

BADANIE GRANULOMETRII PYŁÓW CERAMICZNYCH POWSTAJĄCYCH PODCZAS ROZKRUSZANIA ODPADÓW CERAMIKI SANITARNEJ POD KĄTEM WYKORZYSTANIA ICH JAKO DODATKU DO BETONU

Celem przedstawionych w niniejszym artykule badań była ocena granulometrii pyłów ceramicznych pod kątem wykorzystania ich jako dodatku do betonu. Materiał do badań pochodził z poprzemysłowych odpadów ceramiki sanitarnej, które podane były procesowi kruszenia w kruszarkach szczękowych. Praca kruszarek oprócz wyodrębnienia uziarnień o średnicach 0-4mm oraz 4-8mm pozwalała na odseparowanie z drobniejszego uziarnienia pyłów o średnicy 0-0,125mm. Do badania cech granulometrycznych wykorzystano stanowisko badawcze składające się z laserowego analizatora granulometrycznego Horiba LA-300 podłączonego do komputera wyposażonego w odpowiednie oprogramowanie. Jako cechą poboczną zbadano gęstość pyłów przy użyciu kolby Le Chateliera. Wyniki przeprowadzonych badań porównano z danymi jakie uzyskano dla tradycyjnie stosowanego dodatku do betonu jakim są pyły lotne krzemionkowe.

Analiza porównawcza wyników dowiodła, że tak odseparowane pyły ceramiczne posiadają większe rozmiary niż popioły lotne krzemionkowe, a ich gęstość jest większa. Cechy te sugerują że aktywność pucolanowa pyłów ceramicznych może być niższa niż popiołów lotnych, a przy komponowaniu kompozytów betonowych z kruszywami ceramicznymi dodatek pyłów nie będzie miał korzystnego wpływu na parametry uzyskanego betonu

WSTĘP

Sięgające czasów złotego wieku rozwoju techniki uprzemysłowienie produkcji sprawiło, że wiele wyrobów stało się ogólnodostępnych i produkowanych w systemie wielkoskalowym. Zysk naliczany nie z marży, a z ilości sprzedawanych wyrobów miał wpływ na stosunkowo niską cenę wielu produktów, a tym samym na zwiększenie się liczby ich odbiorców. Tendencja ta utrzymuje się stale, a ilości produkowanych wyrobów znacznie przewyższają zapotrzebowanie na nowe wyroby związane z ich wyeksploatowaniem technicznym. Niska cena wyrobów i ich łatwość dostępną sprawiają natomiast, że użytkownicy decydują się na wymianę wyrobów znacznie wcześniej niż podyktowane jest to ich zużyciem. Często np. ze względów jedynie estetycznych szereg wyrobów trafia na składowiska odpadów pomimo, że ich funkcje techniczne lub technologiczne pozostały zachowane. Opisany stan rzeczy jeszcze bardziej potęguje produkcję co jest szczególnie niekorzystnym procesem w przypadku przemysłów o wysokim wskaźniku ilości odpadów poprodukcyjnych. Nadprodukcja towarów połączona z dużymi ilościami wyrobów zaklasyfikowanych jako odpad sprawiają, że w przyzakładowych wysypiskach gromadzone są tony materii odpadowej z którą nie zawsze wiadomo jest jak postępować.

Przykładem opisanego stanu rzeczy jest rozległy przemysł produkcji wyrobów ceramicznych. Wyroby ceramiczne w aspekcie substancji zagrażającej bezpieczeństwu ekologicznemu są materiałem dość specyficznym. Proces ich produkcji nie jest odwracalny. Zachodzące podczas niego reakcje wiązań ceramicznych nie są możliwe do powtórnego przeprowadzenia, przez co wyroby te nie mogą wrócić do pierwotnej produkcji. Wyroby ceramiczne są trwale i niebiodegradowalne, a ich rozkład w środowisku naturalnym szacuje się na około cztery tysiące lat.

Szczególnym rodzajem wyrobów ceramicznych są wyroby tzw. ceramiki sanitarnej. Do grupy tej zaliczane są produkty takie jak

umywalki, muszle klozetowe, zbiorniki do muszli itp. Przez wysoko postawione wymogi kontroli jakości wyroby te pomimo nawet mało istotnych wad takich jak nierównoległość krawędzi czy nierównomierny rozkład szkliwa sklasyfikowane pozostają jako odpad poprodukcyjny. Szacuje się, że około 30% wyrobów trafia na składowiska wyrobów co w skali wielotonowej produkcji powoduje problemy z ich skuteczną utylizacją.

Proponowanym w tym przypadku rozwiązaniem jest wykorzystanie odpadowej materii ceramicznej jako substytutu kruszywa tradycyjnych używanych w produkcji betonów. Takie rozwiązanie sugerowane w coraz bardziej licznych pracach badawczych nie byłoby zabiegiem trudnym do wprowadzenia do działań przemysłowych. Poza przekruszeniem odpadu producenci betonów nie musieliby czynić dodatkowych zabiegów. Takie rozwiązanie mogłoby być korzystne zarówno pod względem ekonomicznym – pozyskanie odpadowej materii, oraz ekologicznym – utylizacja odpadu jak również zmniejszenie ilości wydobywanych kruszyw ze złóż naturalnych.

Źródła literaturowe opisujące możliwości wykorzystania odpadów ceramicznych do produkcji betonów w przypadku ceramiki czerwonej [1-16] koncentrują się głównie na efekcie ekologicznym. Wyniki prowadzonych badań dowodzą, że tego typu dodatek niezależnie od formy w jakiej go wprowadzono do mieszanki betonowej (proszek lub kruszywo) zasadniczo pogarsza cechy wytrzymałościowe betonu. Inne wyniki badań przedstawiają prace prowadzone na betonach do których wytworzenia używano ceramiki szlachetnej – białej [17-26]. Ten typ materiału, który pozyskuje się z odpadowych elementów ceramiki sanitarnej lub technicznej (np. izolatory elektryczne) znamieny jest korzystnie wpływającymi na beton cechami. Wyniki pokazują, że im większy dodatek kruszywa ceramicznego tym parametry wytrzymałościowe betonów są wyższe. Interesujące cechy betonów wytworzonych z udziałem kruszywa ze stłuczki sanitarnej przedstawiono w pracy [25]. Autorzy badań, aby

nadać sens ekonomiczny prowadzonych prac szukają zastosowań specjalnych tego typu betonów. Wyniki badań pokazują, że tego typu betony można z powodzeniem stosować w warunkach gdzie betony są narażone na wysokie temperatury lub w miejscach gdzie jest wymagana wysoka odporność na ścieranie. W pracy [26] przedstawiono metodę projektowania betonu wysokowytrzymałego do którego wytworzenia użyto jedynie kruszywo ceramiczne. Analiza wyników dowiodła, że dzięki porowatej strukturze ziaren kruszywa styk kamienia cementowego z kruszywem posiada wyższe wytrzymałości niż dla kruszyw tradycyjnych, a otrzymywane w ten sposób betony posiadają finalnie wyższe parametry wytrzymałościowe.

Celem przedstawionych w niniejszym artykule badań była ocena granulometrii pyłów ceramicznych pod kątem wykorzystania ich jako dodatku do betonu. Materiał do badań pochodził z przemysłowych odpadów ceramiki sanitarnej, które poddane były procesowi kruszenia w kruszarkach szczękowych. Do badania cech granulometrycznych wykorzystano stanowisko badawcze składające się z laserowego analizatora granulometrycznego Horiba LA-300 podłączonego do komputera wyposażonego w odpowiednie oprogramowanie. Jako cechą poboczną zbadano gęstość pyłów przy użyciu kolby Le Chateliera. Wyniki przeprowadzonych badań porównano z danymi jakie uzyskano dla tradycyjnie stosowanego dodatku do betonu jakim są pyły krzemionkowe.

1. CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

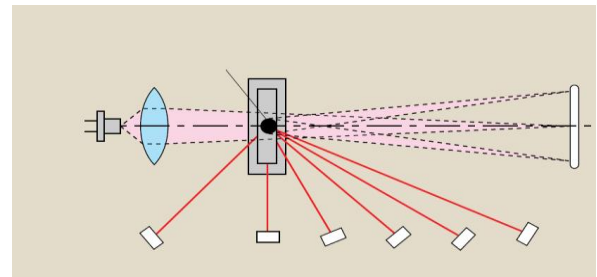
1.1. Surowce

Materiał do badań przygotowano z poprodukcyjnych odpadów ceramiki sanitarnej. Uszkodzone wyroby posiadające szczyrby, uszkodzenia szkliska oraz nierówności powierzchni zostały odebrane z przykładowej przemyśleń wyrobów nie nadających się do sprzedaży. Tak pozyskaną materię poddano kruszeniu w kruszarkach szczękowych. Praca maszyn kruszących pozwalała na segregację odpadu na dwa uziarnienia: uziarnienie drobne 0-4mm oraz uziarnienie grube 4-8mm. Ziarna większe pozostające na sicie 8mm trafiały powtórnie do kruszarki. Do pozyskania pyłów wykorzystano opcję segregacji ziaren przez sito o oczku 0,125mm. Z uziarnienia 0-4mm odseparowano ziarna o uziarnieniu 0-0,125mm które stanowiły badany pył ceramiczny.

Jako środek dyspergujący podczas badania zastosowano roztwór wodny polimetafosforanu sodu o stężeniu 0,1%. Do 5dm³ wody wodociągowej dodano 5,00g substancji odmierzanej za pomocą wagi laboratoryjnej o dokładności 0,01g. Roztwór mieszano za pomocą mieszadła magnetycznego Heidolph z prędkością 400 obr./min przy temperaturze 25°C do momentu rozpuszczenia składnika.

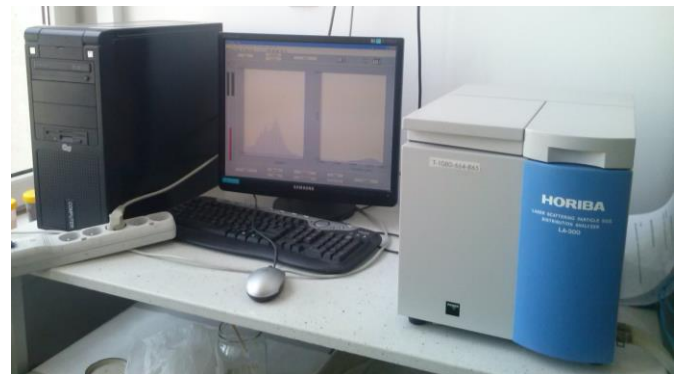
1.2. Metodyka badań

Badanie granulometriki zmielonej stłuczki z ceramiki sanitarnej wykonano za pomocą analizatora laserowego Horiba LA-300. Istotą metody pomiarowej była analiza światła laserowego rozproszonego w roztworze dyspergującym, zawierającym cząstki rozpatrywanego materiału [28]. Granulometria obliczana była na podstawie sygnałów elektrycznych, proporcjonalnych do intensywności rozproszonego światła [28]. Metoda pomiaru bazowała na teorii rozproszenia Mie [27] gwarantując wysoką precyzję wyników. Schemat pomiaru przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Schemat pomiaru w analizatorze uziarnienia Horiba LA-300 [28]

Stanowisko badawcze składało się z laserowego analizatora granulometrycznego Horiba LA-300 podłączonego do komputera wyposażonego w odpowiednie oprogramowanie (rys. 2).



Rys. 2. Stanowisko do badania granulometrii pyłów ceramicznych

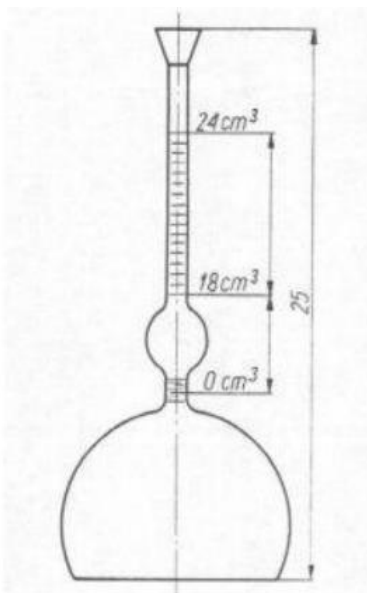
Do komory przepływowej analizatora laserowego Horiba LA-300 wiano odpowiednią ilość roztworu, a następnie umieszczono w niej próbkę zmielonej stłuczki sanitarnej. W programie komputerowym dokonano odpowiednich ustawień. Pomiary odbywały się przy następujących parametrach:

- indeks refrakcji: 1,16-0,00i,
- prędkość cyrkulacji pompy: 7,0,
- czas stosowania rozpraszających ultradźwięków: 1 min.

W ramach badania wykonano trzy kolejne pomiary, po każdym z nich komorę przepływową płukano roztworem dyspergującym.

Wynikiem badania, uzyskanym w programie komputerowym, były krzywe rozkładu uziarnienia wyrażone poprzez zawartości względne q [%] oraz skumulowane Q [%], z dokładnością do 0,1%. Średnice cząstek poszczególnych uziarnień wyrażone były w mikrometrach, z dokładnością do 0,01 μ m. Wielkość powierzchni właściwej S.P. Area (ang. Specific Area) przedstawiona była jako stosunek powierzchni do objętości, wyrażony w [cm²/cm³], z dokładnością do 1 cm²/cm³.

Gęstość zmielonej stłuczki z ceramiki sanitarnej wyznaczono za pomocą kolby Le Chateliera (rys 3). Temperatura w pomieszczeniu w czasie badania wynosiła 22°C. Objętościomierz napełniono denaturatem do poziomu 0 i zważono. Stopniowo dodawano porcje zmielonej ceramiki. Po zrównaniu menisku dolnego zawiesziny z kreską oznaczającą objętość 20cm³ zważono kolbę ponownie. Wykonano dwa pomiary, wynik uśredniono.



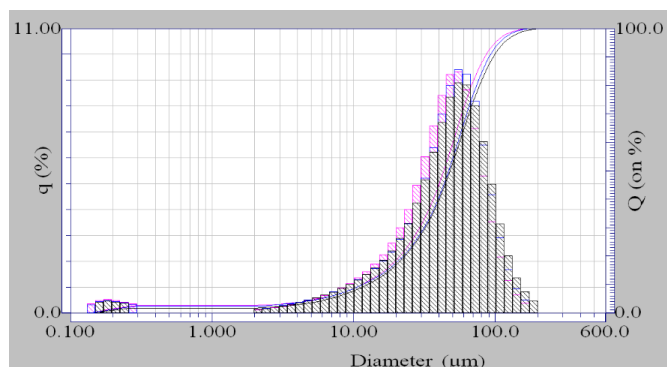
Rys. 3. Kolba Le Chateliera - schemat



Rys. 4. Kolba Le Chateliera - w czasie badania

2. WYNIKI BADAŃ

Wyniki z trzech pomiarów uziarnienia zmielonej stłuczki z ceramiki sanitarnej przedstawiono na rys. 5. W celach porównawczych uzyskane wartości zestawiono z wynikami zbadanymi dla konwencjonalnego popiołu lotnego.



Rys. 5. Rozkład uziarnienia zmielonej stłuczki z ceramiki sanitarnej

Uziarnienie zmielonej stłuczki z ceramiki sanitarnej mieściło się w zakresie od 2,00 do 200,00µm z niewielkim udziałem uziarnienia 0,15-0,30µm. Popiół lotny krzemionkowy porównawczy posiadał znacznie mniejsze wymiary ziaren, mieszczące się w przedziale 0,15-60,00µm. Uzasadnia to około trzykrotnie większą powierzchnię właściwą dla popiołu. Dane statystyczne związane z granulometrią pyłów ceramicznych i porównawczego popiołu lotnego przedstawia tab. 1.

Tab. 1. Granulometria zmielonej stłuczki ceramicznej w porównaniu z popiołem lotnym

Oznaczenie	Zmielona stłuczka z ceramiki sanitarnej	Popiół lotny krzemionkowy
Powierzchnia właściwa [cm ² /cm ³]	8231,53	26250,50
Mediana [µm]	47,83	10,30
Średnia [µm]	51,91	11,13
Wariancja [µm ²]	1092,93	56,09
Odchylenie standardowe [µm]	33,02	7,48
Współczynnik zmienności [%]	63,57	67,24
Dominanta [µm]	57,78	14,10

Wyniki pomiarów gęstości zmielonej stłuczki ceramicznej przedstawiono w tab. 2. Gęstość obliczono ze wzoru:

$$\rho = \frac{m_1 - m_0}{V} \quad (1)$$

gdzie:

m_0 - masa kolby z denaturatem, [g]

m_1 - masa kolby z denaturatem i próbką [g]

V - objętość zawiesiny, [cm³]

Tab. 2. Wyniki pomiarów przy obliczaniu gęstości

Oznaczenie	Pomiar 1	Pomiar 2
Masa kolby z denaturatem [g]	289,83	283,1
Masa kolby z denaturatem i próbką [g]	340,7	332,85
Objętość zawiesiny [cm ³]	20	19,8
Gęstość [g/cm ³]	2,544	2,513

Z dwóch pomiarów obliczono gęstość średnią, która wynosi 2,53g/cm³. Gęstość porównawczego popiołu lotnego krzemionkowego była mniejsza i wynosiła 2,04g/cm³.

PODSUMOWANIE

Analiza porównawcza wyników dowiodła, że odseparowane w wymieniony sposób pyły ceramiczne posiadają średnio 4,7- krotnie większe rozmiary niż popioły lotne krzemionkowe. Gęstość zbadana pyłów ceramicznych była natomiast 19,4% większa niż pyłów lotnych krzemionkowych. Cechy te sugerują, że aktywność pucolanowa pyłów ceramicznych może być niższa niż popiołów lotnych, a przy komponowaniu kompozytów betonowych z kruszywami ceramicznymi dodatek pyłów nie będzie miał korzystnego wpływu na parametry uzyskanego betonu.

Przedstawione w niniejszym artykule badania dowodzą, że dla kompleksowej oceny pyłów należy dokonać badania aktywności puculanowej przygotowując zaprawy normowe. Dla poprawy właściwości granulometrycznych pyłów ceramicznych rekomenduje się

również przy odseparowaniu pyłów zastosować sita o mniejszej średnicy.

BIBLIOGRAFIA

1. F. Bektas, K. Wang, H. Ceylann, *Effects of crushed clay brick aggregate on mortar durability Constr Build Mater*, 23 (2009), pp. 1909–1914.
2. H. Binici, *Effect of crushed ceramic and basaltic pumice as fine aggregates on concrete mortar properties Constr Build Mater*, 21 (2007), pp. 1191–1197.
3. P. Cachim, *Mechanical properties of brick aggregate concrete Constr Build Mater*, 23 (2009), pp. 1292–1297.
4. J.R. Correia, J. de Brito, A.S. Pereira, *Effects on concrete durability of using recycled ceramic aggregates Mater Struct*, 39 (2006), pp. 169–177.
5. J. De Brito, A.S. Pereira, J.R. Correia, *Mechanical behaviour of non-structural concrete made with recycled ceramic aggregates Cem Concr Compos*, 27 (4) (2005), pp. 429–433.
6. F. Debieb, S. Kenai *The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete Constr Build Mater*, 22 (2008), pp. 886–893.
7. A. Devenny, F.M. Khalaf *The use of crushed brick as coarse aggregate in concrete Masonry Int*, 12 (3) (1999), pp. 81–84.
8. F.M. Khalaf, A.S. DeVenny *Recycling of demolished masonry rubble as coarse aggregate in concrete: review J Mater Civ Eng*, 16 (4) (2004), pp. 331–340.
9. A.R. Khaloo, *Properties of concrete using crushed clinker bricks as coarse aggregate ACI Mater J*, 91 (2) (1994), pp. 401–407.
10. J.M. Khatib, *Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate Cem Concr Res*, 35 (4) (2005), pp. 763–769.
11. S.M. Levy, P. Halene, *Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development Cem Concr Res*, 34 (18) (2004), pp. 1975–1980.
12. M.A. Mansur, T.H. Wee, L.S. Charan, *Crushed bricks as coarse aggregate for concrete ACI Mater J*, 96 (4) (1999), pp. 478–483.
13. A.R. Mazumder, A. Kabire, N. Yazdani, *Performance of over-burnt distorted bricks as aggregates in pavement works J Mater Civ Eng*, 18 (6) (2006), pp. 777–785.
14. F. Pacheco-Torgal, S. Jalali, *Reusing ceramic wastes in concrete Constr Build Mater*, 24 (2010), pp. 832–838.
15. C.S. Poon, D. Chan, *Paving blocks with recycled aggregate and crushed clay brick Constr Build Mater*, 20 (8) (2006), pp. 569–577.
16. M.A. Rashid, T. Hossain, M.A. Islam, *Properties of higher strength concrete with crushed brick as coarse aggregate J Civ Eng (IEB)*, 37 (1) (2009), pp. 43–52.
17. I. Guerra, I. Vivar, B. Llamas, A. Juan, J. Moran, *Eco-efficient concretes: the effects of using recycled ceramic material from sanitary installations on the mechanical properties of concrete Waste Manage. (Oxford)*, 29 (2009), pp. 643–646.
18. H. Higashiyama, F. Yagishita, M. Sano, O. Takahashi, *Compressive strength and resistance to chloride penetration of mortars Reusing ceramic waste as fine aggregate Constr Build Mater*, 26 (2012), pp. 96–101.
19. C. Medina, M. Frías, M.I. Sánchez de Rojas, *Microstructure and properties of recycled concretes using sanitary ware industry waste as coarse aggregate Constr Build Mater*, 31 (2012), pp. 112–118.
20. C. Medina, M.I. Sánchez de Rojas, M., *Frías Reuse of sanitary ceramic wastes as coarse aggregate in eco-efficient concretes Cem Concr Compos*, 34 (2012), pp. 48–54.
21. R.M. Senthamarai, P. Devadas Manoharan, *Concrete with ceramic waste aggregate Cement Concr Compos*, 27 (2005), pp. 910–913.
22. R.M. Senthamarai, P. Devadas Manoharan, D. Gobinath, *Concrete made from ceramic industry waste: durability properties Constr Build Mater*, 25 (2011), pp. 2413–2419.
23. Lopez, B. Llamas, A. Juan, J.M. Moran, I. Guerra, *Eco-efficient concretes: impact of use of white ceramic powder on the mechanical properties of concrete Biosyst Eng*, 96 (4) (2007), pp. 559–564.
24. C. Medina, P.F.G. Banfill, M.I. Sánchez de Rojas, M. Frías, *Rheological and calorimetric behaviour of cements blended with containing ceramic sanitary ware and construction/demolition waste Constr Build Mater*, 40 (2013), pp. 822–831
25. A. Halicka, P. Ogrodnik, B. Zegardlo, *Using ceramic sanitary ware waste as concrete aggregate Construction and Building Materials*, 48 (2013), pp. 295–305.
26. B. Zegardlo, M. Szeląg, P. Ogrodnik, *Ultra-high strength concrete made with recycled aggregate from sanitary ceramic wastes – The method of production and the interfacial transition zone. Construction and Building Materials*, Vol. 122 (2016) ,pp. 736–742.
27. Bohren C.F., Huffman D.R.; *Absorption and scattering of light by small particles*, Wiley-Interscience, New York, 2010.
28. Instrukcja działania LA300E dostępna na : www.horiba.com/fileadm/ uploads /Scientific /Documents /PSA/LA300E_bro.pdf.

Examination of granulometry of ceramic dust which derogations while disposing waste sanitary ceramics for the use of their as addition to the concrete

The purpose of the research presented in this article was to assess the granulometry of ceramic dust in terms of their use as an additive to concrete. The material for testing came from postindustrial sanitary ceramic waste, which was subjected to a crushing process in jaw crushers. A research stand consisting of a Horoir LA-300 laser particle analyzer connected to a computer equipped with appropriate software was used to study the granulometric characteristics. As a side feature, the dust density was examined using a Le Chatelier flask. The results of the tests carried out were compared with the data obtained for the traditionally used concrete additive - silica volatile dusts.

Autorzy:

dr inż. **Bartosz Zegardło** - Uniwersytet Przyrodniczo-Humanistyczny w Siedlcach, Wydział Przyrodniczy, bart.z@wp.pl

mł. bryg. dr inż. **Tomasz Drzymala** - Szkoła Główna Służby Pożarniczej w Warszawie, Wydział Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego, Katedra Bezpieczeństwa Budowli i Rozpoznawania Zagrożeń, Zakład Podstaw Budownictwa i Materiałów Budowlanych, t.drzymala@sgsp.edu.pl

mł. bryg. dr inż. **Paweł Ogrodnik** - Szkoła Główna Służby Pożarniczej w Warszawie, Wydział Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego, Katedra Techniki Pożarniczej, Zakład Mechaniki Stosowanej, pogrodnik@sgsp.edu.pl

dr inż. **Beata Jaworska** - Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Ładowej.

JEL: Q01 DOI: 10.24136/atest.2018.084

Data zgłoszenia: 2018.05.22 Data akceptacji: 2018.06.15