duży wpływ na zmniejszenie emisji CO ma także zastosowanie nowoczesnych metod analitycznych i inżynierskich, jak np. symulacje przepływowe CFD (Computational Fluid Dynamic) lub zastosowanie nowych materiałów konstrukcyjnych, jak kompozyty. Niestety wzrost ten okupiony jest zwiększaniem temperatury spalania, o czym wspomniano wcześniej, co powoduje zwiększenie emisji NOx. Dlatego też, zmniejszenie emisji NOx nie jest tak spektakularne jak w przypadku emisji CO – co najwyżej dwukrotnie. W związku z tym wydaje się zasadne prowadzenie dalszych prac nad możliwościami zmniejszania emisji NOx.

## PODSUMOWANIE

Natężenie ruchu lotniczego od lat utrzymuje się w trendzie rosnącym i według prognoz, będzie wzrastać w kolejnych dekadach. Obecnie jedynie unijne porty lotnicze obsługują dziennie 27000 lotów i 2,27 mln pasażerów [1]. Niewątpliwie, lotnictwo wywiera swój wpływ na emisję związków szkodliwych w spalinach. Nie tylko emisja na wysokościach przelotowych oddziałuje negatywnie na środowisko, ale również bliskie sąsiedztwo siedzib ludzkich przy lotniskach i emisja na poziomie ziemi stanowi istotny problem, zwłaszcza w skali lokalnej. Stąd próby uregulowań zarówno prawnych, jak i technicznych związanych z emisją spalin. Stałe doskonalenie konstrukcji silników lotniczych, budowy komór spalania i podnoszenie temperatury spiekania spalin przed turbiną wysokiego ciśnienia powodują znaczne

zmniejszenie wartości emisji CO i HC. Niestety, podnoszenie temperatury roboczej gazu powoduje trudności ze zmniejszeniem emisji NOx. Można zaobserwować, że w zakresie pracy silnika podczas startu i wznoszenia, gdzie temperatura gazu przed turbiną wytornicową osiąga swą wartość obliczeniową (założoną), wartości emisji CO i HC są minimalne. Największa emisja CO i HC będzie generowana przy pracy turbinowego silnika odrzutowego w zakresie małego gazu (kołowanie, postój, dobieg). W przypadku NOx sprawa wygląda odwrotnie – im większa temperatura gazu roboczego, tym większe wartości emisji.

Na podstawie załączonych tabel oraz wykresów można podać następujące wnioski:

1. Wzrost wartości ciągu silnika podczas operacji na płycie lotniska powoduje spadek emisji CO i HC, wzrasta wartość emisji NOx. Ma to związek z większym obciążeniem silnika i wyższą temperaturą spalania.
2. Silniki nowej generacji mogą emitować prawie dwukrotnie mniejszą ilość CO w przeliczeniu na kN ciągu silnika, jak zilustrowano na przykładzie silników PWJT9D oraz PW 4000 montowanych w samolocie Boeing 767 lub silników CFM 56 i LEAP 1A z Airbusa A320 i 320Neo.
3. Zmniejszenie wartości emisji NOx w porównaniu do CO i HC nie jest tak znaczne, np. przy silnikach JT9D i PW4000 – zmniejszenie wartości emisji CO było czterokrotne, podczas gdy wartości emisji NOx uległy zmniejszeniu jedynie o 30%.

Powyższa analiza nasuwa pytanie, czy może warto byłoby zastanowić się nad tym, czy wyposażanie samolotów podczas remontów w nowe wersje silników nie przyniosłoby znaczącego obniżenia emisji związków szkodliwych w spalinach ogółem emitowanych przez lotnictwo cywilne.

## BIBLIOGRAFIA

1. EASA, EEA, EUROCONTROL, *European Aviation Environmental Report*, 2016.
2. ICAO, *Międzynarodowe normy i zalecane metody postępowania. Załącznik 16 do Konwencji o międzynarodowym lotnictwie cywilnym – Ochrona Środowiska. Tom II – Emisje z silników statków powietrznych*. Organizacja Międzynarodowego Lotnictwa Cywilnego, Wydanie trzecie, 2008.
3. ICAO, *Airport Air Quality Manual*, Doc. No.9889, First Edition, 2011.
4. ICAO, *Aircraft Engine Emissions Databank – approved emissions levels*. [www.easa.europa.eu](http://www.easa.europa.eu).
5. Khardi S., Kurniawan J., *Combined effect of Aircraft Noise and Pollutant Emissions in the Intermediate Atmospheric Layers*. International Joint Research Project, Universitas Indonesia – Indonesia INRETS-LTE Report n° 1010, INRETS – FRANCE, 2010.
6. Kim B. Y., Fleming G. G. et al., *System for assessing Aviation's Global Emissions (SAGE). Part 1: model description and inventory results*. Transp. Res. D 12, 2007.
7. Łukasik B., *Analysis of the possibility of using full electric technologies for future aircraft propulsion system, in terms of mission energy consumption, Nox/CO2 emission and noise reduction. PH.D Thesis. Instytut Lotnictwa, Warszawa 2017*.
8. Majka A., Sybilski K., *Emission and greenhouse effects related to the GABRIEL concept*. Journal of Environmental Engineering. Project, 2014.
9. Tolga E., *Estimation of Engine Emissions from Commercial Aircraft at a Midsized Turkish Airport*, Journal of Environmental Engineering. ASCE, 2008.
10. Schäfer W. A., Waitz A. I., 2014. *Air transportation and environment*. Transp. Policy 34, 2014.

11. WHO, *Air quality guideline. Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. Global update 2005*, World Health Organization, 2006.

### Issues concerning toxic exhausts emission of aircraft engines

*The paper presents the issues of emission of toxic compounds in exhaust gases of aviation engines. The specifics of aviation operations with particular focus on the landing take-off operation (LTO) and methods for estimating CO and NOx emission factors for aircraft jet engines, depending on the maneuver /flight stage, were described. Based on available ICAO*

*reports and databases, emission factors for selected toxic exhaust components and loads of those pollutant emissions were determined. A comparative analysis of typical engines used in medium and long haul aircrafts, both older and newer was performed.*

Autorzy:

dr inż. **Małgorzata Pawlak** – Akademia Morska w Gdyni, Wydział Nawigacyjny, Katedra Eksploatacji Statku.

mgr inż. **Michał Kuźniar** – Politechnika Rzeszowska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Katedra Samolotów i Silników Lotniczych.