

An innovative method for testing solid fuels as a way for safe and sustainable use of coking coals

Innowacyjna metoda badania paliw stałych jako sposób na bezpieczne i zrównoważone wykorzystanie węgla koksowych

DOI: 10.15199/62.2024.2.14

A new computational model detg. the danger of the coking process (safe coking, risky coking, and dangerous coking) was developed considering humidity, ash and S contents, volatile matter content, dilatation, contraction, volume as well as indicators of coke strength after reaction and coke reactivity. The coking coal classifier was recommended for energy and coking plants sectors to improve the coal quality control, decrease wear of the coke plant chambers and protect the environment.

Keywords: coking, coking coal, CSR/CRI, computational model, laboratory test

Opracowano nowy model obliczeniowy określający niebezpieczeństwa związane z procesem koksowania (koksowanie bezpieczne, koksowanie ryzykowane oraz koksowanie niebezpieczne), oparty na badaniach uwzględniających wilgotność, zawartość popiołu, siarki i części lotnych, rozszerzalność, dylatację, skurcz, objętość oraz wskaźniki wytrzymałości koksu po reakcji (CSR) i umiarkowany wskaźnik reaktywności koksu (CRI).

Słowa kluczowe: koksowanie, węgiel koksujący, CSR/CRI, badania laboratoryjne

Przemysł wydobywczy oraz przetwórczy węgla kamiennego w Polsce wykorzystuje głównie surowiec krajowy, w niewielkim stopniu uzupełniany importem. W Polsce wydobywa się 3 główne rodzaje węgla: węgiel brunatny, węgiel kamienny typ 31.3–33, wykorzystywany głównie do wytwarzania energii elektrycznej, oraz węgiel koksujący typ 34.1–37.2, stosowany do produkcji koksu¹⁾. Podstawowym surowcem poza węglem energetycznym są węgle koksujące typu 34 oraz 35, których wielkość wydobycia wynosi ok. 13 mln t/r. Wzrost gospodarczy jest nierozdzielnie związany z wysokim zapotrzebowaniem na stal, co wiąże się z koniecznością produkcji najwyższej jakości koksu, paliwa wykorzystywanego w hutnictwie żelaza. Procesy technologiczne, zgodnie z którymi produkuje się koks,

wymagają stałej kontroli na każdym etapie przebiegu tego skomplikowanego procesu.

W ciągu ostatnich 20 lat produkcja stali surowej na świecie (*crude steel*) wzrosła z 850 mln t/r do ponad 1800 mln t/r przy produkcji koksu przekraczającej 600 mln t/r^{2, 3)}. Warto zauważyć, że globalna produkcja koksu stale rośnie (rys. 1). Głównym producentem węgla koksowego i koksu w Polsce jest Grupa Kapitałowa Jastrzębskiej Spółki Węglowej (JSW), która posiada 4 kopalnie podziemne oraz 3 koksownie. Udział węgla koksowego w ogólnej produkcji w Polsce wzrósł z 13,5% w 2013 r. do 21% w 2022 r.²⁻⁴⁾. Od 2017 r. produkcja koksu w zakładach JSW spadła poniżej 4 mln t/r przy rynkowym udziale na poziomie ok. 45%^{2, 3)}.



Dr Marcin DREGER (ORCID: 0000-0002-7250-2523) w roku 2015 ukończył studia na Wydziale Nauk Przyrodniczych Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach. W 2023 r. uzyskał stopień doktora na tym samym wydziale. Od 2020 r. jest zatrudniony w Centralnym Laboratorium Pomiarowo-Badawczym sp. z o.o. należącym do Grupy Kapitałowej JSW, gdzie obecnie pełni funkcję głównego specjalisty oraz rzeczoznawcy ds. ruchu zakładu górniczego. Specjalność – górnictwo.



Dr inż. Piotr CELARY (ORCID: 0000-0003-2677-279X) w roku 2017 uzyskał stopień doktora na Wydziale Infrastruktury i Środowiska Politechniki Częstochowskiej. Od 2017 r. jest zatrudniony w Centralnym Laboratorium Pomiarowo-Badawczym sp. z o.o. należącym do Grupy Kapitałowej JSW, gdzie obecnie pełni funkcję głównego specjalisty, koordynatora ds. zarządzania projektami oraz koordynatora ds. B+R+I. Specjalność – inżynieria środowiska.

*** Adres do korespondencji:**

Centralne Laboratorium Pomiarowo-Badawcze sp. z o.o., ul. Rybnicka 6, 44-335 Jastrzębie-Zdrój, e-mail: mdreger@clpb.pl

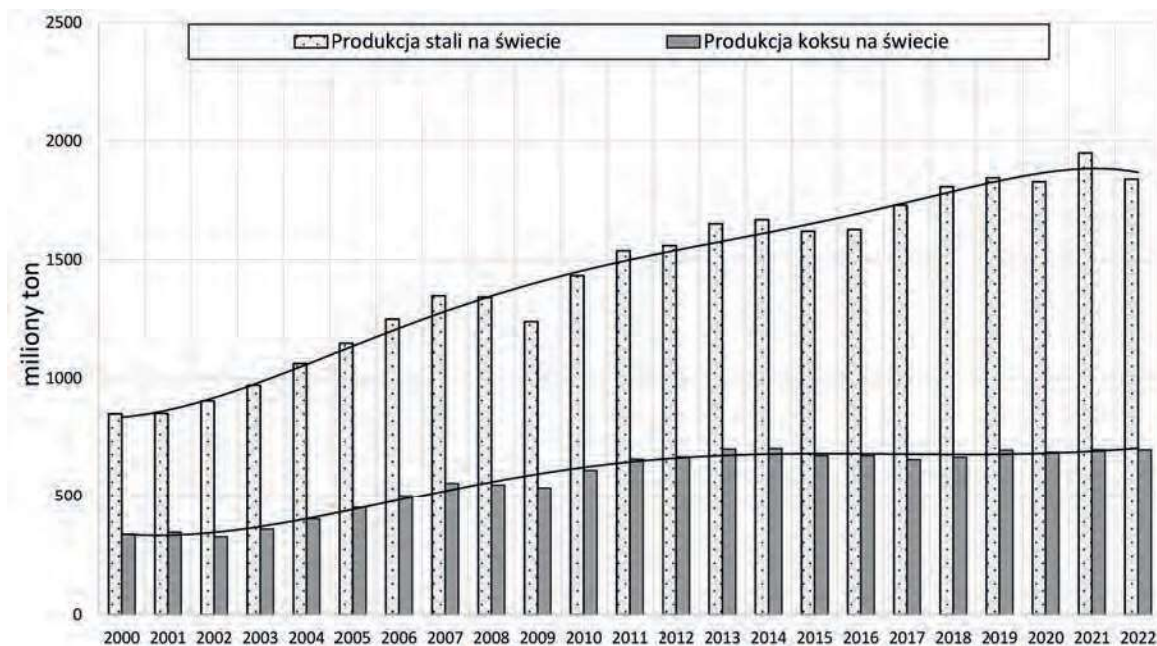


Fig. 1. World production of steel and coke in 2000–2022^{2,3)}

Rys. 1. Światowa produkcja stali oraz koku w latach 2000–2022^{2,3)}

Ze względu na różnice pomiędzy poszczególnymi rodzajami wydobywanych węgli koksowych prowadzi się szczegółowe badania laboratoryjne, aby przygotowane mieszanki wsadowe były bezpieczne w trakcie procesów wielkopiecowych. Powstawanie koku o dużej wytrzymałości i odpowiedniej reaktywności zależy od składu i właściwości koksujących mieszaniny. Centralne Laboratorium Pomiarowo-Badawcze sp. z o.o. (CLP-B) opracowało i wdrożyło nowe narzędzie, które pozwala ocenić możliwość wystąpienia niepożądanych reakcji w komorze koksowniczej, zapewniając zrównoważone wykorzystanie węgla koksującego jako surowca i produkcję najwyższej jakości koku w bezpiecznych warunkach. Zarówno optymalny dobór surowców, jak i skład mieszanki węgla koksowego bezpośrednio przyczynia się do realizacji zasady zrównoważonego rozwoju poprzez bardziej efektywne wykorzystanie zasobów naturalnych i lepsze parametry adaptacyjne procesu koksowania, zmniejszając energię potrzebną do jego przeprowadzenia, co przekłada się na wolniejsze zużycie baterii koksowniczych, a tym samym zmniejszenie zużycia surowców naturalnych (węgli koksujących).

Obecnie rynek krajowy nie oferuje odpowiedniego produktu pokroju opracowanego w CLP-B klasyfikatora, a istniejące na rynku alternatywy cechują się wyjątkowo małym rzędem wielkości badanej próbki, co stanowi istotny problem przy materiałach cechujących się znaczną niejednorodnością oraz wymagają znacznych modyfikacji celem spełnienia wymagań w zakresie szybkości wykonywania analizy, jednoznaczności otrzymywanych wyników oraz możliwości przełożenia ich na potrzeby sterowania procesami przemysłowymi. Jednym z najważniejszych problemów pojawiających się podczas procesu koksowania węgla jest m.in. ciśnienie rozprężania. Podczas zmian termicznych

zachodzących w strukturze węgla następuje m.in. uplastycznienie pojedynczych ziaren oraz utworzenie warstwy plastycznej, co może prowadzić do uszkodzenia pieca. Najpopularniejszymi i powszechnie stosowanymi wskaźnikami, znanymi z określania wytrzymałości poreakcyjnej w wielkim piecu są CRI (wskaźnik reakcji koku) i CSR (wytrzymałość koku po reakcji) opracowane przez Nippon Steel Corporation (NSC). Reakcyjność koku jest to zdolność do reagowania z wybranym czynnikiem utleniającym w ściśle określonych warunkach (temperatura, ciśnienie, ilość, masa i uziarnienie koku)⁵⁻⁷⁾.

W celu lepszego gospodarowania paliwem, jakim jest węgiel koksujący, w CLP-B, przeprowadzono badania i analizy, aby odpowiednio dobrać parametry dla powstającego klasyfikatora węgla koksujących, a w efekcie końcowym dla bezpiecznego przygotowania mieszanki węgla. Zdecydowana większość prac została oparta na akredytowanych metodach badawczych opisanych przez stosowne normy (polskie, PN; europejskie, EN; międzynarodowe, ISO) oraz procedury badawcze wdrożone i zwalidowane w laboratorium.

Część badawcza

Materiał

W badaniach stosowano węgiel typ 34.1–37.2 z kopalń węgla kamiennego należących do JSW SA, rozfrakcjonowany na 7 klas ziarnowych o jakości podanej w tabeli 1.

Metodyka badań

Metody i normy wykorzystywane w prowadzonych badaniach stosowanych do oznaczania parametrów węgla koksujących i koku podczas opracowywania klasyfikatora węgla koksujących zestawiono w tabeli 2. Metody

Table 1. Contents of moisture, ash and volatile matter in various grain size class of the tested coal

Tabela 1. Zawartość wilgoci, popiołu i części lotnych w różnych klasach ziarnowych badanego węgla

Seria badań	Zawartość, %			Fracja (mm), %						
	wilgoć	popiół	V ^{daf}	> 5	3,15–5,00	2,00–3,15	1–2	0,5–1,0	0,2–0,5	< 0,2
I	11,00	6,40	26,14	0,4	1,8	3,8	11,2	19,6	38,4	24,8
II	9,90	6,06	27,14	1,2	2,0	4,4	12,0	27,0	38,2	15,2
III	7,60	7,91	26,38	3,0	4,8	6,6	17,6	23,6	27,6	16,8
IV	11,20	8,73	26,00	2,0	3,2	5,6	16,0	23,6	28,0	21,6
V	12,00	5,90	25,24	0,2	2,8	5,6	15,4	25,6	28,0	22,4
VI	9,60	6,70	26,33	1,4	3,2	5,2	14,6	20,6	30,8	24,2
VII	9,00	8,07	26,80	0,8	1,8	5,2	14,2	21,0	29,2	27,8
VIII	10,40	6,60	26,73	1,6	3,2	5,4	16,0	22,4	28,2	23,2
IX	10,60	8,03	26,93	0,8	1,6	3,2	12,6	19,6	31,4	30,8
X	9,80	6,98	26,33	0,6	2,2	5,2	15,0	22,2	32,0	22,8
XI	9,80	8,32	27,76	1,0	2,4	5,6	19,0	21,4	24,4	26,2
XII	8,10	6,26	27,12	0,6	2,0	4,4	15,0	23,4	32,8	21,8

badawcze realizowane były za pomocą specjalistycznego wyposażenia pomiarowo-badawczego z zastosowaniem analizatora siarki i węgla (typ SC 144DR LECO), optycznego spektrometru emisyjnego ze wzbudzeniem w plazmie indukcyjnie sprzężonej (ICP-OES Ultima 2 Horiba JY), mineralizatorów, kruszarek szcękowych oraz walcowych, pieców mufłowych (FCF 7, FCF 7SM Czyłok, PM-6/1100 ITR), dylatometru DL-3 oraz stanowiska do koksovania węgla (SKW-1 i SKW-3 Karbolab ITR). W badaniach wykorzystano dostępne w CLP-B bogate zaplecze laboratoryjne oraz wymaganą zakresem projektu aparaturę analityczną oraz sprzęt laboratoryjny, w tym analizatory siarki i węgla, optyczne spektrometry emisyjne ze wzbudzeniem w plazmie indukcyjnie sprzężonej (ICP-OES), mineralizatory, stanowiska do laboratoryjnego koksovania węgla, stanowiska do wyznaczania wskaźnika reakcyjności koksu CRI oraz wskaźnika wytrzymałości po reakcyjności CSR, mikroskopy polaryzacyjne, dylatometry i plastometry. Wyniki badań wykorzystano do oceny wpływu podstawowych parametrów kokсотwórczych węgla kamiennego na wyniki oznaczania zmiany objętości mieszanki wsadowej.

Celem analizy statystycznej było określenie, pomiędzy którymi zmiennymi niezależnymi istnieją statystycznie istotne korelacje.

Część obliczeniowa

Klasyfikator węgla koksujących

Wyniki przeprowadzonych badań uwzględniono w nowym modelu obliczeniowym opracowanym w CLP-B, numerycznie opisującym wzorem (1) niebezpieczeństwo procesu koksovania S^k :

$$S^k = 100 \frac{\sum_{i=1}^k (P_i + O_i + |P_i - O_i|) W_i}{\sum_{i=1}^k W_i} \quad (1)$$

w którym P to k -elementowa tablica parametrów, O k -elementowa tablica odchyłek, W k -elementowa tablica wag, a R to k -elementowa tablica rang.

Koksovanie uznawano za niebezpieczne, gdy spełniona była nierówność (2):

$$S^k > S^k_{\text{niebezp}} \quad (2)$$

koksovanie było obarczone ryzykiem, gdy spełniona była nierówność:

$$S^k_{\text{niebezp}} \geq S^k > S^k_{\text{ryzyko}} \quad (3)$$

a koksovanie było bezpieczne, gdy spełnione była nierówność (4):

$$S^k \leq S^k_{\text{ryzyko}} \quad (4)$$

przy czym w nierównościach (2)–(4) S^k_{niebezp} oznaczało wartość krytyczną dla koksovania niebezpiecznego dla wyznacznika k -parametrowego, a S^k_{ryzyko} wartość krytyczną dla koksovania obarczonego ryzykiem dla wyznacznika k -parametrowego.

Table 2. Test methods and standards used for determination of coking coals and coke parameters during developing a coking coal classifier

Tabela 2. Zestawienie metod i norm badawczych stosowanych do oznaczania parametrów węgla koksujących i koksu podczas opracowywania klasyfikatora węgla koksujących

Badany parametr	Symbol	Norma lub metoda
Zawartość części lotnych	V ^{daf} , %	PN-G-04516:1998
Popiół	A ^d , %	PN-80/G-04512 i/lub PN80/G-04512/Az1:2002
Siarka	S ^d , %	PN-G-04584:2001
Wilgoć analityczna	W ^a , %	PN-80/G-04511
Skład ziarnowy	mm, %	PN-C-06304:2001
Wskaźnik reakcyjności koksu	CRI	ISO 18894:2004
Wskaźnik wytrzymałości po reakcyjności	CSR	ISO 18894:2004
Wskaźniki dylatometryczne	+/-	ISO 18894:2004
Właściwości plastometryczne	mm	ISO 18894:2004
Kontrakcja	a	PN-81/G-04517
Dylatacja	b	PN-81/G-04517

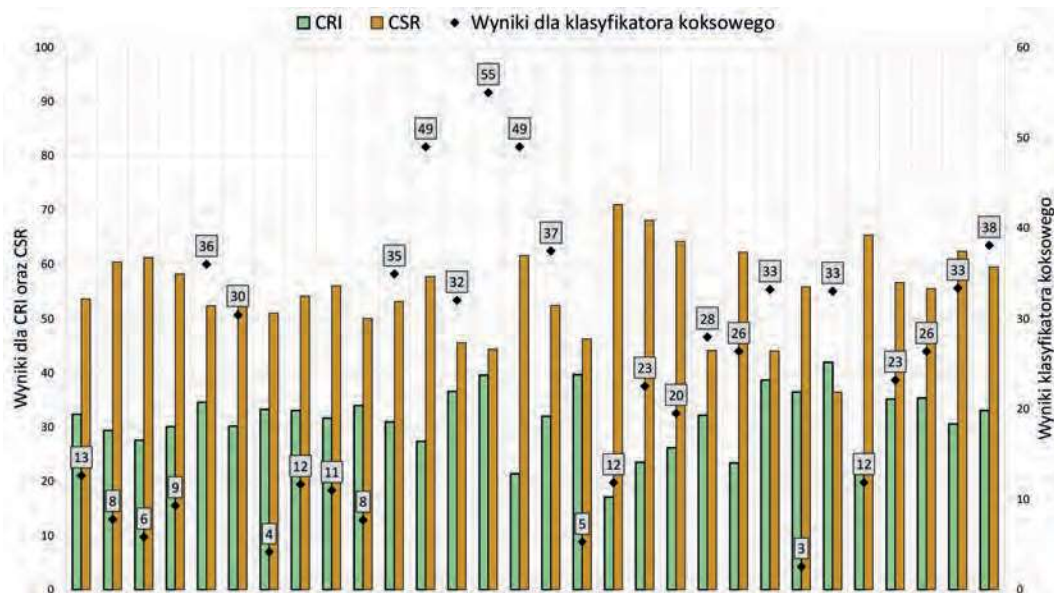


Fig. 2. Calculation results for the coke classifier and CRI/CSR indicators

Rys. 2. Wyniki obliczeń dla klasyfikatora koksowego oraz wskaźników CRI/CSR

Wyniki badań

Na podstawie zaproponowanego modelu obliczeniowego średni wynik równania (1) wyniósł 33, co wskazywało, że proces koksowania może być ryzykowny, przy czym większość wyników wynosiła poniżej 30, co świadczyło o możliwie bezpiecznym koksowaniu (rys. 2). W większości przypadków otrzymano pożądane przez przemysł koksowniczy wartości dla bezpiecznej pracy baterii koksowniczych, gdzie wskaźnik CSR był wysoki, a CRI stosunkowo niski (rys. 2). Innowacyjna, obliczeniowa metoda badań paliw stałych wykazała 3 zakresy określające niebezpieczeństwo procesu koksowania: koksowanie bezpieczne dla $S^{\circ} < 30$, koksowanie ryzykowane dla $30 > S^{\circ} > 35$ i koksowanie niebezpieczne dla $S^{\circ} > 35$.

Wieloskładnikowa analiza opracowana w CLP-B wskazała na możliwe ryzyko związane z przemianą węgla koksującego w procesie koksowania. Identyfikacja ryzyka w zarządzaniu surowcami krytycznymi była konieczna, aby zapobiec awariom baterii koksowniczych i innych urządzeń. Ponieważ produkcja koksu jest strategiczną gałęzią gospodarki krajowej, europejskiej i światowej, rozpoznawanie możliwych zagrożeń wynikających ze skomplikowania, jakim jest proces koksowania, dzięki nowemu modelowi obliczeniowemu stało się znacznie prostsze (wartość bezwymiarowa wskazuje na niebezpieczeństwo koksowania). Nowe narzędzie w postaci opracowanego i wdrożonego klasyfikatora węgla koksujących znajdzie szerokie zastosowanie w laboratoriach i koksowniach, ponadto nie wymaga dodatkowej aparatury, ponieważ cały niezbędny sprzęt jest na wyposażeniu placówek oraz jednostek badawczych.

Podsumowanie

Procesy technologiczne, zgodnie z którymi produkuje się koks wymagają stałej kontroli na każdym etapie przebiegu procesu, co jest istotnym warunkiem utrzymania oczekiwanych parametrów produktu, wydajności i poprawności

technologii oraz zapewnienia rentowności i bezpieczeństwa instalacji. Nowoczesne baterie koksownicze wymagają użycia najwyższej jakości koksu charakteryzującego się wysoką wytrzymałością koksu po reakcji (CSR) i umiarkowanym wskaźnikiem reaktywności koksu (CRI). Powstały w ramach badań klasyfikator węgla koksujących znajduje szerokie zastosowanie w sektorze energetycznym oraz koksowniczym. Wykorzystanie klasyfikatora ma pozytywny wpływ na środowisko naturalne poprzez lepszą kontrolę jakości wykorzystywanego surowca, zwiększenie kontroli nad zużyciem energii na potrzeby procesu koksowania oraz w konsekwencji wolniejszym zużyciem baterii koksowniczych. Innowacyjna, obliczeniowa metoda badań paliw stałych (węgla koksujących) zawiera się w trzech zakresach określających niebezpieczeństwo procesu koksowania (koksowanie bezpieczne, ryzykowne oraz niebezpieczne).

Prezentowane badania zostały zrealizowane w związku z projektem pt. „Prace badawczo-rozwojowe na rzecz opracowania innowacyjnej metody charakteryzowania paliw stałych”, w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014–2020 (Europejski Fundusz Rozwoju Regionalnego), numer grantu: WND-RPSL.01.02.00-24-0607/18.

Otrzymano: 03-01-2024

LITERATURA

- [1] PN-G-97002:2018-11, Węgiel kamienny, Klasyfikacja. Typy.
- [2] Raport zintegrowany JSW SA 2020, <https://www.jsw.pl/raportroczny-2020>.
- [3] Raport zintegrowany JSW SA 2022, <https://www.jsw.pl/raportroczny-2022>.
- [4] Raport roczny GIG 2022 o stanie podstawowych zagrożeń naturalnych i technicznych w górnictwie węgla kamiennego (red. J. Makówka), Wydawnictwo GIG, Katowice 2022.
- [5] I. Jelonek, Z. Jelonek, Zesz. Nauk. Inst. Gosp. Surowcami Mineralnymi i Energią PAN 2017, nr 100, 49.
- [6] L. North, K. Blackmore, K. Nesbit, M.R. Mahoney, Fuel 2018, **219**, 426.
- [7] P. Rutkowski, K. Chomiak, Oznaczanie reaktywności i wytrzymałości mechanicznej koksu, Politechnika Wroclawska, Wrocław 2020.