

dr inż. Bożena Kukfisz

*Wydział Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego
Szkoła Główna Służby Pożarniczej*

prof. dr hab. inż. Andrzej Maranda

*Wydział Nowych Technologii i Chemii
Wojskowa Akademia Techniczna im. gen. S. Kaliskiego*

dr hab. inż. Bogdan Florczak

Instytut Przemysłu Organicznego

Koncepcja zastosowania analizy cyklu życia w ocenie środowiskowej stałych heterogenicznych paliw raketowych

Abstrakt

W artykule przedstawiono wyniki analizy porównawczej sześciu składów stałych heterogenicznych paliw raketowych, zawierających jako utleniacz tylko chloran(VII) amonu (AP), tylko azotan(V) amonu lub chloran(VII) amonu (AP) i azotan(V) amonu lub chloran(VII) amonu (AP) i azotan(V) sodu (NaNO_3) i zawierających jako plastyfikatory adypinian dioktylu (DOA) oraz jako lepiszcze syntetyczne kauuczki HTPB lub PBAN. Analizę porównawczą przeprowadzono w oparciu o metodę Ekowskaźnika dla jednej kategorii wpływu zmiany klimatu w ramach kategorii szkody zdrowie ludzkie. Analizowano wpływ gazowych produktów spalania poprzez potencjały globalnego ocieplenia dla warunków stałego ciśnienia w komorze wynoszącego 7 MPa i ciśnienia na wylocie komory równego 0,1 MPa. Wykorzystano wersję hierarchiczną w ramach oceny wielkości wpływu. Analiza wykazała, że dla każdego z analizowanych paliw raketowych produkty gazowe na wylocie komory mają wyższą wartość, łączną liczbę Ekowskaźnika, czyli wyższy potencjalny wpływ na zmiany klimatu.

Słowa kluczowe: paliwa raketowe, produkty spalania, ekowskaźnik

The Concept of the Use of Life Cycle Analysis in the Environmental Assessment of the Heterogeneous Solid Rocket Propellants Based on the HTPB Rubber and the PBAN

Abstract

The paper presents results of a comparative analysis of six fixed compositions of heterogeneous rocket fuels containing only the ammonium perchlorate (AP), only the ammonium nitrate or the ammonium perchlorate (AP) and the ammonium trioxochlorate or the ammonium perchlorate (AP) and the sodium nitrate (NaN) as the oxidiser, and as plasticizer containing the di-octyl adipate (DOA) and the HTPB or the PBAN rubbers as the synthetic binders. A comparative analysis was carried out based on the Eco-indicator method for a single category of climate change impact under the category of the human life damage. The analysis was carried out of the impact of the gaseous burning products by the global warming potential for the constant pressure conditions in the chamber equalling to 7MPa and pressure on the chamber outlet equalling to 0.1 MPa. Use was made of the hierarchical version under appraisal of the magnitude of the exerted impact. The analysis has shown that for each of the analysed rocket fuels gaseous products on the outfall of the chamber have a higher total value of the number of points of the eco-indicator, i.e. a higher potential impact on the climate changes.

Keywords: rocket fuels, combustion products, eco-indicator

Wstęp

Aktualnie metoda oceny oddziaływania na środowisko EIA (ang. *Environmental Impact Assessment*) oraz analiza cyklu życia produktu LCA (ang. *Life Cycle Analysis*) najlepiej odzwierciedlają rzeczywisty wpływ człowieka na środowisko. Pierwsza z metod znajduje zastosowanie głównie przy lokalizacji inwestycji gospodarczych, a druga, zwana także ekobilansem, doskonale nadaje się do kompleksowych badań produktów. LCA jest stosunkowo nową techniką zarządzania środowiskowego. Należy do niewielu narzędzi stwarzających podstawy do identyfikacji, kwantyfikacji i oceny wpływu oraz ustalenia sposobów poprawy jakości środowiska. Jednym z podstawowych założeń LCA

jest badanie aspektów środowiskowych i potencjalnych wpływów w całym okresie życia wyrobu (tj. „od kołyski do grobu”) począwszy od pozyskania surowców przez produkcję, użytkowanie, aż do momentu kiedy stanie się odpadem i zostanie poddany procesom odzysku, w tym recyklingu lub unieszkodliwieniu. Dlatego LCA daje możliwość porównania oddziaływania na środowisko różnych towarów o podobnym zastosowaniu na różnych etapach ich wykorzystania [1–7].

1. Metodyka badawcza

Normy PN-EN ISO 14040:2009 [8] i PN-EN ISO 14044:2009 [9] skutecznie uporządkowały problematykę zarządzania środowiskiem i zdefiniowały jej zasady oraz ustanowiły wiele standardów. Norma „wprowadzająca” PN-EN ISO 14040:2009 omawia podstawowe zasady oceny tzw. „cyklu życia produktu”. LCA materiałów uwzględnia zużycie surowców, zużycie energii, transport oraz analizę tzw. wyjść, czyli odpadów, emisji zanieczyszczeń do powietrza, wody i gleby. Metoda badawcza wg tych norm definiuje cztery podstawowe etapy przeprowadzania tej analizy, a mianowicie definicję celu, zakresu badań, analizę inwentarzową oraz interpretację otrzymanych wyników.

W etapie pierwszym (określenie celu i zakresu) powinno się wskazać zamierzone zastosowanie, powody prowadzenia badań i odbiorcę, tj. komu zamierza się zakomunikować wyniki. Przy ustalaniu zakresu istotne jest zdefiniowanie systemu wyrobu oraz jednostki funkcjonalnej. System wyrobu to zbiór materiałowo i energetycznie połączonych procesów jednostkowych spełniających jedną lub więcej określonych funkcji. Proces jednostkowy to najmniejsza część systemu wyrobu, dla której gromadzone są dane. Jednostka funkcjonalna to podstawowa jednostka miary, dla której przeprowadzane są obliczenia i przedstawiane rezultaty. Jednostką funkcjonalną może być np. 1Mg produktu, 1MJ energii lub 1 m² powierzchni.

W etapie drugim (analiza zbioru, Life Cycle Inventory, LCI) należy zgromadzić i określić zbiór wejść (materiałów i energii) i wyjść (odpady, emisje), które są przyporządkowane do procesów jednostkowych znajdujących się w strukturze systemu wyrobu. LCI bazuje na bilansie materiałowym i energetycznym.

Trzeci etap obejmuje ocenę wpływu cyklu życia (LCIA – ang. *Life Cycle Impact Assessment*). LCIA polega na dokonaniu wpływu na środowisko przyrodnicze w ramach różnych problemów środowiskowych (tzw. kategorii

wpływu) np. eutrofizacja, zmiany klimatu. Faza ta wiąże wyniki poprzedniego etapu ze wskaźnikami oceny wpływu danego procesu wytwórczego na środowisko.

Ostatni etap stanowi interpretacja wyników. Celem interpretacji jest analiza wyników uzyskanych w ramach poszczególnych etapów, a także wyjaśnienie ograniczeń przeprowadzonego badania (np. brak lub niska jakość danych) i określenie ich wpływu na końcowe rezultaty.

Przeprowadzenie analizy LCA daje możliwość zapobiegania problemom środowiskowym na etapie projektowania, planowania i rozwoju wyrobów. LCA umożliwia udoskonalanie wyrobów (np. ocena i porównanie rozwiązań technologicznych). LCA ma zastosowanie także w planowaniu strategicznym (np. umożliwia identyfikację środowiskowo słabych punktów w procesach produkcyjnych i cyklach życia wyrobów). Przeprowadzając analizę LCA, wdrażany jest system zarządzania środowiskowego w oparciu o normę ISO 14001 i znakowania środowiskowego.

W artykule opisany zostanie wpływ gazowych produktów spalania wytypowanych sześciu składów paliw raketowych zawierających jako utleniacz tylko chloran(VII) amonu (AP), tylko azotan(V) amonu lub chloran(VII) amonu (AP) i azotan(V) amonu lub chloran(VII) amonu (AP) i azotan sodu (NaN) i zawierających jako plastyfikator adypinian dioktylu (DOA) oraz jako lepiszcze syntetyczne kauczuki HTPB lub PBAN w oparciu o metodę Ekowskaźnika dla jednej kategorii wpływu zmiany klimatu w ramach kategorii szkody zdrowie ludzkie.

Analizowane paliwa raketowe są wykorzystywane do napędów raketowych, np. w promach i raketach kosmicznych. Dominującą ich część stanowią paliwa chemiczne, mimo prób zastosowania innych źródeł energii, jak jądrowa, fotonowa czy elektromagnetyczna. Dzielą się one na ciekłe, stałe i hybrydowe. Paliwa raketowe stałe dzielimy na homogeniczne i heterogeniczne. Pomimo relatywnie długiego czasu ich stosowania w dalszym ciągu prowadzone są prace w celu modyfikacji ich właściwości termodynamicznych, balistycznych i użytkowych [10–33].

2. Kategoria wpływu – zmiany klimatu w metodzie Ekowskaźnika

Często metodologia w LCA oparta jest na metodzie Ekowskaźnika. Metodyka ta stanowi skuteczne narzędzie do porównywania poszczególnych rodzajów

materiałów o podobnym zastosowaniu i umożliwia wybór wyrobów proekologicznych zarówno przez konsumentów, jak i producentów, w tym dostawców i podwykonawców.

Kategoria szkody zdrowie ludzkie jest pierwszą z trzech kategorii szkód w metodzie Ekowskażnika, składa się z sześciu kategorii wpływu, ale ma wspólną jednostkę ich charakteryzowania tzn. skalę DALY opracowaną przez Murray'a [34] i stosowaną aktualnie przez Bank Światowy oraz Światową Organizację Zdrowia. Wspólna jednostka jest możliwa ze względu na stosowane punkty końcowe, a nie punkty pośrednie, jak w metodzie CML Baseline. Skala DALY różnym schorzeniom przypisuje różne wagi od zera dla założonego idealnego zdrowia lub jeden w przypadku zgonu. DALY można wyliczać z liczby lat straconych w wyniku przedwczesnej śmierci YLL (ang. *Years Life Lost*), poprzez wymnożenie liczby przypadków przez wagę ze skali DALY oraz liczbę lat straconych życia wskutek przedwczesnej śmierci. Można również wyznaczać jednostkę DALY dla zachorowań nieprowadzących do zgonu na podstawie liczby lat przeżytych z danym schorzeniem YLD (ang. *Years Life Disabled*) poprzez liczbę takich przypadków przemnożoną przez wagę ze skali DALY.

W ramach kategorii szkody zdrowie ludzkie w metodzie Ekowskażnika wymienić można sześć kategorii wpływu: rakotwórczość, działanie na drogi oddechowe związkami organicznymi, działanie na drogi oddechowe związkami nieorganicznymi, zmiany klimatu, promieniowanie jonizacyjne i niszczenie ozonu stratosferycznego.

Kategoria szkody zmiany klimatu wykorzystuje Model Międzynarodowego Zespołu ds. Zmian Klimatu IPCC (ang. *Intergovernmental Panel on Climate Change*) i służy do oceny kategorii wpływu w metodzie Ekowskażnika poprzez potencjały globalnego ocieplenia GWP (ang. *Global Warming Potential*) wyrażone w kg ditlenku węgla na kg emisji na podstawie modelu FUND (ang. *The Climate Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution*) opracowanej przez Tola [35], który został dostosowany do LCA. Badania miały na celu określenie wpływu emisji gazów cieplarnianych na zdrowie człowieka, w szczególności wzrostu liczby zachorowań i zgonów, zmiany w zasięgach chorób rozprzestrzenianych przez infekcje oraz zwiększenie ryzyka chorób infekcyjnych. Zatem kategorie wpływu są wyrażone analogicznie jak w metodzie CML Baseline, z tym że w metodzie Ekowskażnika potencjał GWP wyznaczony jest poprzez współczynnik szkody dla jednej

z trzech substancji odniesienia na podstawie ich czasu życia. Zakłada się, np. wg badań Toł'a, że gazy z czasem życia poniżej 20 lat zachowują się jak metan, gazy z czasem życia $20 \div 110$ lat zachowują się jak ditlenek węgla, a gazy z czasem życia powyżej 110 lat zachowują się jak tlenek diazotu.

3. Szacowanie numeryczne produktów spalania stałych heterogenicznych paliw raketowych (SHPR)

Jednym z programów, który pozwala na oszacowanie numeryczne wartości parametrów termochemicznych i termodynamicznych oraz produktów powstających podczas spalania stałych heterogenicznych paliw raketowych (SHPR) przy stałym ciśnieniu jest program ICT-Thermodynamic-Code [36]. Metoda ta wykorzystuje prawo działania mas i bilansu masy do obliczenia równowag chemicznych i umożliwia obliczenie 75 produktów powstających podczas reakcji spalania, z których 40 może być w stanie ciekłym lub stałym. Do obliczeń stosowane jest równanie stanu gazu doskonałego.

4. Wyniki potencjalnego wpływu na zmiany klimatu analizowanych SHPR

Wytypowane do analizy składy paliw raketowych oraz ilości wydzielonych produktów gazowych w postaci CO and CO₂ zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Składy wytypowanych do badań stałych heterogenicznych paliw raketowych na bazie HTPB i PBAN oraz ilości wydzielonych produktów gazowych w postaci CO and CO₂

Nazwa stałego heterogenicznego paliwa raketowego (SHPR)	Skład	Ciśnienie pomiaru [MPa]	Temperatura pomiaru [K]	Ilość wydzielonego CO [%mol]	Ilość wydzielonego CO ₂ [%mol]
SHPR _{1a}	75% AP, 10% Al, 3% DOA, 12% HTPB	7	3145	25,779	5,133
SHPR _{1b}	75% AP, 10% Al, 3% DOA, 12% HTPB	0,1	1687	23,437	8,818

cd. Tabeli 1.

Nazwa stałego heterogenicznego paliwa raketowego (SHPR)	Skład	Ciśnienie pomiaru [MPa]	Temperatura pomiaru [K]	Ilość wydzielonego CO [%mol]	Ilość wydzielonego CO ₂ [%mol]
SHPR _{2a}	75% AP, 10% Al, 3% DOA, 12% PBAN	7	3291	22,725	6,279
SHPR _{2b}	75% AP, 10% Al, 3% DOA, 12% PBAN	0,1	1866	20,614	9,601
SHPR _{3a}	75% AN, 10% Al, 3% DOA, 12% PBAN	7	2364	22,958	5,916
SHPR _{3b}	75% AN, 10% Al, 3% DOA, 12% PBAN	0,1	1128	20,312	10,076
SHPR _{4a}	75% AN, 10% Al, 3% DOA, 12% HTPB	7	2279	25,673	5,301
SHPR _{4b}	75% AN, 10% Al, 3% DOA, 12% HTPB	0,1	2285	23,316	9,008
SHPR _{5a}	50% AP, 25% NaNO ₃ , 10% Al, 3% DOA, 12% HTPB	7	3013	24,981	6,392
SHPR _{5b}	50% AP, 25% NaNO ₃ , 10% Al, 3% DOA, 12% HTPB	0,1	1655	22,407	10,437
SHPR _{6a}	50% AP, 25% NaNO ₃ , 10% Al, 3% DOA, 12% PBAN	7	3185	21,591	8,066
SHPR _{6b}	50% AP, 25% NaNO ₃ , 10% Al, 3% DOA, 12% PBAN	0,1	1836	19,370	11,557

Źródło: opracowanie własne

Wyniki obliczeń dotyczą składów paliw zawierających jako utleniacz: tylko chloran(VII) amonu (AP), tylko azotan(V) amonu lub chloran(VII) amonu (AP) i azotan(V) amonu lub chloran(VII) amonu (AP) i azotan sodu (NaN). Zawierających jako plastyfikator adypinian dioktylu (DOA) oraz jako lepiszcze syntetyczne kauczuki HTPB lub PBAN. Obliczenia przeprowadzono dla warunków stałego ciśnienia w komorze wynoszącego 7 MPa i ciśnienia po rozprężeniu się gazów wydostających się z dyszy silnika komory równego 0,1 MPa. Paliwa o powyższych składach należą do materiałów wybuchowych miotających mających zastosowanie m.in. w silnikach raketowych oraz również mogą być stosowane w przemyśle wydobywczym ropy i gazu.

Ponadto, w ramach oceny wielkości wpływu w metodzie Ekowskażnika, wykorzystano tzw. wersję kulturową oferowaną przez firmę PreConsultants. Istnieją wersje hierarchiczne (H), indywidualistyczne (I) oraz egalitarne (E). W ramach każdej z tych wersji mogą być stosowane średnie kryteria ważenia (A) lub ważenia typowe dla danego podejścia (H, E lub I). W pracy zastosowano wersję H/A. W tabeli 2 zaprezentowano kryteria ważenia i normalizowania stosowane w różnych wersjach kulturowych w metodzie Ekowskażnika.

Tabela 2. Kryteria ważenia i normalizowania stosowane w metodzie Ekowskażnika w różnych wersjach kulturowych

Kryterium	Normalizowania	Jednostka	Ważenia	Jednostka	Normalizowania	Jednostka	Ważenia	Jednostka
Wersja kulturowa	I/A				I/I			
Zdrowie ludzkie	2,149E ²	[DALY]	400	[Pt]	2,149E ²	[DALY]	550	[Pt]
Jakość ekosystemu	1,784E ⁻⁴	[PDF*m ²]	400	[Pt]	1,784E ⁻⁴	[PDF*m ²]	250	[Pt]
Wykorzystanie zasobów	2,878E ⁻⁸	MJ	200	[Pt]	2,878E ⁻⁸	MJ	200	[Pt]

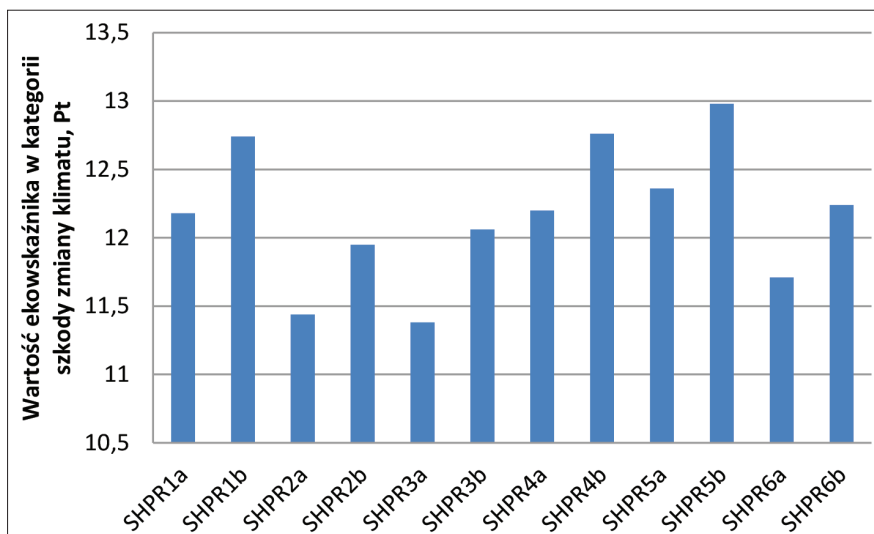
cd. Tabeli 2.

Kryterium	Normalizowania	Jednostka	Ważenia	Jednostka	Normalizowania	Jednostka	Ważenia	Jednostka
Wersja kulturowa	H/A				H/H			
Zdrowie ludzkie	1,141E ²	[DALY]	400	[Pt]	1,141E ²	[DALY]	300	[Pt]
Jakość ekosystemu	1,748E ⁻⁴	[PDF*m ²]	400	[Pt]	1,748E ⁻⁴	[PDF*m ²]	400	[Pt]
Wykorzystanie zasobów	1,325E ⁻⁴	MJ	200	[Pt]	1,325E ⁻⁴	MJ	300	[Pt]
Wersja kulturowa	E/A				E/I			
Zdrowie ludzkie	1,132E ²	[DALY]	400	[Pt]	1,132E ²	[DALY]	300	[Pt]
Jakość ekosystemu	1,748E ⁻⁴	[PDF*m ²]	400	[Pt]	1,748E ⁻⁴	[PDF*m ²]	500	[Pt]
Wykorzystanie zasobów	1,788E ⁻⁴	MJ	200	[Pt]	1,788E ⁻⁴	MJ	200	[Pt]

Źródło: opracowanie własne

Kryteria normalizowania stosowane w wersjach kulturowych informują o wielkościach strumieni odniesienia wyrażających uśrednioną roczną wielkość wpływu na mieszkańca Europy, do których odnoszony jest etap normalizowania. Kryteria ważenia informują o ważności danej kategorii szkody. Na podstawie tabeli 2 można wnioskować, że w wersji kulturowej H/A większe znaczenie przykładają się do zaburzeń w zakresie zdrowia człowieka i środowiska (wartość ważenia 400), aniżeli do zasobów naturalnych (wartość ważenia 200). Wszystkie wersje kulturowe ze średnimi kryteriami ważenia tzn. E/A, I/A, H/A charakteryzują się taką proporcją. Natomiast kryteria normalizowania są odmienne.

Na rys. 1 przedstawiono wyniki obliczeń kategorii wpływu zmiany klimatu w metodzie Ekowskaźnika dla 1 kg każdego z wytypowanych składów paliw raketowych.



Rys. 1. Wartości Ekowskaźnika w kategorii szkody zmiany klimatu dla analizowanych stałych heterogenicznych paliw rakietowych w komorze silnika i po rozprężeniu się gazów

Źródło: opracowanie własne

Podsumowanie

Przeprowadzenie analizy cyklu życia dla produktu, jakim jest forma użytkowa wybranych heterogenicznych paliw rakietowych jest trudna z uwagi na brak specyficznych danych w programie dedykowanym do tego rodzaju analiz tzn. programie SimaPro. Produkty gazowe w komorze silnika i poza nią po rozprężeniu się gazów wydostają się z dyszy silnika do otoczenia znajdują się w stanie gazowym, stałym oraz ciekłym. Brakuje znaczącej ilości danych dotyczących wpływu w kategorii szkody jakoś ekosystemu lub kategorii szkody zasoby, w szczególności dla produktów takich, jak $AlCl$, $AlCl_2$, $AlCl_3$ czy stałego lub ciekłego Al_2O_3 , które istnieją tylko w bardzo małych ilościach w warunkach wysokiej temperatury i wysokiego ciśnienia, czyli w komorze silnika.

Z uwagi na analizowaną kategorię wpływu zmiany klimatu wzrost potencjału globalnego ocieplenia dla każdego z analizowanych paliw rakietowych po rozprężeniu się gazów wydostających się z dyszy silnika w odniesieniu do produktów gazowych w komorze silnika wynikał z obliczeń numerycz-

nych, które wskazują na nieznaczny spadek tlenku węgla po rozprężeniu się gazów wydostających się z dyszy silnika o około 10% przy jednoczesnym praktycznie dwukrotnym wzroście zawartości dwutlenku węgla po rozprężeniu się gazów do wartości ciśnienia atmosferycznego poza komorą silnika w stosunku do zawartości określonej w komorze silnika. Przykładowo dla trzeciego analizowanego składu paliwa raketowego (SHPR_{3a}) w komorze silnika odnotowano 22,958%mol CO i 5,915%mol CO₂, a po rozprężeniu się gazów wydostających się z dyszy silnika (SHPR_{3b}) odnotowano 20,31%mol CO i 10%mol CO₂. Taka tendencja jest prawidłowa dla wszystkich analizowanych składów paliw raketowych i uzasadnia otrzymane wyniki porównawcze analizy środowiskowej w kategorii szkody zdrowie człowieka na podstawie kategorii wpływu zmiany klimatu.

Zaprezentowana w pracy metodyka może stanowić skuteczne narzędzie do porównywania poszczególnych rodzajów grup materiałów, w tym także wyrobów na bazie paliw raketowych. Powyższa metodyka będzie w przyszłości nieoceniona przy podejmowaniu decyzji związanych z ich ekologiczną oceną również w technologii ich wytwarzania. Efektem końcowym LCA w przypadku pełnej walidacji analizowanych kategorii szkody poprzez skwantyfikowanie i ocenę wpływu, a także ustalenie sposobów poprawy jakości środowiska w całym okresie cyklu życia wyrobu powinna być podstawą do korzystania z innych narzędzi oceny tj. szacowanie ryzyka, ocena kosztów cyklu życia (LCC) czy też znakowania środowiskowego (ekoznak, deklaracje środowiskowe).

Literatura

- [1] Kuczyńska B., Maranda A., Analiza zbioru wejść i wyjść (LCI) procesów produkcji wybranych górniczych materiałów wybuchowych, *Materiały Wysokoenergetyczne* 2011, 3, 122–135.
- [2] Kuczyńska B., Maranda A., Ecological analysis of production processes selected mining explosives, VIII Międzynarodowa Konferencja Naukowa IPOEX 2011 Materiały Wybuchowe Badania – Zastosowanie – Bezpieczeństwo, Ustroń, Polska, 06–08.06.2011.
- [3] Maranda A., Kuczyńska B., Zarządzanie środowiskowe materiałami wybuchowymi, *Materiały Wysokoenergetyczne* 2010, 2, 135–142.

- [4] Kuczyńska B., Maranda A., Bojarska-Kraus M., Prace Naukowe GIG, Bezpieczeństwo Robót Strzałowych w Górnictwie, *Górnictwo i Środowisko* 2010, nr 4/2, 73–83.
- [5] Kuczyńska B., Maranda A., Conference Proceedings from International Conference Blasting Techniques 2010, Stara Leśna, 20–21.05.2010.
- [6] Kuczyńska B., Maranda A., Conference Proceedings from the International Conference Blasting Techniques 2010, 20–21.05.2010, Stara Leśna, 11–120.
- [7] Kuczyńska B., Maranda A., Conference Proceedings 6th International Conference IPOEX 2009 Explosives. Research-Application-Safety, 01-03.06.2009, Ustroń Zawodzie, 47.
- [8] PN-EN ISO 14040:2009 Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia – Zasady i struktura.
- [9] PN-EN ISO 14044:2009 Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia – Wymagania i wytyczne.
- [10] Koślik P., Staś J., Wilk Z., Zakrzewski A., Research of High Explosives Based on RDX, HMX and CL-20 in the Small Scale Underwater Test Examination, *Central European Journal of Energetic Materials* 2007, 4(3), 3–14.
- [11] Florczak B., Investigation of an Aluminized Binder/AP Composite Propellant Containing FOX-7., *Central European Journal of Energetic Materials* 2008, 5(3-4), 65–76.
- [12] Florczak B., A Comparison of Properties of Aluminized Composite Propellants Containing HMX and FOX-7, *Central European Journal of Energetic Materials* 2008, 5(3-4), 103–111.
- [13] Zalewski R., Pyrz M., Wolszakiewicz T., Modeling of Solid Propellants Viscoplastic Behavior Using Evolutionary Algorithms, *Central European Journal of Energetic Materials* 2010, 7(4), 289–300.
- [14] Florczak B., Białek M., Cholewiak A., Determination of the Internal Ballistic Properties of Solid Heterogeneous Rocket Propellants, *Central European Journal of Energetic Materials* 2014, 11(4), 589–601.
- [15] Florczak B., Viscosity Testing of HTPB Rubber Based Pre-inders, *Central European Journal of Energetic Materials* 2014, 11(4), 625–637.
- [16] Szala M., Maranda A., Florczak B., Investigation of Selected Ingredients of Composite Propellants Using DTA, SEM and Calorimetric Techniques, *Central European Journal of Energetic Materials* 2015, 12(2), 323–330.

- [17] Florczak B., Bogusz R., Skupiński W., Chmielarek M., Dzik A., Study of the Effect of Nitrated Hydroxyl-terminated Polybutadiene (NHTPB) on the Properties of Heterogeneous Rocket Propellants, *Central European Journal of Energetic Materials* 2015, 12(4), 841–854.
- [18] Florczak B., Metodyka badań liniowej szybkości spalania stałych paliw raketowych, *Materiały Wysokoenergetyczne* 2009, 1, 95–106.
- [19] Szymczak K., Gawor T., Wolszakiewicz T., Badanie wysokoenergetycznych układów heterogenicznych zawierających dodatki o zmniejszonej wrażliwości na bodźce zewnętrzne, *Materiały Wysokoenergetyczne* 2009, 1, 107–116.
- [20] Florczak B., Orzechowski A., Witkowski W., Powała D., Sałaciński T., Badanie wysokoenergetycznych układów heterogenicznych zawierających dodatki o zmniejszonej wrażliwości na bodźce zewnętrzne, *Materiały Wysokoenergetyczne* 2009, 1, 117–126.
- [21] Sałaciński T., Skupiński W., Dziura R., Florczak B., Cieślukowska M., Modyfikowanie stałych paliw raketowych polifunkcyjnymi pochodnymi ferrocenu, *Materiały Wysokoenergetyczne* 2009, 1, 127–145.
- [22] Florczak B., Pierechod Z., Wójtowicz W., Sałaciński T., Badania dysz grafitowych nasyconych grafitem pirolitycznym, *Materiały Wysokoenergetyczne* 2010, 2, 83–87.
- [23] Florczak B., Rot R., Mieszanki zapłonowe stosowane w urządzeniach zapłonowych silników raketowych, *Materiały Wysokoenergetyczne* 2010, 2, 88–93.
- [24] Wolszakiewicz T., Walenta A.Z., Metoda pomiaru strumienia energii emitowanej przez tabletki pirogeniczne, *Materiały Wysokoenergetyczne* 2010, 2, 94–96.
- [25] Frodyma A., Habera Ł Wilk Z., Koślik P., Autonomiczny rejestrator ciśnienia otworowego – konstrukcja i badania sprawnościowe, *Materiały Wysokoenergetyczne* 2011, 3, 32–39.
- [26] Gawor T., Wolszakiewicz T., Wpływ geometrii ładunku gazogeneratora na jego właściwości balistyczne, *Materiały Wysokoenergetyczne* 2012, 4, 60–65.
- [27] Zbrowski A., Wolszakiewicz T., Aparatura badawczo-testowa do wykrywania i śledzenia procesów pęknięcia w materiałach wysokoenergetycznych, *Materiały Wysokoenergetyczne* 2012, 4, 66–74.
- [28] Florczak B., Maciejewski W., Badanie wybranych właściwości mieszanek na bazie kauczuku EPDM jako izolacji termicznej silnika raketowego, *Materiały Wysokoenergetyczne* 2015, 7, 90–94.

- [29] Shekhar H., Effects of the Burning Rate Index on the Pressure Time Profile of Progressive Burning Tubular Rocket Propellant Configurations, *Central European Journal of Energetic Materials*, 2015, 12(2), 347–357.
- [30] Bhowmik D., Sadavarte V.S., M. Pande S., Saraswat B.S., An Energetic Binder for the Formulation of Advanced Solid Rocket Propellants, *Central European Journal of Energetic Materials* 2015, 12(1), 145–158.
- [31] Dey A., Ghorpade V.G., Kumar A., Gupta M., Biuret: a Potential Burning Rate Suppressant in Ammonium Chlorate(VII) Based Composite Propellants., *Central European Journal of Energetic Materials* 2014, 11(1), 3–14.
- [32] Sangtyani R., Kumar Amit, Kumar Aarvind, Gupta M., Optimization of Network Forming Agents for Different Types of Composite Propellant Grain, *Central European Journal of Energetic Materials* 2013, 10(3), 409–438.
- [33] Shekhar H., Mathematical Formulation and Validation of Muraour's Linear Burning Rate Law for Solid Rocket Propellants, *Central European Journal of Energetic Materials* 2012, 9(4), 353–364.
- [34] Goedkoop M., Spriensma R., The Eco-indicator 99, A damage oriented metod for Life Cycle Assessment, Methodology Report, PreConsultants, The Netherlands 2000.
- [35] Tol R. S. J., Time Discounting and Optimal Control of Climate Change: An Application of FUND, *Climatic Change* 1999, 41, 3–4.
- [36] Bathelt H., Volk F., Weindel M., The ICT – Thermodynamic Code (ICT – Code) Version 1.00, User's Manual, 1988-2000 Feaunhofer ICT.

Praca wykonana w ramach prac statutowych Szkoły Głównej Służby Pożarniczej finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.