

Krzysztof Cybulski\*, Bronisław M. Wiechula\*

## WYŁADOWANIA ELEKTROSTATYCZNE JAKO EFEKTYWNE ŹRÓDŁO ZAPŁONU W ATMOSFERZE POTENCJALNIE WYBUCHOWEJ

### Streszczenie

Wyładowania elektrostatyczne z naelektryzowanych nieprzewodzących materiałów niemetalowych mogą stwarzać zagrożenie wybuchem. W artykule opisano model iskiernika jako przyrządu do oceny energii wyładowań elektrostatycznych służącej szacowaniu zdolności zapalającej.

Przedstawiono teoretyczne wartości energii rozładowania, jaka może towarzyszyć różnym rodzajom wyładowań elektrostatycznych. Na fotografiach pokazano etapy spalania we wnętrzu komory iskiernika testowej metanowej mieszaniny wybuchowej, w wyniku wyładowania elektrostatycznego towarzyszącego rozładowaniu naelektryzowanego nieprzewodzącego materiału niemetalowego.

### The static discharges as an effective source of ignition in the potentially explosive atmosphere

### Abstract

Electrostatic discharges from electrified non-conductive, non-metal materials are able to create an explosion hazard. The paper discusses a model of the spark-gap being an instrument used in assessing the ignition-producing ability.

There have been presented the theoretical values of discharge energy that may accompany various types of electrostatic discharges. Presented in the photographs are the phases of ignition of test methane explosion mixture inside the spark-gap chamber that has occurred in consequence of electrostatic discharge accompanying the process of discharging the electrified non-conductive, non-metal material.

## 1. TEORETYCZNA OCENA ENERGII – ZAPALNOŚĆ

Podczas dowolnego wyładowania elektrostatycznego może uwalniać się energia rozładowania  $W_r$  zdolna do wywołania zapłonu w niemal wszystkich gazowych atmosferach wybuchowych.

### Wyładowanie elektrostatyczne

Wyładowanie elektrostatyczne może wystąpić wskutek naelektryzowania elektrycznie izolowanego ciała człowieka. W większości przypadków, właściwie cała zgromadzona energia na ciele człowieka jest rozpraszana podczas wyładowania elektrostatycznego. Wyładowanie elektrostatyczne jest bardzo szybkie i z reguły powoduje słyszalne „trzaski”. Najczęściej powoduje rozpraszanie się niemal całej dostępnej energii naelektryzowania  $W_0$ , którą można wyrazić za pomocą następujących wzorów:

---

\* Główny Instytut Górnictwa – Kopalnia Doświadczalna „Barbara”

$$W_o = \frac{1}{2}QU \quad \text{lub} \quad W_o = \frac{1}{2}CU^2 \quad \text{lub} \quad W_o = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C}$$

gdzie:

- $W_o$  – energia naelektryzowania, J;
- $Q$  – ilość ładunku na przewodniku, C;
- $U$  – potencjał na przewodniku, V;
- $C$  – pojemność do ziemi, F.

Wielkość energii naelektryzowania  $W_o$  na płytce (grubości  $d = 10^{-3}$  m i powierzchni  $A = 4,0 \cdot 10^{-2}$  m<sup>2</sup>) naelektryzowanego poliwęglanu przezroczystego o względnej przenikalności elektrycznej  $\epsilon$  wynosi 3 (przenikalność względna powietrza  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  F/m) i gęstości powierzchniowej ładunku  $\sigma = 1,0 \cdot 10^{-5}$  C·m<sup>-2</sup>, wynosi

$$W_o = \frac{CU^2}{2} = \frac{Ad\sigma^2}{2\epsilon\epsilon_0} = 0,36 \text{ mJ}$$

Równoważna „pojemność”  $C_e$  płytki (o wartościach  $d$ ,  $A$  oraz  $\epsilon$  jak powyżej) wynosi

$$C_e = \epsilon\epsilon_0 \frac{A}{d} = 222 \text{ pF}$$

Energia rozładowania  $W_r$  naelektryzowanej płytki, na której zgromadził się ładunek  $Q = 400$  nC, wynosi

$$W_r = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C_e} = 0,36 \text{ mJ}$$

Przy pojemności człowieka  $C_c$  wynoszącej 300 pF i wartości potencjału  $U = 8$  kV po naelektryzowaniu płytki metodą kontaktowo-tarciową (pocieranie tkaniną poliamidową) równoważna wartość energii rozładowania człowieka naelektryzowanego przez indukcję  $W_r$  w postaci wyładowania elektrostatycznego może wynieść

$$W_r = \frac{1}{2} C_c U^2 = W_r = 9,6 \text{ mJ}$$

Typowe wartości pojemności przewodników podano w tablicy 1.

**Tablica 1.** Wartości pojemności dla typowych przewodników

Obiekt	Pojemność C, pF
Małe wyroby metalowe (czerpak, końcówka wylotowa węża)	10–20
Małe pojemniki (wiadro, bęben 50-litrowy)	10–100
Średnie pojemniki (od 250 litrów do 500 litrów)	50–300
Większe elementy instalacji przemysłowej bezpośrednio otoczone przez uziemioną konstrukcję	100–1000
Ciało ludzkie	100–300

## PRZYKŁAD OBLICZENIA ENERGII ROZŁADOWANIA

Nieuziemiony kontener metalowy jest napełniany proszkiem z urządzenia mielącego. W takiej sytuacji: prąd ładowania  $I$  wynosi około  $10^{-7}$  A, rezystancja upływu kontenera do ziemi  $R$  wynosi  $10^{10}$   $\Omega$ , a jego pojemność  $C$  – 100 pF. Maksymalne napięcie na kontenerze

$$V_{\max} = IR = 1 \text{ kV},$$

a maksymalna energia uwalniana podczas wyładowania elektrostatycznego

$$W_r = 1/2 CV_{\max}^2 = 2,5 \text{ mJ}$$

Zdolność zapalania od wyładowań elektrostatycznych może zazwyczaj być oceniana na podstawie porównania zmagazynowanej energii z minimalną energią zapłonu substancji palnej. Wyładowania elektrostatycznego można uniknąć przez uziemienie wszystkich elementów przewodzących prąd, na przykład sprzętu, przewodzących produktów, a także człowieka.

**Wyładowania snopiaste**

Wyładowania snopiaste mogą powodować zapalenie większości palnych gazów i par. Obecnie prowadzone badania wykazują jednak, że niezależnie od ich minimalnej energii zapłonu pyły palne nie mogą być zapalane w wyniku wyładowań snopiastych pod warunkiem, że w sąsiedztwie brak palnych gazów lub par. Energia wyładowań snopiastych może wynosić do 4 mJ. Ta równoważna energia została określona przez przekształcenie ich w wyładowania elektrostatyczne w gazach. W warunkach przemieszczania się dużych ilości pyłu o elektrostatycznych właściwościach rozpraszających lub nieprzewodzących, wyładowań snopiastych nie można uniknąć.

**Rozprzestrzeniające się wyładowania snopiaste**

Wartość energii rozładowania uwalnianej podczas rozprzestrzeniającego się wyładowania snopiastego można obliczyć, a typowe jej wartości są równe 1 J lub większe. Wartość ta zależy od pola powierzchni, grubości i gęstości powierzchniowej ładunku na naelektryzowanym nieprzewodzącym materiale niemetalowym. Rozprzestrzeniające się wyładowania snopiaste mogą powodować zapalenie gazowej i pyłowej atmosfery wybuchowej.

**Wyładowania stożkowe**

Warunki konieczne do wystąpienia wyładowań stożkowych są złożone. Czynniki, które mają wpływ na te wyładowania, są: rezystywność masy pyłu, prąd ładowania, objętość i geometria masy pyłu oraz rozmiar cząstek. W wyniku badań stwierdzono, że atmosfera palna gazów i par, jak również atmosfera wrażliwa palnych pyłów może zapalać się od tego typu wyładowań.

Do oszacowania energii rozładowania  $W_r$  podczas wyładowania stożkowego, występującego na przykład w silosach o średnicach 0,5–3,0 m i w czasie ładowania pyłami o średnim rozmiarze ziaren 0,1–3,0 mm, może być wykorzystany następujący wzór (IEC TR...)

$$W_r = 5,22 \cdot D^{3,36} \cdot d^{1,46}$$

gdzie:

$W_r$  – energia rozładowania w trakcie wyładowania stożkowego, mJ;

$D$  – średnica uziemionego przewodzącego silosu, m;

$d$  – średni rozkład rozmiaru cząstek pyłu tworzącego stożek, mm.

Z powyższego wzoru wynika, że wyładowania stożkowe spowodowane przez gruby pył, mają dużo większą energię niż spowodowane przez pył drobny. Z największym zagrożeniem ma się do czynienia wówczas, kiedy „manipuluje” się nieprzewodzącymi cząstkami razem z drobnym pyłem (przesiew) tworzącym chmurę pyłu o małej wartości minimalnej energii zapłonu.

Teoretycznie możliwe są też wyładowania – błyskawice, ale nie były one obserwowane w przemyśle.

## 2. OCENA ZDOLNOŚCI ZAPALAJĄCEJ

Zdolność zapalająca wyładowania elektrostatycznego jest szacowana na podstawie porównania energii rozładowania  $W_r$  z energią zapłonu  $E_Z$  substancji palnej. Jest ona zależna od wielu parametrów, a w szczególności od rodzaju elektryzowanego materiału. Wyładowanie elektrostatyczne w gazie ma charakter początkowego wyładowania niesamoistnego, przechodzącego w wyładowanie samoistne. W wyładowaniu elektrostatycznym następuje rozdział ładunku przestrzennego, w jego czołowej warstwie gromadzą się elektrony, a jony dodatnie pozostają w dalszych warstwach. Warunkiem wystarczającym do dalszego rozwoju wyładowania jest ciągle pojawianie się nowych elektronów wtórnych na skutek bombardowania kolejnych warstw powietrza jonami dodatnimi, fotojonizacji powierzchni uziemionego przewodzącego materiału i cząstek otaczającego powietrza. Efektywność jonizacyjna tych zjawisk zależy od ciśnienia atmosferycznego, temperatury powietrza, promienia ostrza, odległości i kształtu elementu elektryzowanego, jak również od prawidłowego uziemienia przewodzącego elementu.

Napięcie początkowe  $U_0$  wyładowań samoistnych opisuje prawo Paschena, zgodnie z którym napięcie początkowe  $U_0$  wyładowania elektrostatycznego w stałej temperaturze jest wyłącznie funkcją iloczynu ciśnienia gazu  $p$  i odstępu między elektrodami  $L$  przy stałej temperaturze, w warunkach, gdy w atmosferze potencjalnie wybuchowej między elektrodami 1–2 jest spełniony warunek

$$pL > U_0$$

gdzie:

$p$  – ciśnienie gazu, Pa;

$L$  – odstęp między elektrodami, mm;

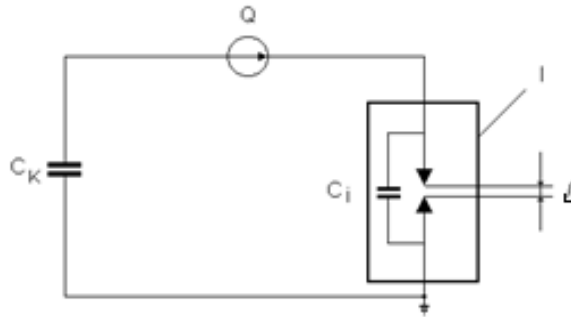
$U_0$  – napięcie początkowe, V.

Minimalna wartość napięcia początkowego  $U_0$  jest zależna od ilości elektronów i jonów wybijanych z elektrody, czyli wystąpienia efektu, tzw. lawiny elektronowej. Właściwościami fizycznymi układu gazowego wpływającymi w niewielkim stopniu na wytrzymałość gazów są, zmieniające się, gęstość i wilgotność. Z upływem czasu

w warunkach utrzymującego się wyładowania niepełnego, przy wzroście napięcia, następuje efekt nasycenia w transporcie jonów między elektrodami, aż do momentu rozwoju wyładowania samoistnego, kończącego się przeskokiem wyładowania elektrostatycznego.

### 3. STANOWISKO DO BADAŃ ZAPALNOŚCI

Ekstremalne warunki elektryzowania elementów niemetalowych wytypowano na podstawie wieloletnich doświadczeń, które we własnych badaniach laboratoryjnych były wykorzystywane do oceny bezpieczeństwa przeciwwybuchowego w atmosferze potencjalnie wybuchowej. Badania zdolności zapalającej gazowej testowej mieszaniny wybuchowej wykonywano w komorze iskiernika o stałej objętości. Iskiernik był traktowany jako kontrolny przyrząd pomiarowy, którego schemat przedstawiono na rysunku 1.

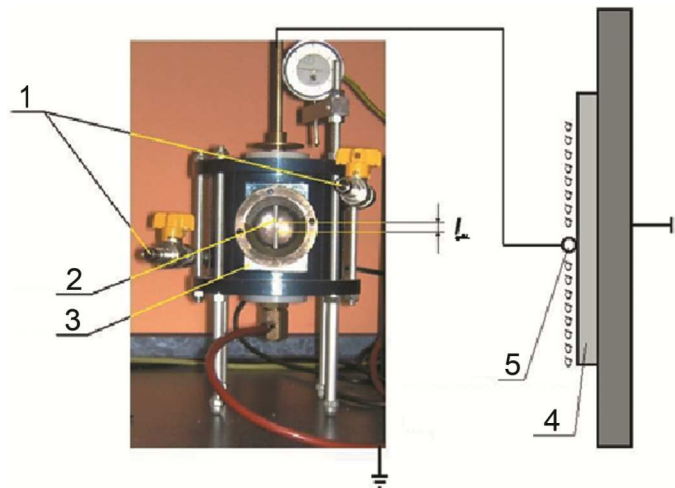


**Rys. 1.** Schemat układu z wykorzystaniem iskiernika do oceny zdolności zapalającej;  $C_K$  (pF) – pojemność własna źródła energii,  $C_i$  (pF) – pojemność własna iskiernika,  $Q$  – źródło energii,  $I$  – iskiernik

**Fig. 1.** Scheme of a system using the spark-gap to assess the ignition ability; notation:  $C_K$  (pF) – self-capacity of energy source,  $C_i$  (pF) – self-capacity of spark-gap,  $Q$  – energy source,  $I$  – spark-gap

Iskiernik jest to przyrząd do oceny energii wyładowań elektrostatycznych w celu oszacowania zdolności zapalającej. Przedstawiony na rysunku 1 schemat iskiernika ma znaną charakterystykę napięcia początkowego  $U_0$  i pojemność własną  $C_i$ . Włączony jest w obwód ze źródłem energii  $Q$  pojemności  $C_K$ . Zapalenie się testowej gazowej mieszaniny wybuchowej we wnętrzu komory iskiernika lub nie jest podstawą oceny zdolności zapalającej.

Wystąpienie wybuchu we wnętrzu komory dla ustalonego odstępów  $L$  między elektrodami iskrowymi oznacza, że energia rozładowania  $W_r$  jest większa od energii zapłonu  $E_z$  otaczającej testowej gazowej atmosfery wybuchowej.



**Fot. 1.** Stánowisko do oceny energii rozładowania  $W_r$ : 1 – zawory, 2 – elektrody iskrowe, 3 – komora, 4 – naelektryzowany materiał, 5 – elektroda zbierająca

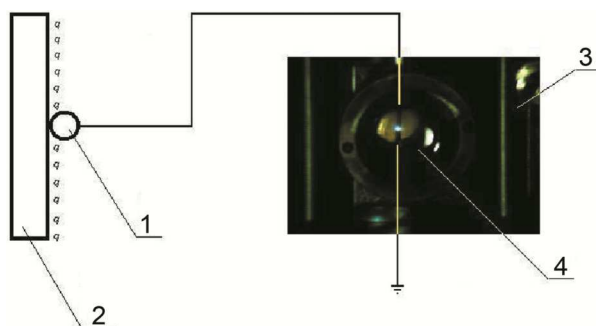
**Photo. 1.** Test stand for assessment of discharge energy  $W_r$ : 1 – couplers, 2 – spark electrodes, 3 – chamber, 4 – electrified material, 5 – collecting electrode

Badania zdolności zapalającej testowej metanowej mieszaniny wybuchowej wykonywano w komorze iskiernika o stałej objętości (fot. 1). Iskiemik składał się z elementu zapłonowego, tj. pary elektrod iskrowych umieszczonych we wnętrzu komory o objętości wolnej przestrzeni około  $1 \text{ dm}^3$ . Jedna z elektrod elementu zapłonowego była połączona z elektrodą kulistą służącą do zbierania ładunku z naelektryzowanej powierzchni nieprzewodzącego materiału niemetalowego. Druga elektroda iskrowa była połączona z zaciskiem uziemienia. W celu zapewnienia jednorodnej atmosfery wybuchowej komorę wyposażono w dwa zawory umożliwiające jej wypełnianie testową gazową mieszaniną wybuchową. Do badań zdolności zapalającej stosowano testową metanową mieszaninę wybuchową o znanej wartości energii zapłonu  $E_z$ . Odległość  $L$  między elektrodami iskrowymi zależy od składu testowej metanowej mieszaniny wybuchowej.

Źródłem wyładowań elektrostatycznych był naelektryzowany, przez indukcję, niemetalowy materiał nieprzewodzący. Najbardziej niebezpiecznych dla atmosfer wybuchowych, tj. rozprzestrzeniających się wyładowań szpiastych, można uniknąć przez używanie tylko przewodzących albo rozpraszających materiałów niemetalowych do produkcji elementów przeznaczonych do użytkowania w przestrzeniach zagrożonych wybuchem.

#### 4. WYNIKI BADAŃ

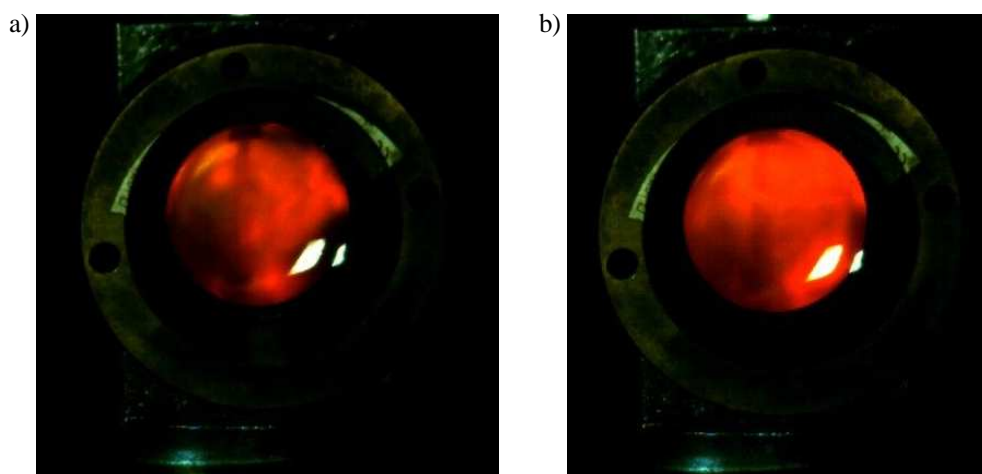
Wyładowanie elektrostatyczne jest zewnętrznym źródłem energii rozładowania  $W_r$ , które wprowadzone w potencjalne ognisko reakcji termochemicznej powoduje wyładowanie elektrostatyczne (fot. 2).



**Fot. 2.** Wyładowanie elektrostatyczne jako efektywne źródło zapłonu: 1 – elektroda zbierająca, 2 – naelektryzowany materiał, 3 – iskiernik, 4 – wyładowanie elektrostatyczne

**Photo. 2.** Electrostatic discharge as effective ignition source: 1 – collecting electrode, 2 – electrified material, 3 – spark-gap, 4 – electrostatic discharge

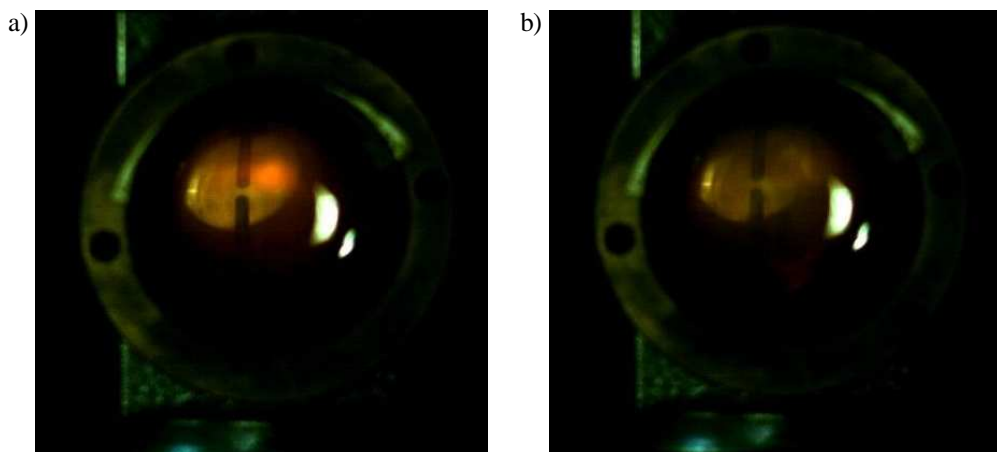
W czasie zapłonu temperatura powierzchni utworzonego wyładowania elektrostatycznego przewyższa temperaturę zapłonu warstwy otaczającej testowej metanowej atmosfery wybuchowej, tworząc warstwę płomienia. Następuje wymiana ciepła między nagrzanym wyładowaniem elektrostatycznym a otaczającą go warstwą gazu. Wynikiem nagrzania jest wzrost temperatury cząstek, odparowanie z nich pojedynczych cząsteczek wody i wydzielenie się części lotnych. Emitowane części lotne, stykając się w otaczającym środowisku z tlenem, spalają się. Podczas wykonywania badań zdolności zapalającej oceniano zagrożenie wybuchem od naelektryzowanego materiału niemetalowego. Kolejne etapy rozprzestrzeniania się płomienia w niespaloną testową metanową mieszaninę wybuchową przedstawiono na fotografii 3.



**Fot. 3.** Spalanie testowej metanowej atmosfery wybuchowej: a – początek spalania testowej metanowej mieszaniny wybuchowej, b – płomień wypełniający wnętrze komory iskiernika

**Photo. 3.** Combustion of test methane explosion atmosphere: a – beginning of combustion of test methane explosion mixture, b – flame filling up the spark-gap interior

Kolejne etapy zaniku płomienia w postaci miejscowych faz wypalania testowej metanowej atmosfery wybuchowej przedstawiono na fotografii 4.



**Fot. 4.** Fazy zaniku płomienia wybuchu we wnętrzu komory: a – wtórne świecenie resztek gazowej testowej atmosfery wybuchowej, b – produkty spalania

**Photo. 4.** Phases of termination of explosion flame inside the chamber: a - secondary luminescence of residue of test gas explosion atmosphere, b - combustion products

Badania zdolności zapalającej spowodowanej wyładowaniami elektrostatycznymi doprowadziły do określenia krytycznych parametrów i umożliwiły opisanie sposobu wywoływania naelektryzowania, które powoduje zapalenie testowej metanowej mieszaniny wybuchowej. Wynikiem tych prób było ustalenie następujących warunków granicznych:

- „brak zapalenia” się testowej metanowej mieszaniny wybuchowej oznacza, że energia wyładowania elektrostatycznego nie przekracza energii zapłonu  $E_z$  otaczającej testowej gazowej mieszaniny wybuchowej,
- „zapalenie” się testowej gazowej mieszaniny wybuchowej oznacza, że energia rozładowania  $W_r$  przekracza energię zapłonu  $E_z$  otaczającej testowej metanowej mieszaniny wybuchowej.

Próby te jednak nie rozstrzygnęły wszystkich wątpliwości, które pojawiają się w fazie projektowania instalacji z wykorzystaniem nieprzewodzących elementów niemetalowych. Jeżeli nieprzewodzący element niemetalowy jest wyposażony w elementy przewodzące, to próby oceny zdolności zapalającej są wykonywane zarówno przy odizolowanych, jak i uziemionych elementach przewodzących.

#### Literatura

1. IEC TR 60079-32:2010 Explosive atmospheres – Part 32: Electrostatics.
2. Wiechuła B. (2007): Zagrożenie wybuchem od elektryczności statycznej w lakierniach proszkowych (Praca doktorska). Białystok, Politechnika Białostocka.

**Recenzent:** doc. dr hab. Henryk Passia



Krystyna Czaplicka-Kolarz\*, Jerzy Świądrowski\*, Anna Śliwińska\*  
kczaplicka@gig.eu, jswiadrowski@gig.eu, asliwinska@gig.eu

## APPLICATION OF LCA IN FORESIGHT PROJECTS BASED ON THE EXAMPLE OF COAL ENERGY TECHNOLOGIES

### Abstract

The paper aims to answer the question about the role of LCA in Foresight projects. Five clean coal technologies are under consideration: integrated gasification combined cycle with oxygen gasification and with air gasification, pulverized coal combustion with supercritical parameters, atmospheric circulating fluidised-bed boiler and oxy-combustion. The article compares results of assessments of above mentioned technologies by different methods: by experts in a foresight and based on calculations from LCA. Optimization of the technologies performed on the basis of different criteria showed that involving LCA is entirely appropriate and allows to accomplish impartial results because LCA unlike experts' analysis takes into account factors, which have considerable impact on natural environment.

### Zastosowanie metody LCA w projektach foresight na przykładzie węglowych technologii energetycznych

#### Streszczenie

Projekty typu foresight mają na celu wyznaczenie kierunków rozwoju danej dziedziny oraz wsparcie dla procesów podejmowania decyzji politycznych w gospodarce, nauce lub finansowaniu badań, a metoda foresightu jest wykorzystywana, między innymi w obszarze ochrony środowiska do oceny możliwości wdrożenia technologii przyjaznych środowisku. Jedną z metod wartych zastosowania w tego typu projektach wydaje się być metoda oceny cyklu życia (LCA). Celem artykułu jest analiza możliwości zastosowania oceny cyklu życia (LCA) w projektach typu foresight.

W ramach artykułu przeanalizowano pięć czystych technologii węglowych: układ IGCC ze zgazowaniem tlenowym oraz ze zgazowaniem powietrzem, kotły pyłowe na parametry nadkrytyczne, atmosferyczne kotły fluidalne z warstwą cyrkulacyjną oraz spalanie w czystym tlenie. Następnie porównano wyniki priorytetyzacji technologii z uwzględnieniem ocen eksperckich w zakresie bezpieczeństwa energetycznego i możliwości wdrożenia technologii, sprawności technologii, kosztów stałych i zmiennych oraz awaryjności technologii, jak również na podstawie wyników LCA.

Stwierdzono, że uwzględnienie w analizie eksperckiej wyników obliczeń metodą LCA spowodowało niewielkie, lecz zauważalne zmiany w rankingu technologii. Obliczenia metodą LCA uwzględniają czynniki, które mają istotny wpływ na oddziaływanie na środowisko, które trudno jest uwzględnić w ocenie eksperckiej. Z tego względu, włączenie LCA do etapu priorytetyzacji technologii w ramach foresightu jest jak najbardziej celowe i pozwala na uzyskanie pełniejszych i bardziej obiektywnych wyników.

## INTRODUCTION

Technology foresight is a set of processes enabling multi-dimensional assessment of future trends in technology development on the basis of the current state of science, technology and social awareness as well as the links between them (Czaplicka-Kolarz,

---

\* Główny Instytut Górnictwa

red. 2007b). In recent years, this methodology permitted to diagnose more frequently crucial, social and economic problems over various spans of time, it is also becoming an instrument of prognosing and decision making. In case of technologies dealing with energy safety, to which utilization of coal energy conversion belongs, is of particular importance.

The question, to which the authors of this article endeavour to find the answer, is: should the LCA of specific technologies be taken into consideration while determining critical technologies and their role in visions and foresight scenarios respectively? And if so, should application of multi-criteria optimization, including aspects of LCA and key factors determined by experts, take place and the results of this sort of analysis form a basis of further work performed by experts?

This article aims to answer the questions posed above.

## **1. USE OF LCA IN FORESIGHT PROJECTS**

The objective of foresight projects is to determine directions of development in a given field as well as support for the processes of making political decision in economy, science or financing research. Foresight methodology is utilized among others in the sector of environmental protection for the assessment of environmentally friendly technologies. One of the methods worth implementing in these types of projects seems to be the Life Cycle Assessment (LCA) method.

Methods applied in foresight projects differ considerably from the LCA method. Foresight is used for very general assessment of technology based on general technological data, and it is aimed at creating a scenario or development strategy for the field under examination. The LCA, by contrast – is a very precise method, it refers to specific technology. The purpose of the LCA is to carry out an assessment of the influence on the natural environment based on accurate calculations referring to all processes, which take place in the whole life cycle of a given product or technological system, i.a. with respect to energy, material and raw material consumption. The analysis of life cycle is undertaken on the basis of currently existing technologies, whereas foresight methods refer to the future and are based on the probability of certain phenomena occurrence.

Notwithstanding the above mentioned difficulties, combination of these methods can be fruitful. The LCA method allows to determine which sphere of influence has the biggest significance in case of technology under examination – influence on natural environment (including acidification, eutrophication, photochemical oxidation, depletion of the ozone layer, greenhouse effect), influence on ecosystem (toxicity of seawater, fresh water as well as soil), or its effect on human health (toxicity, carcinogenic effect). Moreover, it allows to compare different technologies and products and choosing the most optimal one, but also to analyze the given technology with respect to possibility of introducing changes in order to improve its environmental impact. Within the works of STRATA as a result of the discussion held, the most important guidelines for assessment of environmental technologies in technological foresights

were defined in PRECAUPRI project<sup>1</sup>. As a result, it was stated that the possibility of minimization or avoidance of negative impact on environment should be one of the most important assessment criteria. Furthermore, it was acknowledged that one of the most preferred methods of assessing impact on environment is the LCA.

In (Czaplicka-Kolarz, red. 2007a) the application of the LCA method in foresight projects was discussed, i.a.: Green Technology Foresight – 81 Options for the Environment<sup>2</sup>, Danish Foresight about Environmentally Friendly Products and Materials (Green... 2005) and in the LCA project Perspective Life-Cycle Assessment on Wind Power Technology by 2020 (Dannemand, Bjerregaard).

In the first mentioned project, the influence of adopting systems of environment protection in various technologies on these processes efficiency and effectiveness was analyzed, and its aim was to motivate the decision-makers to actions fostering the development of more effective, environmentally friendly technologies. As a result of the analysis it was stated that 60 out of 81 environmentally friendly technologies have a positive influence on the efficiency of the process and the effectiveness of technology development. The assessment of its influence on environment has enabled the identification of technology development scenarios in macro-political and economic aspect. Combining foresight methodology with the LCA has made it possible to present the following findings, which could be the basis of political decisions:

- price regulation of fossil fuels is the biggest obstacle for high-performance, environmentally friendly energy systems,
- public and private scientific research, knowledge transfer and well-directed national policy should support the dynamic development of technology,
- price regulation by the government should support the possibility of existence of certain technologies in the market,
- supervision and intervention by the government should stimulate the development of environmentally friendly technologies.

The aim of the Danish project was to identify and assess chances and scientific and technological possibilities of environmentally friendly technologies in Denmark. The outcome was to identify spheres, in which innovative environmentally friendly technologies could become not only a solution for ecological problems, but also contribute to business, production and consumption development. In another Danish project, which was a continuation of the project described above, analysis of environment potential and the main environmental threats in the spheres of nanotechnology, biotechnology and information-communication technology was carried out. The project was i.a. directed at the analysis of future, innovative solutions in the sphere of environment protection. Using the LCA methods to assess future environmental aspects has shown a few crucial aspects, e.g. that influence on environment is not always related to a particular process or material, but is a result of the activity in its entirety. It has led to a conclusion, that complex legislative solutions during the processes of implementing new solutions are needed. Foresight has also shown, that the analysis of

---

<sup>1</sup> [http://www.risoe.dtu.dk/rispubl/sys/syspdf/borup\\_paper.pdf](http://www.risoe.dtu.dk/rispubl/sys/syspdf/borup_paper.pdf) (accessed 2.11.2009)

<sup>2</sup> Tamże.

positive and negative aspects of influence on environment enables to find solutions to the problems in their initial stage, and also allows to create and adopt optimal technological development scenario in accordance with the rules of sustainable development.

The aim of another Danish project utilizing LCA in technology foresight for the wind power plants assessment was the analysis of wind turbine impact at the production and disassembly stages in a long term as well as determining currently available possibilities of waste disposal. In the project, LCA of existing wind power plants as well as future systems was conducted. The LCA results have shown, that end of turbine's life is worth particular attention – disassembly stage and waste disposal, with which the biggest influence on environment is connected, and changes of applied materials should be taken into consideration in the future being analysed.

## 2. SELECTED MATURE AND EMERGING TECHNOLOGIES IN COAL BASED POWER GENERATION

Technologies, which aim is to generate heat and/or electrical energy from coal, can be generally divided into two groups: technologies in which coal is directly combusted and technologies in which gas produced out of coal is utilized. The more detailed division of technologies based on hard coal and brown coal is to be found in Table 1.

**Table 1.** Division of technologies in coal mining industry

No.	Technology group	Technology type
1	Pulverised coal combustion	1.1 Moderate supercritical parameters
		1.2 Increased supercritical parameters
		1.3 Ultra-supercritical steam parameters
2	Fluidised bed combustion	2.1 Atmospheric: under-critical and supercritical
		2.2 Pressurized (PFBC)
		2.3 With circulating fluidized bed (CFB)
3	Integrated coal gasification combined cycle (IGCC)	3.1 Air-blown gasification
		3.2 Oxygen-blown gasification
		3.3 Partial gasification: GPCC, A-PFBC, GFBC
		3.4 IGFC units with fuel cells
4	Oxy-combustion	4.1 New units
		4.2 Retrofit
		4.3 CRB Oxy-combustion
5	Chemical Looping O <sub>2</sub> and CO <sub>2</sub>	5.1 Coal combustion with the use of chemical looping as O <sub>2</sub> carrier
		5.2 Coal gasification with the use of chemical looping as O <sub>2</sub> and CO <sub>2</sub> carriers

For further analysis with LCA and foresight method, five energy technologies were selected, which seem to be most significant: integrated gasification combined cycle IGCC with oxygen gasification and air gasification, pulverized coal combustion with supercritical parameters, atmospheric circulating fluidised-bed boiler as well as oxy-combustion. A short discussions of selected types of technologies are presented below (Czaplicka-Kolarz, red. 2007a; Szłęk et al. 2009).

**Pulverized coal combustion with supercritical parameters**

Owing to supercritical parameters of steam, in pulverized-fuel boilers with supercritical parameters, improvement of water circulation in power plant is obtained. However, hydrodynamics of steam-water cycle in such boiler differs considerably from traditional boiler and high temperature stresses can occur. For the construction of boilers creep-resisting, ferrite- martensitic and austenitic types of steels are used. Parameters of steam amount to around 25 MPa and 600°C. Further development aimed at attaining temperature of 700°C and 37.5 MPa will depend on the progress in the field of materials engineering. Hitherto, the largest in Poland once-through unit supercritical CFB boiler with supercritical steam parameters of 460 MWe (Foster Wheeler) is installed in Lagisza power plant.

**Power units with fluidised bed**

Technologies of combustion in fluidized bed are distinguished by flexibility in comparison with fuel – substantial amount of the deposit in a boiler causes that changes of fuel properties, such as calorific value, moisture or ash content do not cause either changes of combustion temperature or changes of generated heat flux. Co-firing of various types of fuel as well as using fuels of low calorific value is possible. Additional advantage of CFB boilers is lower amount of damaging pollutants emitted into the atmosphere. Its disadvantage is lower absolute efficiency in comparison with pulverized-fuel boilers, however, it is possible to obtain lower temperature of exhaust gas outlet. Mineral of the deposit in fluidised bed consists of limestone, which captures sulphur in the combustion process. Due to the use of air with oxygen depletion at the first stage of combustion, and then combustion of gas, occurrence of nitrogen oxide is avoided and steady temperature distribution in the chamber is obtained. Fluid technology, as a technology compliant with BAT, is recommended in the EU reference materials for large combustion sources.

**Integrated gasification combined cycle (IGCC)**

In IGCC, coal gasification is used in order to generate gas, which main components are hydrogen and carbon monoxide. Gas can be utilized as a biomaterial for chemical synthesis or can be combusted in a gas turbine in order to generate electrical and thermal energy. Composition and quality of generated gas are dependent on gasification medium, conditions in which reaction is carried out, composition and quality of fuel. Gasification medium can be air (air gasification) or oxygen (oxygen gasification). In the IGCC, gas generated out of coal after dedusting and desulphurization is combusted in gas turbine. In generator the energy of hot exhaust gas is used to produce electrical energy, and then in HRSG waste heat of the gas generates steam, which drives a steam turbine interconnected with separate electric generator. There are many IGCC systems in the world. The technology is believed to be interesting and it is developed fast. Pollutants are removed before gas is combusted in a turbine, and during combustion there is less emission generated.

**Oxy-fuel combustion**

Unlike conventional combustion technologies, instead of air, oxygen from air separation unit is supplied for combustion. Due to combustion in oxygen, waste gas

contains hardly nitrogen, that is why carrying out sequestration of carbon dioxide is much easier. CO<sub>2</sub> included in waste gas is partially recycled and mixed with oxygen for combustion so as to avoid quick corrosion of the devices. Technology is at the stage of pilot plant of the power of a few MW. In the year 2008, pilot power plant Vattenfall, Schwarze Pumpe of the power 30 MW with CO<sub>2</sub> trapping was commissioned. Considerable influence on technology has the development of technology of producing pure oxygen.

### 3. METHODOLOGY OF TECHNOLOGY FORESIGHT IN COAL BASED POWER GENERATION

Primary energy consumption as well as requisite minerals consumption in technological process and emissions of harmful substances are not the sole subject of technology assessment. These factors are extremely important because of their influence on the environment. However, for experts use of LCA constitute only one element of detailed analysis of the technology and developing scenarios of technological development in a given field. To what extent does this element become substantial in case of the technology of energy efficient use of coal?

Experts working on the project of *technology foresight* aim to examine possible, probable and preferred versions of the future. On the basis of their knowledge they should envisage long-term technological solutions and define key technologies. Interactive and requiring commitment from various participants method of discussion and analysis, allows the assessment of likelihood and threats connected with implementing particular technologies. Experts formulate strategic visions, identify actions which need to be taken in order to develop technology and finally formulate the development scenarios.

Foresight always conveys the vision enclosed in the scenario description.

For *future* technologies (which are at present at their research stage, for which prototype systems do not exist, but they are being developed and implemented), *prototype* (which are not utilized, but we are dealing with the stage of prototype system construction, in case of which their weaknesses and ways of eliminating them are known) and *industrially mature* (technologies employed at present, whose further use is well-founded) – a list of technologies along with SWOT/STEEP analysis is achieved.

Prioritization of such a list of technologies is based on its limiting to critical technologies fulfilling the applied criteria to the greatest extent. With respect to technologies of energy efficient use of coal, to such criteria belong: ensuring energy safety and possibility of implementing technology. Technologies, which achieve good rating of both parameters of the assessment become candidates for the final list of *critical technologies*.

*Key factors* are those, which combine in itself the interaction force with a great deal of correlation, indicating, which actions should be considered as a priority in the process of technology development. The group of key factors consists of i.a. costs, failure risk, safety and the possibility of implementing technology itself, social acceptability etc. On the basis of key factors and their envisaged behaviour, a few options of

development of the background environment are then created. Each option encompasses the same list of key factors. The difference between options comes down to diverse behaviour of individual factors. The most feasible options are then used in further formulation of development scenarios of technological advancement.

Key technologies applied simultaneously create one by one visions of sector's development, and in combination with key factors – scenarios. In this way, methodology of technology foresight applied in various projects of similar type can be outlined briefly (Czaplicka-Kolarz, red. 2007a, 2007b, 2008a, 2008b; Turek, red. 2008).

In case of technology of energy-efficient use of coal, experts were asked for an assessment of the technology in context of ensuring energy safety; moreover, they were asked for estimation of the possibility of implementation (or of further existence) of these technologies in Poland. What is more, experts took power efficiency, fixed and variable costs of the technology and energy consumption for own purposes into account and also estimated failure frequency of the technology.

Results of the assessment (as arithmetic mean of ratings of about 30 experts) are shown in Fig.1.

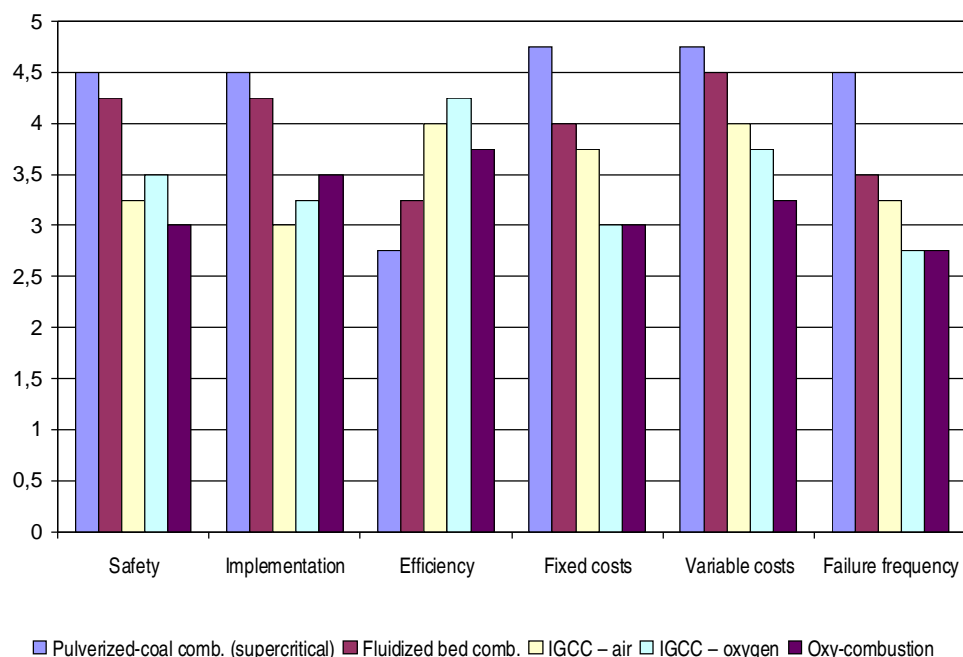


Fig. 1. Results of technology assessment by experts

Rys. 1. Wyniki oceny eksperckiej technologii

Assuming equal importance of key factors, in experts' opinion the highest total evaluation achieved combustion in atmospheric circulating fluidized bed (ACFB). Subsequent places in the rating were taken by: integrated gasification combined cycle with air gasification IGCC-air, integrated gasification combined cycle with oxygen

gasification IGCC-oxygen, oxy-combustion and pulverized coal combustion with supercritical steam parameters.

#### 4. LCA OF SELECTED CLEAN COAL TECHNOLOGIES

Life cycle assessment for selected five technologies of power generation was carried out with the use of Sima Pro programme. The functional unit was 1 GWh of generated energy. The fundamental input and output elements for analyzed technologies are juxtaposed below (Table 2).

**Table 2.** Selected input and output mass flows of clean coal technologies

		Unit	IGCC oxygen	IGCC air	Pulverized coal combustion (supercritical)	Fluidized bed combustion	Oxy-combustion
Input elements	Coal	Mg	372.00	432.15	379.35	161.19	392.9
	Electrical energy	MWh	123.02	121.9	0.06	1.00	
	Water	Mg	107.25	199.94	2.243		2199.2
	Absorber	Mg	20.45	15.32	38.53	5.08	
	Oxygen		2100 m <sup>3</sup>				806.4 Mg
Output elements	Electrical energy	GWh	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	CO <sub>2</sub> emission	Mg	340.66	411.41	763.26	288.48	84.6
	SO <sub>2</sub> emission	kg	41.79	0.23	0.19	0.24	
	NO <sub>x</sub> emission	kg	151.42	0.16	0.59	0.29	300.8
	CO emission	kg	135.68	0.48			
	Emission – dust	kg	35.55	0.04	0.03	0.08	30.1
	Sewage	Mg	101.35	191.28	382.47		
	Solid waste	Mg	50.96	48.72	30.72		30.1

**Table 3.** Calculated environmental impact of selected technologies [Pt]

Impact category		IGCC oxygen	IGCC air	Pulverized coal combustion (supercritical)	Fluidized bed combustion	Oxy-combustion
Human health	Carcinogenicity	454.00	22.20	19.10	5.87	430.51
	Respiratory problems – org.	3.32	0.23	0.24	0.06	5.71
	Respiratory problems – non-org.	1750.00	-625.00	1780.00	1280.00	4900.20
	Climate changes	2320.00	2270.00	4190.00	1580.00	2257.04
	Radioactivity	0.10	0.12	0.02	0.00	209.29
	Ozone layer depletion	0.97	0.08	0.07	0.02	2.76
Human health in total		4528.39	1667.62	5989.43	2865.95	7805.50
Ecosystem quality	Ecotoxicity	152.00	10.40	10.40	2.66	222.09
	Acidification	202.00	-33.40	286.00	150.00	486.45
	Soil utilization	76.30	6.01	8.38	1.86	1345.31
Ecosystem quality in total		430.30	-16.99	304.78	154.52	2053.84
Resources	Minerals	2.84	0.47	0.42	0.09	70.65
	Fossil fuels	4780.00	3460.00	3460.00	1210.00	6717.19
Resources in total		4782.84	3460.47	3460.42	1210.09	6787.84
TOTAL		9741.53	5111.10	9754.60	4230.60	16647.18



In the Table 3 results of LCA are presented. Magnitude of the impact of selected five technologies on natural environment in areas of human health, ecosystem quality and resource depletion is given in Ecopoints [Pt].

The biggest impact of combustion processes is observed in human health category, which is connected with climate changes, but also respiratory problems which stem from the presence of non-organic compounds. Resources depletion is the predominant impact of gasification processes, which is related to fossil fuel consumption (Fig. 2).

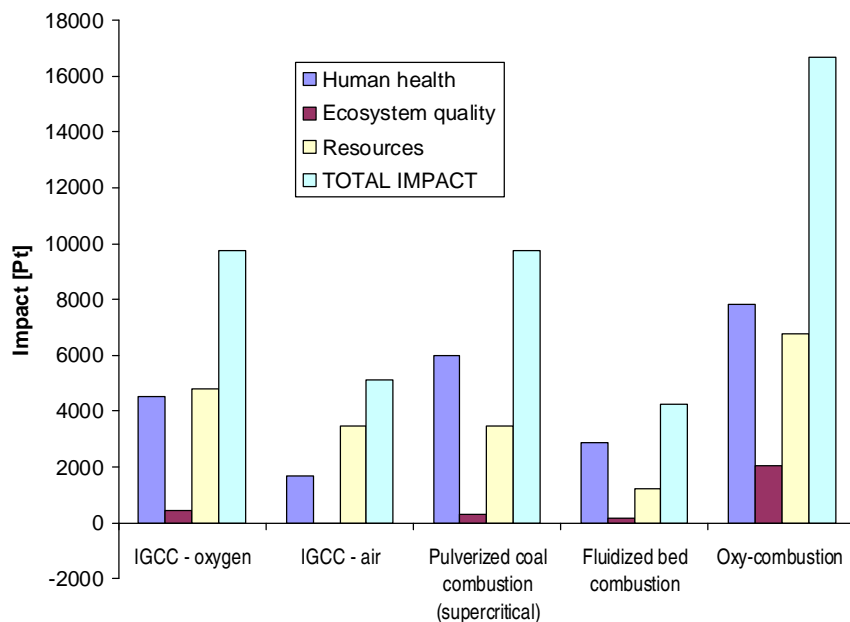


Fig. 2. Scale of impact on particular categories for selected coal technologies

Rys. 2. Wielkości oddziaływań w poszczególnych kategoriach dla wybranych technologii węglowych

The analysis has shown the following order of technologies of power generation from coal according to their increasing impact on the environment:

- Fluidized-bed combustion (ACFB).
- Integrated gasification combined cycle with air gasification IGCC – air.
- Integrated gasification combined cycle with oxygen gasification IGCC – oxygen.
- Pulverized coal combustion with supercritical parameters.
- Oxy-combustion.

This order reflects the level of technology maturity with respect to their influence on environment.

## 5. OBJECTIVE FUNCTION AS A METHOD OF OPTIMIZATION IN PRIORITIZING TECHNOLOGIES OF COAL-BASED POWER GENERATION

Optimization of processes with several responses is carried out on the basis of one criterion with constraints in the form of equality or inequality. One of the most common ways of solving optimization process problem with multiple responses is adopting generalized choice function developed by Harrington. In order to obtain choice function  $D$ , measured values of responses are transformed into dimensionless choice scale  $d$ . It is individual subjective value of choice function. It is related to achieved results  $y$  with a following relation

$$d = \exp[-\exp(-y_1)] \quad (1)$$

where:

$$y_1 = b_0 + b_1 y,$$

$y$  – result of the measurement,

$b_0, b_1$  – coefficients, which are determined for two values  $y$  determining appropriate values of choice function  $d$  (preferably  $0.2 < d < 0.8$ ).

On the basis of responses transformed into scale  $d$ , with the use of arithmetic operation a given overall choice coefficient  $D$  can be achieved. Moreover, if one of the responses will be absolutely undesirable – overall choice function will be equal to 0, irrespectively of values of remaining results. Mathematical expression fulfilling this condition is arithmetic mean of individual choice functions:

$$D = (d_1 \cdot d_2 \cdot \dots \cdot d_n)^{\frac{1}{n}} \quad (2)$$

where:  $n$  – number of measurements.

In this study, as  $y_i$  values, the following data being experts' assessment (in a scale 1–5) was adopted for an analysis:

$y_1$  – ensuring energy safety,

$y_2$  – possibility of implementing technology,

$y_3$  – technology efficiency,

$y_4$  – fixed costs,

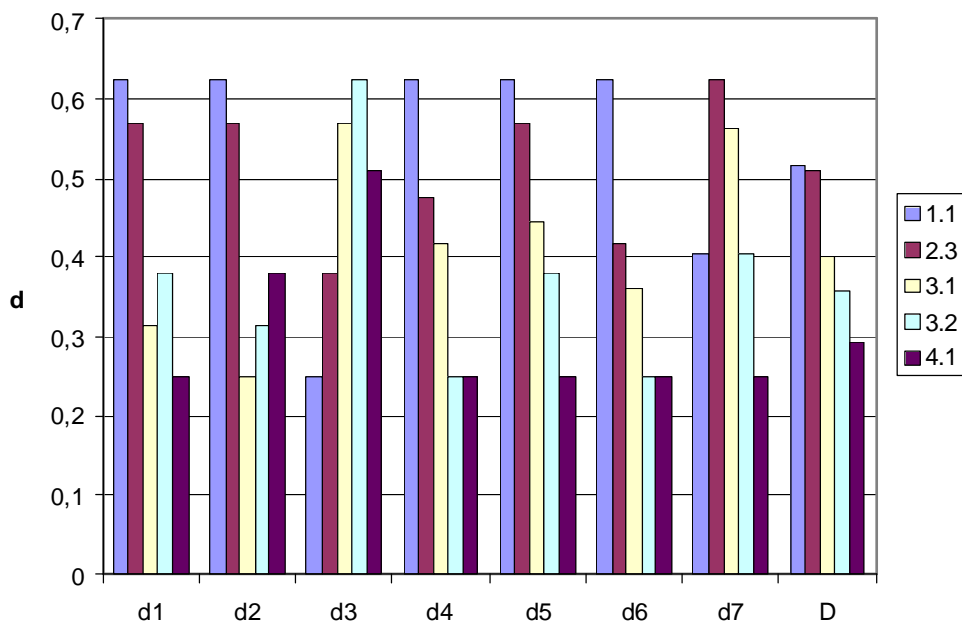
$y_5$  – variable costs,

$y_6$  – technology failure frequency.

Results of experts' assessment for five selected technologies are presented in Fig. 3. As  $y_7$  total value of ecoindicator was assumed, calculated by LCA and specified in Table 3. In this case minimum was searched when optimizing the function  $d_7$ .

For the described seven values of individual choice function, value of choice function  $D$  was found in accordance with the relation (2). The results have been shown in Fig. 3

Pulverized-coal combustion and fluidized bed combustion fulfil complex requirements better than gasification and oxy-combustion.



**Fig. 3.** Values of individual choice function  $d_i$  as well as value of overall choice function  $D$  for selected coal based power generation technologies

**Rys. 3.** Wartości szczegółowych funkcji wyboru  $d_i$  oraz wartość uogólnionej funkcji wyboru  $D$  dla wybranych analizowanych technologii energetycznego wykorzystania węgla

## CONCLUSIONS

Taking into consideration the results of experts' assessment in the scope of energy safety and the possibility of implementation of technology – the five technologies under examination have been put in the following order: pulverized-coal combustion with supercritical steam parameters, atmospheric circulating fluidized-bed ACFB, integrated gasification combined cycle with oxygen gasification, oxy-combustion, integrated gasification combined cycle with air gasification.

In the second approach, taking additionally subsequent criteria, i.e. technology efficiency, fixed and variable costs as well as technology failure frequency (criteria designated as  $y_3, y_4, y_5, y_6$ ) – the order is as follows: atmospheric circulating fluidized-bed ACFB, integrated gasification combined cycle with air gasification, integrated gasification combined cycle with oxygen gasification, oxy-combustion, pulverized-coal combustion with supercritical steam parameters.

The LCA results put the technologies in the following order: atmospheric circulating fluidized-bed (ACFB), integrated gasification combined cycle with air gasification, integrated gasification combined cycle with oxygen gasification = pulverized-coal combustion with supercritical steam parameters, oxy-combustion.

Final optimization with the use of  $D$  function gives the result:

- Pulverized-coal combustion with supercritical parameters = Atmospheric circulating fluidized-bed (ACFB).
- Integrated gasification combined cycle with air gasification.
- Integrated gasification combined cycles with oxygen gasification.
- Oxy-combustion.

The analysis carried out indicates that the most favourable results of assessment obtain technologies of high maturity level, whereas the poorest results seem to achieve technologies connected with oxygen utilization.

Combining the result of LCA with the results of experts' analysis caused slight but noticeable changes in technologies ranking. LCA take into account factors, which have considerable impact on natural environment (e.g. influence caused in building and demolition stages, influence caused by production of consumed material and environmental burdens connected with end of life stage). This is difficult to provide for in experts' analysis. Due to that fact involving LCA in technology prioritizing stage within foresight framework is entirely appropriate and allows to complete impartial results.

### References

1. Achnazarowa S.Ł., Kafarow W.W. (1982): Optymalizacja eksperymentu w chemii i technologii chemicznej. Warszawa Wydaw. Naukowo-Techniczne.
2. Borup M.: Green Technology Foresight as Instrument in Governance for Sustainability Technology Scenarios Research Programme, Riso National Laboratory, Denmark.
3. Czaplicka-Kolarz K. [red.] (2007a): Scenariusze rozwoju technologicznego kompleksu paliwowo-energetycznego dla zapewnienia bezpieczeństwa energetycznego kraju. Część 1. Katowice: Główny Instytut Górnictwa.
4. Czaplicka-Kolarz K. [red.] (2007b): Scenariusze rozwoju technologicznego kompleksu paliwowo-energetycznego dla zapewnienia bezpieczeństwa energetycznego kraju. Część 2. Katowice: Główny Instytut Górnictwa.
5. Czaplicka-Kolarz K. [red.] (2008a): Foresight polimerowy. Foresight technologiczny materiałów polimerowych w Polsce – Analiza stanu zagadnienia. Poznań, Instytut Włókien Naturalnych.
6. Czaplicka-Kolarz K. [red.] (2008b): Foresight polimerowy. Scenariusze rozwoju technologicznego materiałów polimerowych w Polsce. Poznań, Instytut Włókien Naturalnych 2008
7. Dannemand A.P., Bjerregaard E.: Prospective Life-Cycle Assessment on Wind Power Technology by 2020, System Analysis Department and Wind Energy Department. Riso National Laboratory.
8. Green Technology (2005): Foresight about Environmentally Friendly Products and Materials, Challenges from Nanotechnology. Biotechnology and ICT, Environmental Project No XXX Milijoprojekt.
9. Turek M. [red.] (2008): Scenariusze rozwoju technologicznego przemysłu wydobywczego węgla kamiennego. Katowice, Główny Instytut Górnictwa.
10. Szlęk A., Wilk R.K., Werle S., Schaffel N. (2009): Czyste technologie pozyskiwania energii z węgla oraz perspektywy bezpłomieniowego spalania. Rynek Energii nr 8.

### Cover letter

Authors' intention was analysing possibilities of using results of technology assessment by LCA method in technological foresight projects. Analysis was based on selected processes from the field of coal-based power generation. In authors' opinion, results of experts' assessment, which is commonly used in foresight project, can be substantially enhanced and verified due to LCA.

### Publications

1. Świądrowski J., Czaplicka-Kolarz K., Ludwik-Pardała M., Śliwińska A.: Scalone scenariusze rozwoju gałęzi wytwarzania, przetwórstwa i wykorzystania tworzyw polimerowych w Polsce. In: Scenariusze rozwoju technologicznego materiałów polimerowych w Polsce. Foresight Polimerowy. Czaplicka-Kolarz K., Editor. Poznań, Instytut Włókien Naturalnych 2008.
2. Kapusta K., Świądrowski J., Wójciak M.: Ekspertyzki prognozy rozwoju zaawansowanych technologii energetycznych. In: Prognozowanie w zarządzaniu firmą. P. Dittmann, Editor. Wrocław, Indygo Zahir Media, AE Wrocław 2008.
3. Śliwińska A., Czaplicka-Kolarz K.: Wybrane aspekty metodologii analizy cyklu życia odnawialnych źródeł energii (Selected aspects of LCA methodology in the field of renewable energy technologies). Czasopismo Techniczne – submitted for publication.

**Recenzent:** prof. dr hab. inż. Krzysztof Stańczyk