

OCENA JAKOŚCI PALIW NA PRZYKŁADZIE WĘGLI KAMIENNYCH I PELLETÓW DRZEWNYCH

FUEL QUALITY ASSESSMENT ON THE EXAMPLE OF BITUMINOUS COAL AND WOODEN PELLETS

Iwona Jelonek - Uniwersytet Śląski, Wydział Nauk o Ziemi, Sosnowiec

Zbigniew Jelonek - Uniwersytet Śląski, Wydział Nauk o Ziemi, Sosnowiec; PetroCoal, Jaworzno

Adam Nocoń - Uniwersytet Śląski, Wydział Nauk o Ziemi, Sosnowiec; P.P.H.U. Zamech, Czeladź

W artykule dokonano przeglądu i charakterystyki porównawczej węgla kamiennych oraz pelletów drzewnych. Przedstawiono przydatność badań petrograficznych i fizykochemicznych do oceny jakości węgla kamiennych i pelletów drzewnych. Ponadto celem tego badania było porównanie jakości pelletów drzewnych używanych w indywidualnych instalacjach centralnego ogrzewania oraz sprawdzenie, czy istnieją istotne różnice pomiędzy niecertyfikowanymi i certyfikowanymi pelletami drzewnymi. Badania wykazały, że nawet niewielkie różnice wartości fizykochemicznych mogą mieć wpływ na proces spalania pelletów drzewnych i potwierdzają dobrą jakość paliwa, która posiada popularny na rynku europejskim atest.

Słowa kluczowe: refleksyjność wityrynytu, skład macerałowy, petrografia węgla, pellety drzewne, klasyfikacje węgla

In the paper the review and comparative characteristics of coal and wooden pellets. In this paper suitability of petrographic and proximate and ultimate research in hard coal and wooden pellets quality assessment is presented. Moreover the purpose of this study was to compare the quality of wooden pellets used for domestic pellet-fired boiler and to verify if there are major differences between uncertified and certified wooden pellets. The analyses revealed that even small differences in chemical and physical properties content could have an influence on the wooden pellet combustion process and confirmed good-quality of a fuel with a popular in European market certification.

Keywords: vitrinite reflectance, maceral composition, coal petrography, wooden pellets, classifications of bituminous coal

Wprowadzenie

Ocena jakości paliw stałych związana jest z metodami, które wykonuje się według obowiązujących norm zarówno polskich, europejskich czy amerykańskich. Dla węgla kamiennych stosowane są również klasyfikacje wypracowane np. przez Europejską Komisję Gospodarczą Narodów Zjednoczonych. Przykładem takiej klasyfikacji jest międzynarodowa Klasyfikacja Węgla w Pokładzie [1] oraz Klasyfikacja Kodowa Węgla [2]. Dla biomasy stałej jakim jest np. pellet drzewny również zostały opracowane normy, które są wyznacznikiem przy ocenie podstawowych parametrów fizykochemicznych takich jak ciepło spalania, zawartość wilgoci i popiołu. Prowadzenie badań na tak szeroką skalę stanowi o jakości paliwa ale przede wszystkim o jego racjonalnym wykorzystaniu w procesach technologicznych w wielu gałęziach przemysłu. Nie bez znaczenia pozostaje aspekt ekonomiczny, ponieważ błędna ocena jakości paliw stałych przekłada się na ich cenę. Dlatego producenci paliw stałych coraz częściej zwracają szczególną uwagę na jakość dostarczanych usług w postaci analiz fizykochemicznych i petrograficznych ponieważ to na ich podstawie klient decyduje o jego zakupie.

Charakterystyka parametrów jakościowych węgla kamiennego

Ocena jakości węgla kamiennego dokonywana jest w oparciu o metody fizykochemiczne i petrograficzne. Otrzymane wyniki mogą mieć charakter uniwersalny, niezwiązany z kierunkiem wykorzystania węgla (np. ocena zawartości popiołu i wilgoci). W innym przypadku gdzie wskaźniki mają charakter specjalny (np. podatność przemiałowa dla węgla energetycznego) to na ich podstawie węgiel wykorzystywany jest w określonych procesach technologicznych.

Właściwości fizykochemiczne węgla kamiennego

Parametry określające jakość węgla z uwagi na jego wykorzystanie dzielimy na:

- *Parametry charakteryzujące ogólne cechy węgla (uniwersalne), uzyskiwane przy wykonywaniu analizy technicznej: zawartość wilgoci (W), zawartość popiołu (A), zawartość części lotnych (V^{daf}), ciepło spalania (Q_s), wartość opałowa (Q_i).*

Zawartość wilgoci (W)

Każda próbka węgla zawiera pewną ilość wilgoci. Poprzez

pojęcie wilgoci całkowitej rozumie się całkowitą zawartość wody w węglu (W_c). Wodę, która odparowuje w czasie suszenia próbki w temperaturze pokojowej, określa się mianem wilgoci przemijającej (W_{ex}). Do wilgoci przemijającej zalicza się także tzw. wilgoć kapilarną (złożową), która uchodzi z węgla zaraz po jego wydobyciu, jak również wilgoć nabytą, którą węgiel „nabywa” w trakcie różnych procesów np. wzbogacania na mokro. W węglu kamiennym całkowita zawartość wilgoci wynosi średnio 23% (dla porównania w torfie 85-96%). Wyróżnia się także wilgoć higroskopijną (W_h), czyli naturalną wodę wchłoniętą przez wewnętrzną powierzchnię węgla. Nadmierna ilość wilgoci może wpływać negatywnie na wartość opałową węgla i utrudniać procesy spalania [3].

Zawartość popiołu (A)

Popiół jest produktem wtórnym, otrzymywanym przez działanie wysokiej temperatury, czyli stałą pozostałością po spalaniu węgla. Oznaczenie popiołu polega na zważeniu pozostałości po całkowitym spalaniu węgla i jego wyprażeniu. Skład i zawartość popiołu nie jest konsekwencją procesów uwęglania, ale głównie warunków sedymentacyjnych czy rodzaju roślinności, co widoczne jest w poszczególnych odmianach petrograficznych węgla. Zawartość popiołu obniża kaloryczność węgla a przy jego nadmiarze, konieczne jest poddanie go procesom wzbogacania. Zawartość popiołu waha się w granicach od paru do parędziesiątu procent, natomiast siarki od ułamka jedności do kilku procent. Nie wyłania się tu żadna tendencja, a zróżnicowanie to występuje zarówno między całymi grupami pokładów, samymi pokładami jak i w poszczególnych pokładach. Średnia zawartość popiołu waha się w granicach 11-16%. Ze względu na zawartość popiołu węgle można podzielić na niskopopiołowe do 20% oraz wysokopopiołowe do 40% [3]. Do popiołu przechodzi część materii mineralnej węgla oraz macerały inertne [4].

Do istotnych własności popiołu należy: temperatura mięknięcia i temperatura topnienia. Wysokość tych temperatur zależna jest od składu chemicznego popiołu. Składnikami wpływającymi na wzrost temperatury topnienia są: krzemionka SiO_2 oraz korund Al_2O_3 . Rolę topnika, obniżającego temperaturę topnienia, spełnia tlenek żelaza Fe_2O_3 . Ponadto w popiele występują tlenki wapnia CaO i magnezu MgO oraz siarczany np. $CaSO_4$ [5].

Zawartość części lotnych (V^{daf})

Części lotne stanowią część bezwodnej masy węgla, która podczas poddawania węgla procesom prażenia, bez dostępu powietrza, przechodzi w stan lotny. Oznaczenie tego parametru polega na umieszczeniu próbki analitycznej w tyglu zamkniętym w temperaturze $850^\circ C$ przez okres 7 minut, a następnie na ustaleniu poprzez ważenie próbki strat masy badanego węgla. Im większa zawartość części lotnych w węglu, tym łatwiejszy zapłon i szybsze spalanie węgla. Zbyt niska zawartość części lotnych prowadzi do utraty stabilności procesu spalania. Od zawartości części lotnych zależy do jakiego ziarna należy zmielić węgiel spalany w paleniskach pyłowych. Im mniej części lotnych, tym drobniej musi być on zmielony. Niewielkie różnice w zawartości części lotnych, w granicach występujących w energetycznych węglach z GZW, nie mają większego znaczenia dla procesu spalania, gdyż z zawartością części lotnych wzrasta zawartość wilgoci higroskopijnej. Obydwie te cechy działają w odwrotnym kierunku, powodując wyrównanie odgazowania węgla. Wraz z głębokością zgodnie z regułą Hilta stwierdzono ubytek części lotnych. Węgiel kamienny zawiera

średnio 4-43% części lotnych, dla porównania węgiel brunatny zawiera 41-65% [3].

Ciepło spalania (Q_s) i wartość opałowa (O)

Ciepło spalania paliwa stałego jest to ilość ciepła wydzielająca się przy całkowitym spalaniu paliwa stałego w bomie kalorymetrycznej, w atmosferze tlenu w odniesieniu do temp. $25^\circ C$, na jednostkę masy paliwa (wg normy PN-81-04513). Natomiast wartość opałową oblicza się na podstawie ciepła spalania, które jest pomniejszone o ciepło parowania wody wydzielonej z węgla podczas jego spalania.

Wartość opałowa zależy również od zawartości popiołu i wilgoci w paliwie. Zwiększenie ilości balastu obniża wartość energetyczną paliwa, zmusza do spalania większej ilości węgla [6].

- *Parametry charakteryzujące skład pierwiastkowy*, który otrzymywany jest w wyniku analizy elementarnej to: C, H, O, N, S, rzadko P i Cl.

Węgiel

Zawartość węgla wyraża bardzo dobrze stopień uwęglania, a zwłaszcza stosunki C/O i C/H. Parametr ten zachowuje się odwrotnie proporcjonalnie do zawartości części lotnych. Wraz ze stopniem uwęglania zawartość pierwiastka C wzrasta, dla przykładu dla węgla brunatnego wynosi on 58-77%, a węgla kamiennym już 76-93% [3].

Wodór

Zawartość wodoru mówi o genetycznym typie węgla (humusowy, sapropelowy) i jest zależny od rodzaju materiału węglotwórczego. Wraz ze wzrostem stopnia uwęglania zawartość tego pierwiastka spada i dla węgla kamiennego wynosi średnio 1,5-5,8% (maksimum przydana na węgiel gazowy) [3].

Tlen

Zawartość tlenu w węglu jest odwrotnie proporcjonalna do jego stopnia uwęglania. W węglu kamiennym zawartość tlenu waha się w granicach 2-17%, a w antracytach już tylko ok. 2%. Wpływ na zawartość tlenu mogą mieć różnego rodzaju procesy, którym węgiel może być poddany tj. utlenianie czy wietrzenie. Procesy te mogą przyczyniać się do występowania węgla o tym samym stopniu utlenienia, a różnej zawartości pierwiastka tlenu [3].

Azot

Do występowania pierwiastka azotu w węglu przyczyniają się niektóre substancje zawarte w roślinach węglotwórczych, co jest równoznaczne z brakiem uzależnienia od stopnia uwęglania (wyjątek stanowi antracyt). Jedyną tendencją zaznacza się w większej zawartości azotu w węglach permskich, dwukrotnie przewyższającą zawartość w węglach karbońskich. Zjawisko to jest spowodowane zróżnicowaniem dostarczanego materiału roślinnego, najniższe zawartości azotu wykazują węgle utworzone z tkanki drzewnej. Azot jest ważnym parametrem dla węgla koksowych, gdyż jego zawartość wskazuje na wychód związków azotu w produktach termicznego rozkładu węgla. Dla porównania w węglu kamiennym zawartość azotu wynosi 0,6-2,8%, w węglu brunatnym 0,6-2,4%, a w torfie 0,9-2,9% [3].

Siarka

Kolejnym bardzo istotnym parametrem charakteryzującym jakość węgla jest zawartość pierwiastka siarki. Występująca w węglu siarka może być pochodzenia organicznego (SO), jak również może być związana z substancją mineralną, siarka nieorganiczna (SM) - Siarka organiczna związana jest z materiałem wyjściowym - roślinnym, natomiast nieorganiczna występuje głównie w postaci pirytu. W węglu w analizie

chemicznej wyróżnia się kilka rodzajów siarki tj.: całkowitą (S_t), czyli całą siarkę w węglu, również siarkę popiołową (S_A), zawartą w popiele, jak i siarkę palną (S_p), obejmującą tę część siarki, która przy spalaniu uszła do atmosfery. Średnia wartość siarki całkowitej dla węgla kamiennego w GZW wynosi 1,24 (max. 4,5%) [3, 6].

Podczas procesu spalania, w wyniku utleniania powstaje SO_2 . W momencie wejścia w związek z wodą, tworzy kwas siarkowy, który może powodować korozję w kotle [5].

Fosfor

Pierwiastki śladowe występują w węglach w niewielkich ilościach, tylko lokalnie stwierdza się ich podwyższoną zawartość. Zawartość fosforu jest nieznaczna i wynosi od 0,3-0,5%. Obecność fosforu ma znaczenie praktycznie tylko dla węgla koksowego, gdyż stanowi on składnik szkodliwy dla jakości koksu metalurgicznego [3]. Zawartość fosforu może również negatywnie wpływać na procesy spalania w kotle [5].

Chlor

Chlor stanowi szkodliwą domieszkę w węglach i może negatywnie oddziaływać na instalację kotła [5].

- *Parametry otrzymywane w wyniku analizy technologicznej węgla*, np. w analizach własności koksowniczych węgla to: zdolność spiekania (RI), wskaźnik wolnego wydymania (SI), własności dylatometyczne, np. kontrakcja (a) i dylatacja (b), ciśnienie rozprężania (P_{max}).

Zdolność spiekania (RI)

Zdolność spiekania określana jest liczbą Rogi i jest to jedna z tych własności węgla, która podczas odgazowywania węgla sprzyja tworzeniu się koksu (PN-81/G- 04518). Zgodnie z normą w tyglu miesza się jeden gram badanego węgla rozdrobionego poniżej 0,2 mm oraz 5 g wzorcowego antracytu o ziarnie 0,3-0,4 mm. Po wymieszaniu tych dwóch typów węgla obciąża się je stalowym ciężarkiem o masie 110-115g. Oznaczenie węgla polega na ogrzewaniu mieszanki węgla do temperatury $850 \pm 15^\circ C$ w piecu elektrycznym, pod stałym ciśnieniem, bez dostępu powietrza, a następnie mierzy się wytrzymałość mechaniczną próbki wykorzystując metodę bębnową (tzn. skoksowaną pozostałość waży się i przesiewa na sitach o wymiarze oczka 1 mm, a następnie ponownie waży). Rozpiętość wskaźnika Rogi to 1-100 (teoretyczna), natomiast w praktyce najlepiej spiekające się węgle wykazują $RI = 85$ [3].

Wskaźnik wolnego wydymania (SI)

Zgodnie z wytycznymi normy (PN-ISO 501:2007), jest to numer zarysu wzorca najbardziej zbliżonego do otrzymanego zarysu koksiku. Poprzez pojęcie wolne wydymanie rozumie się zwiększenie objętości plastycznej masy węgla, a metoda oznaczania polega na ogrzewaniu (w sposób zapewniający swobodne zwiększanie objętości do temp. $820 \pm 5^\circ C$ w ciągu 150 s), próbki węgla w zamkniętym tyglu. Próbkę zgodnie z normą powinna ważyć około 1 g z uziarnieniem poniżej 0,2 mm. Wskaźnik otrzymywany jest poprzez porównanie otrzymanego kształtu próbki uplastycznionej masy węgla z odpowiednimi wzorcami (1-9 SI) [3].

Wskaźniki własności dylatometycznych

Wszelkie zmiany węgla zachodzące podczas jego ogrzewania określane są mianem własności dylatometycznych. Pomiar dokonywane są w stalowej rurze z oznaczeniem wartości liczbowych skurczu, czyli kontrakcji (a) oraz wydymania, czyli dylatacji (b). Dokładny pomiar polega na powolnym ogrzewaniu słupka węgla pod stałym ciśnieniem i pomiarze zmian długości tego słupka. Wyniki dokonanych pomiarów są

przenoszone na układ współrzędnych i wykreślana jest krzywa dylatacji. Dylatacja charakteryzuje zmiany zachowania się węgla w trakcie koksowania, wykazują ją węgle orto-koksowe i meta-koksowe oraz niektóre węgle gazowo-koksowe. Kontrakcję wykazują tylko węgle płomienne, gazowo-płomienne oraz semi-koksowe [3].

Ciśnienie rozprężenia (P_{max})

Ciśnienie rozprężenia to maksymalne wychylenie wskaźniki manometru dla zawartych w próbce węgla części lotnych. Początkowo próbkę węgla należy wyprażyć, aż próbka zamieni się w koks, następnie umieszczamy próbkę w tygielku, podgrzewamy próbkę, która zaczyna się topić i w konsekwencji napiera na tłoczek, który w zależności od ilości części lotnych wychyla wskazówkę monometru. Parametr ciśnienia rozprężenia wpływa na wytrzymałość mechaniczną koksu [3].

Właściwości petrograficzne węgla kamiennego

Zdolność odbicia światła (R_c)

Zdolność odbicia światła mierzona jest na macerale z grupy wityrynytu - kolotelinicie. Jest to parametr, który odzwierciedla stopień uwęglenia węgla oraz koreluje się dobrze z zawartością części lotnych oraz pierwiastkiem C. Wskaźnik ten jest bardzo istotny w ocenie jakości dla węgla koksowych i w klasyfikacjach technologicznych [3, 7].

Skład macerałowy

Grupa wityrynytu: macerały z tej grupy rozwinęły się z tkanek drewna i parenchymy pochodzących z pni, korzeni oraz liści zbudowanych z celulozy i ligniny. W zależności jaki był proces dekompozycji, stopień natężenia żelifikacji i uwęglenia, struktury komórkowe mogą być widoczne w różnym stopniu lub też niewidoczne. Macerały z tej grupy są koloru szarego do jaskrawobiałego, a ich refleksyjność jest wyższa od macerałów grupy liptynyty i niższa od macerałów grupy inertynyty. W pokładach węgla kamiennego występuje w postaci warstewek o zmiennej grubości lub tworzy masę podstawową łączącą inne macerały w węglu Grupa wityrynytu jest w całości reaktywna (zaczyna się na poziomie 0,5% R_c , a max. osiąga przy wartościach 1,0 - 1,2% R_c). Jeśli chodzi o znaczenie praktyczne to w węglach o średnim stopniu uwęglenia stosunkowo łatwo przechodzi w stan plastyczny w czasie koksowania i może być głównym źródłem naturalnego gazu [7].

Grupa liptynyty: posiada w słabo uwęglonych węglach kamiennych barwę od pomarańczowo – brązowej do ciemnobrązowej, natomiast w węglach koksujących barwę szarą lub perłowoszarą. Refleksyjność liptynyty jest najniższa ze wszystkich grup macerałów w tym samym węglu. Macerały liptynyty w zależności od ich genezy mogą zawierać sporynę, kutynę, suberynę, terpeny, estry, fenole oraz oleje roślinne. Są one także bogate w części lotne. Poszczególne macerały z tej grupy tj.: kutynit, rezynit i sporynit zbudowane są z:

- kutynit z epiderm, liści i łodyg roślin kopalnych (kutikule),
- rezynit powstał z nagromadzenia żywic,
- sporynit tworzą egzyny kopalnych megaspor, miospor i ziaren pyłków. Pozostałe macerały należące do grupy liptynyty w tym eksudatynit i fluorynit występują najczęściej podrzędnie, lub śladowo. Bituminit w znacznych ilościach spotykany jest w węglach sapropelowych. Alginit masowo występuje w bogheadach, a kennelach i węglach humusowych spotykamy jest sporadycznie. Liptynit jest ważnym, również technologicznie, składnikiem nisko i średnio uwęglonych węgla. W węglach

karbońskich występuje regularnie w ilości około 15% [7].

Grupa inertynitu: macerały tej grupy posiadają refleksyjność zbliżoną do grupy wityrnytu i często wiele wyższą od niej. Barwa inertynitu jest białawoszara do jaskrawobiałej. Cechą charakterystyczną tej grupy jest duża zawartość pierwiastka C i niska zawartość wodoru i tlenu. Poszczególne macerały z tej grupy takie jak fuzynit, semifuzynit, makrynit, sklerotynit, mikrynit, inertodetrynit zbudowane są z:

- uzynit powstał z tkanki korowej, kalamitów i lepidofitów,
- semifuzynit pochodzi z wewnętrznych partii pni spalonych podczas pożarów lub może być produktem utlenienia materii organicznej,
- makrynit powstał z żelu podczas fuzynityzacji,
- sklerotynit utworzył się z różnych fragmentów grzybów kopalnych,
- mikrynit powstał po wydzieleniu się wtórnych żywic z bituminitu,
- inertodetrynit jest macerałem zbiorczym zbudowanym z okruszków fuzynitu, semifuzynitu, mikrynit i sklerotynitu.

Termin inertynit oznacza, że macerały tej grupy są obojętne w procesie koksowania - bardziej obojętne niż grupa liptynitu i wityrnytu [8]. Reaktywny inertynit, charakteryzuje się podatnością na procesy technologiczne, w tym spalanie, należy tu zaliczyć mikrynit, część semifuzynitu oraz inertodetrynit. Reaktywny inertynit w miarę wzrostu uwęglenia (w węglach chudych i antracytowych) staje się całkowicie inertny [7].

Parametry jakościowe pelletu drzewnego

W Polsce w przeciwieństwie do węgla kamiennego, pellet drzewny jest paliwem stałym, który nie jest tak popularny jak wspomniany węgiel kamienny. Jednak statystyki pokazują, że na rynku polskim wzrasta produkcja pelletu drzewnego oraz

zainteresowanie ze strony zarówno indywidualnych odbiorców jak energetyki przemysłowej na ten produkt. Z badań przeprowadzonych przez Bałtycką Agencję Poszanowania Energii (BAPE) produkcja tego paliwa w 2013 r. wynosiła ok. 650 tys. ton, a w 2015 r. wyniosła już ponad 900 tys. ton. W porównaniu z produkcją pelletu drzewnego na rynkach światowych o czym informuje w swoim raporcie Europejskie Stowarzyszenie Biomasy AEBIOM Statistical Report 2016 wyniosło 14,1 mln ton w 2015 r. Przewiduje się, że w roku 2017 r. produkcja pelletu drzewnego przekroczy 1 mln ton o czym dowiemy się już w krótkim czasie po opublikowaniu przez AEBIOM raportu za 2017 rok.

Obecnie na rynku krajowym największą popularnością (oraz najwyższymi cenami) cieszy się pellet z drzew iglastych z certyfikatami DIN Plus i EN Plus A1 (rys. 1 a), dostępny jest także pellet z upraw mieszanych liściasto-iglastych (rys. 1 b) oraz z trocin wyłącznie drzew liściastych (rys. 1 c).

Właściwości pelletu z popularnymi na rynku europejskim certyfikatami zestawiono w tabeli 1. Pellet pochodzący z trocin drzew różnego rodzaju różni się uzyskiwanymi wartościami opałowymi, zwięzłością i zawartością popiołu.

Wyłonienie najlepszej mieszanki dostępnej na rynku nie jest więc możliwe śledząc certyfikaty otrzymane przez producentów co świadczy o potrzebie przeprowadzenia zunifikowanej procedury analitycznej. Należy zaznaczyć także, że certyfikacja pelletu jest dobrowolna, więc część producentów zwraca się jedynie do DIN CERTCO, która jest placówką certyfikującą DIN Niemieckiego Instytutu Normalizacyjnego oraz Stowarzyszenia Dozoru Technicznego Rheinland Gruppe, inni producenci pozyskują tylko certyfikację EN Plus, a jeszcze inni decydują się na uzyskanie obu certyfikatów.

Aktualnie pellet służący do spalania w kotłach na paliwa stałe dostępny w obiegu handlowym posiada atesty jakości wydawane np. przez zagraniczne instytucje, bądź jest atestów pozbawiony. Warto zwrócić uwagę na niespójność między



Rys. 1. Pellet dostępny na rynku polskim przeznaczony do spalania w kotłach c.o. na paliwa stałe. 1A- pellet z trocin drzew iglastych, 1B- pellet z trocin drzew iglastych i liściastych, 1C- pellet z trocin drzew liściastych

Fig. 1. Pellets used for combustion in solid fuel central heating boilers that are available in the Polish market. 1A- Pellets from sawdust of coniferous trees, 1B- Pellets from sawdust of coniferous and deciduous trees, 1C- Pellets from sawdust of deciduous trees

Tab. 1. Porównanie wybranych wartości granicznych wymaganych w certyfikacji wg normy PN-EN ISO 17225-1, DIN plus oraz wymogów ENplus® opartych na międzynarodowych standardach: ISO 17225-2

Tab. 1. The comparison of selected limit values required for certification in accordance with the PN-EN ISO 17225-1 standard, and DIN plus and ENplus® quality certification schemes based on the ISO 17225-2 standard

Właściwości	PN-EN	DIN Plus	EN Plus A1
Wilgotność	≤ 12 %	10 %	≤ 10 %
Średnica	~6 lub ~8 mm	4~10 mm	~6 lub ~8 mm
Zawartość popiołu	< 0,5 %	< 0,5 %	≤ 0,7 %
Wartość opałowa	≥ 17 MJ/kg	> 18 MJ/kg	≥ 16,5 MJ/kg

wymaganiami polskich norm: PN-EN ISO 16559; PN-EN ISO 17225-3; PN-EN 15234-1; PN-EN 15234-2, a popularną na rynku polskim certyfikacją EN Plus oraz DIN Plus (tab. 2), a także na różnice pomiędzy wymaganiami atestacji DIN Plus czy EN Plus (tab. 1).

Parametry analityczne pelletu drzewnego

Preferowana zawartość wilgoci dla pelletu drzewnego mieści się w granicy od 5 do 10% (wagowych), odchylenia od tych wartości przekładają się, że im wyższa zawartość wody, tym niższa zawartość energii oraz przy zawartości wody >15% może nastąpić rozkład biologiczny pelletu drzewnego.

Zawartość popiołu powyżej 1,5% (wagowych) wskazuje na obecność dodatków, zwiększa ryzyko powstania żużli oraz zmusza użytkownika do częstego jego usuwania.

Niska wartość opałowa >16 MJ/kg skutkuje pogorszeniem procesu spalania oraz obniża wartość ekonomiczną produktu. Rozmiar pelletu determinowany jest do zaleceń producentów instalacji CO, którzy zalecają max 8 mm pellet do pieców montowanych w gospodarstwach indywidualnych.

Material badawczy i przyjęta metodyka badań

Do badań pobrano próbki węgla z pokładów grupy 300, 400 i 500 należących do poszczególnych serii litostratygraficznych karbonu produktywnego GZW. Dzięki uprzejmości pracownikom z poszczególnych zakładów górniczych na kopalniach należących do Jastrzębskiej Spółki Węglowej S.A. oraz Tauron – Wydobycie pobrano w sumie dziesięć próbek węgla.

Próbki pelletów drzewnych zostały zakupione od producentów oraz tych, które były w obiegu handlowym w sezonie grzewczym 2017/2018 roku. W sumie przebadano pięć próbek pelletu drzewnego w tym jedna próbka pelletu drzewnego posiadała atest EN Plus A1 oraz cztery próbki pelletów drzewnych, które nie posiadały atestu jakości w tym jedna próbka stanowiła przemysłowy pellet drzewny.

Próbki do badań petrograficznych pobrano i przygotowano zgodnie z obowiązującymi międzynarodowymi normami: PN – ISO 7404-2: 2005, PN – G – 04501: 1998, PN – 90/G – 04502. 1990.

Analizę macerałów w świetle białym wykonano na mikroskopie Axio Imager M2.m firmy ZEISS z automatycznym stolikiem integracyjnym stosując metodę immersji olejowej przy powiększeniu 500x. Analizę zawartości grup maceralnych dokonano na wypolerowanej powierzchni zglądu ziarnowego w 500 punktach wyznaczonych na przecięciu krzyża nitkowego umieszczonego w okularze. Podczas analizy, stosując klasyfikację zalecaną przez ICCP (1994), wydzielono trzy grupy macerałów: wityrynytu, liptynytu i inertynytu. Macerały opisano szczegółowo zwracając uwagę na barwę, zdolność refleksyjną, morfologię, relief oraz stopień zachowania.

Analiza refleksyjności została wykonana w świetle odbitym w imersji olejowej z zastosowaniem filtra interferencyjnego o długości fali świetlnej $\lambda = 546$ nm. Pomiary dokonano na powierzchni kolotelinitu, zgodnie z obowiązującą normą PN-ISO 7404 -5:2002. Na każdej próbce wykonano 100 pomiarów, przesuując preparat automatycznie za pomocą stolika integracyjnego.

Pozostałe analizy fizykochemiczne dla węgla oraz pelletu drzewnego przeprowadzono w akredytowanym laboratorium gdzie zastosowano procedury obowiązujące wg norm ISO.

Wyniki badań

Wyniki analizy fizykochemicznej próbek węgla pobranego z poszczególnych zakładów górniczych przedstawiono w tabeli nr 3.

Analiza petrograficzna obejmowała pomiary refleksyjności wityrynytu, określenie składu macerałowego gdzie wyróżniono trzy główne grupy oraz materię mineralną. Analizy zostały przeprowadzone łącznie na dziesięciu próbkach. Wyniki przedstawiono w tabeli 4.

Tab. 2. Właściwości pelletu drzewnego stosowanego jako paliwo do kotłów grzewczych na paliwa stałe - porównanie wartości granicznych wymaganych w certyfikacji wg norm niemieckich (DIN plus, DIN 51731), austriackich (Ö NORM M 7135) oraz wymogów ENplus® opartych na międzynarodowych standardach: ISO 17225-2

Tab. 2. Properties of wood pellets used as fuel in solid fuel boilers - the comparison of limit values required for certification in accordance with German (DIN plus, DIN 51731) and Austrian standards (Ö NORM M 7135), and ENplus® quality certification scheme based on the ISO 17225-2 standard

Właściwości badane	jednostka	DIN plus	DIN 51731	Ö NORM M 7135	EN Plus A1	EN Plus A2	EN Plus B
Średnica	mm	4~10	4~10	4~10	~6 lub ~8		
Długość	/	<5×D	<50mm	<5×D	3,15 < L ≤ 40		
Gęstość	kg/dm ³	> 1,12	1,0 – 1,4	> 1,12	600 ≤ BD ≤ 750		
Wartość opałowa	MJ/kg	> 18	17,5-19,5	> 18	≥ 16,5 MJ/kg		
Wilgotność	%	10	12	10	≤ 10		
Abrazja	%	< 2,3	/	< 2,3	≥ 98,0	≥ 97,5	
Zawartość popiołu	%	< 0,5	< 1,5	< 0,5	≤ 0,7	≤ 1,2	≤ 2,0
Chlor	%	< 0,02	< 0,03	< 0,02	< 0,02		< 0,03
Siarka	%	< 0,04	< 0,08	< 0,04	≤ 0,04	≤ 0,05	
Azot	%	< 0,3	< 0,3	< 0,3	≤ 0,3	≤ 0,5	≤ 1,0
Metale ciężkie	%	Unormowane przez DIN CENTRO	Określone wg normy	Nienormowane	Określone wg normy ISO 16968	Określone wg normy ISO 16968	Określone wg normy ISO 16968

Pozycja węgla z ZG Janina z pokładu 118 według Międzynarodowej Klasyfikacji Węgla w Pokładzie, w której parametry petrograficzne bez substancji mineralnej w tym zawartość wityrynytu dla badanego węgla z pokładu 118 wynosi 58,5%, liptynytu 11,5%, inertynyty 30,0% przy średniej refleksyjności wityrynytu 0,421% oraz zawartości popiołu 12,6% w stanie suchym, pozwoliły określić typ węgla jako błyszczący twardy węgiel brunatny subbitumiczny w przedziale A. Według ww. klasyfikacji na podstawie zawartości popiołu w stanie suchym, węgiel ten należy zaliczyć do średniej klasy czystości.

Pozycja węgla z ZG Janina z pokładu 203 według Międzynarodowej Klasyfikacji Węgla w Pokładzie, w której parametry petrograficzne bez substancji mineralnej w tym zawartość wityrynytu dla badanego węgla z pokładu 203 wynosi 57,5%, liptynytu 14,8%, inertynyty 27,7% przy średniej refleksyjności wityrynytu 0,440% oraz zawartości popiołu 10,8% w stanie suchym, pozwoliły określić typ węgla jako błyszczący twardy węgiel brunatny subbitumiczny w przedziale A. Według ww. klasyfikacji na podstawie zawartości popiołu w stanie suchym, węgiel ten należy zaliczyć do średniej klasy czystości.

Pozycja węgla z ZG Janina z pokładu 207 według Międzynarodowej Klasyfikacji Węgla w Pokładzie, w której parametry petrograficzne bez substancji mineralnej w tym zawartość wityrynytu dla badanego węgla z pokładu 207 wynosi 60,8%, liptynytu 10,0%, inertynyty 29,2% przy średniej refleksyjności wityrynytu 0,436% oraz zawartości popiołu 12,2% w stanie suchym, pozwoliły określić typ węgla jako błyszczący twardy węgiel brunatny subbitumiczny w przedziale A. Według ww. klasyfikacji na podstawie zawartości popiołu w stanie suchym, węgiel ten należy zaliczyć do średniej klasy czystości.

Pozycja węgla z ZG Sobieski z pokładu 209 według Międzynarodowej Klasyfikacji Węgla w Pokładzie, w której parametry petrograficzne bez substancji mineralnej w tym zawartość wityrynytu dla badanego węgla z pokładu 209 wynosi 52,6%, liptynytu 11,5%, inertynyty 35,9% przy średniej refleksyjności wityrynytu 0,435% oraz zawartości popiołu 11,6% w stanie suchym, pozwoliły określić typ węgla jako błyszczący twardy węgiel brunatny subbitumiczny w przedziale A. Według ww. klasyfikacji na podstawie zawartości popiołu w stanie suchym, węgiel ten należy zaliczyć do średniej klasy czystości.

Pozycja węgla z ZG Brzeszcze z pokładu 364 według Międzynarodowej Klasyfikacji Węgla w Pokładzie, w której parametry petrograficzne bez substancji mineralnej w tym zawartość wityrynytu dla badanego węgla z pokładu 364 wynosi 56,6%, liptynytu 9,0%, inertynyty 34,4% przy średniej refleksyjności wityrynytu 0,796% oraz zawartości popiołu 7,1% w stanie suchym, pozwoliły określić typ węgla jako orto-bitumiczny węgiel kamienny w przedziale C. Według ww. klasyfikacji na podstawie zawartości popiołu w stanie suchym, węgiel ten należy zaliczyć do wysokiej klasy czystości.

Pozycja węgla z KWK Krupiński z pokładu 330 według Międzynarodowej Klasyfikacji Węgla w Pokładzie, w której parametry petrograficzne bez substancji mineralnej w tym zawartość wityrynytu dla badanego węgla z pokładu 330 wynosi 85,6%, liptynytu 5,2%, inertynyty 9,2% przy średniej refleksyjności wityrynytu 0,770% oraz zawartości popiołu 7,7% w stanie suchym, pozwoliły określić typ węgla jako orto-bitumiczny węgiel kamienny w przedziale C. Według ww. klasyfikacji na podstawie zawartości popiołu w stanie suchym, węgiel ten należy zaliczyć do wysokiej klasy czystości.

Pozycja węgla z ZG Brzeszcze z pokładu 405 według Międzynarodowej Klasyfikacji Węgla w Pokładzie, w której parametry petrograficzne bez substancji mineralnej w tym zawartość wityrynytu dla badanego węgla z pokładu 405 wynosi 65,5%, liptynytu 8,0%, inertynyty 26,5% przy średniej refleksyjności wityrynytu 0,772% oraz zawartości popiołu 4,5% w stanie suchym, pozwoliły określić typ węgla jako orto-bitumiczny węgiel kamienny w przedziale C. Według ww. klasyfikacji na podstawie zawartości popiołu w stanie suchym, węgiel ten należy zaliczyć do wysokiej klasy czystości.

Pozycja węgla z KWK Knurów z pokładu 405 według Międzynarodowej Klasyfikacji Węgla w Pokładzie, w której parametry petrograficzne bez substancji mineralnej w tym zawartość wityrynytu dla badanego węgla z pokładu 405 wynosi 39,1%, liptynytu 5,8%, inertynyty 55,1% przy średniej refleksyjności wityrynytu 0,991% oraz zawartości popiołu 6,5% w stanie suchym, pozwoliły określić typ węgla jako orto-bitumiczny węgiel kamienny w przedziale D. Według ww. klasyfikacji na podstawie zawartości popiołu w stanie suchym, węgiel ten należy zaliczyć do wysokiej klasy czystości.

Tab. 3. Wyniki analizy fizykochemicznej dla węgla
Tab. 3. Chemical and physical properties of the coals

Kopalnia/ nr pokładu	wilgoć W_t^r	popiół A^a	siarka S_t^a	części lotne V_{daf}	ciepło spalania Q_{daf}	wskaźnik wolnego wydymania SI	dylatacja b
	%	%	%	%	MJ/kg	-	%
ZG Janina / 118	17,7	12,6	1,9	40,2	18,9	-	-
ZG Janina / 203	17,0	10,8	1,7	38,2	20,1	-	-
ZG Janina / 207	9,8	12,2	1,6	38,3	22,0	-	-
ZG Sobieski / 209	14,1	11,6	1,9	36,7	23,9	-	-
ZG Brzeszcze / 364	3,4	7,1	0,8	35,7	29,1	1	-34
KWK Krupiński / 330	7,4	7,7	0,7	36,5	29,4	6	21
ZG Brzeszcze / 405	3,6	4,5	0,6	35,2	29,6	2	-32
KWK Knurów / 405	1,1	6,5	0,4	30,7	36,4	8	175
ZG Brzeszcze / 510	2,0	9,8	0,3	32,5	30,3	1	-35
KWK Jastrzębie/502	1,1	3,7	0,4	21,2	35,4	7,5	33

Pozycja węgla z ZG Brzeszcze z pokładu 510 według Międzynarodowej Klasyfikacji Węgla w Pokładzie, w której parametry petrograficzne bez substancji mineralnej w tym zawartość wityrynytu dla badanego węgla z pokładu 510 wynosi 50,2%, liptynytu 8,8%, inertynytu 41,0% przy średniej refleksyjności wityrynytu 0,823% oraz zawartości popiołu 9,8% w stanie suchym, pozwoliły określić typ węgla jako orto-bitumiczny węgiel kamienny w przedziale C. Według ww. klasyfikacji na podstawie zawartości popiołu w stanie suchym, węgiel ten należy zaliczyć do średniej klasy czystości.

Pozycja węgla z KWK Jastrzębie z pokładu 502 według Międzynarodowej Klasyfikacji Węgla w Pokładzie, w której parametry petrograficzne bez substancji mineralnej w tym zawartość wityrynytu dla badanego węgla z pokładu 502 wynosi 47,4%, liptynytu 14,7%, inertynytu 37,9% przy średniej refleksyjności wityrynytu 1,169% oraz zawartości popiołu 3,7% w stanie suchym, pozwoliły określić typ węgla jako meta-bitumicznego węgla kamiennego w przedziale B. Według ww. klasyfikacji na podstawie zawartości popiołu w stanie suchym, węgiel ten należy zaliczyć do wysokiej klasy czystości.

Parametry analityczne pelletu drzewnego

Parametry jakościowe dla poszczególnych klas jakości pelletów drzewnych zestawiono w tabeli 2.

Klasę właściwości A1 uzyskała próbka pelletu drzewnego

nr 1 – to najwyższej jakości pellet do stosowania w kotłach i piecach ogrzewających gospodarstwa domowe. Spalanie pelletu w tej klasie charakteryzuje się niską ilością powstającego popiołu oraz azotu oraz wysokimi parametrami spalania (efektywność).

Klasa właściwości A2 uzyskała próbka pelletu drzewnego nr 2 – obejmuje pellet do zastosowań w „mniej wrażliwych” instalacjach, m.in. ze względu na większą ilość powstającego popiołu i azotu.

Pozostałe próbki pelletu drzewnego prawdopodobnie zostały wytwarzane z nieprzetworzonego chemicznie drewna użytkowego i uzyskały Klasę właściwości B – pellet tej klasy może być dopuszczony do sprzedaży jeżeli stwierdzono na podstawie badań chemicznych w nim metali ciężkich i związków chlorowcoorganicznych w ilości większej niż wartości w typowym oryginalnym materiale lub większej niż wartości typowe dla kraju pochodzenia. Niemniej jednak dalsze analizy chemiczne autorzy niniejszego artykułu planują wykonać w kolejnym etapie badań w celu potwierdzenia jaki materiał wyjściowy został wykorzystany do produkcji pelletu drzewnego, a który sklasyfikowano w niniejszym artykule do Klasy B.

Wszystkie końcówki badanych pelletów mają złamane końce. Zawartości wilgoci w stanie roboczym nie przekracza 15%. Wyprodukowane zostały poprzez mechaniczne sprasowanie drobnych cząstek biomasy pochodzenia roślinnego,

Tab. 4. Zawartość poszczególnych grup macerałów i materii mineralnej oraz refleksyjność wityrynytu w próbkach węgla
Tab. 4. Maceral group and mineral content and vitrinite reflectance in analyzed samples of coals

Kopalnia/nr pokładu	Refleksyjność wityrynytu R_o	Wityrynit	Liptynit	Inertynit	Materia mineralna
	%	%	%	%	%
ZG Janina / 118	0,421	56,4	11,0	28,8	3,8
ZG Janina / 203	0,440	55,1	14,2	26,6	4,1
ZG Janina / 207	0,436	53,8	8,8	25,8	11,6
ZG Sobieski / 209	0,435	49,5	10,8	33,7	6,0
ZG Brzeszcze / 364	0,796	54,8	8,7	33,3	3,2
KWK Krupiński / 330	0,770	84,9	5,2	9,1	0,8
ZG Brzeszcze / 405	0,772	62,5	7,6	25,3	4,6
KWK Knurów / 405	0,991	36,9	5,5	52,1	5,5
ZG Brzeszcze / 510	0,823	48,4	8,5	39,4	3,7
KWK Jastrzębie / 502	1,169	43,5	13,5	34,8	8,2

Tab. 5. Właściwości pelletu drzewnego
Tab. 5. Specification of properties for wood pellets

Dopuszczalne wartości graniczne	Wilgotność W_f^r	Średnica	Zawartość popiołu A^d	Wartość opalowa Q_{daf}
	%	mm	%	MJ/kg
Wartości graniczne według PN-EN ISO 17225-1	≤ 12 %	~6 lub ~8 mm	< 0,5 %	≥ 17 MJ/kg
Próbka nr 1 posiada atest EN Plus A1	6,9	8	0,3	17,5
Próbka nr 2 bez atestu	3,3	6	0,2	18,8
Próbka nr 3 bez atestu	8,5	6	0,6	17,7
Próbka nr 4 bez atestu	8,7	6	0,5	16,5
Próbka nr 5 bez atestu (pellet przemysłowy)	5,8	6	0,8	17,9

ulegających biodegradacji, i pochodzących z produktów, odpadów oraz pozostałości z produkcji rolnej, leśnej a także z przemysłu przetwarzającego tego typu produkty. W oparciu o polską normę wykonano analizę techniczną, której wyniki przedstawiono w tabeli 5.

Podsumowanie i dyskusja wyników

Według polskiej klasyfikacji węgla kamiennego (PN-82/G-97002) branych pod uwagę jest pięć wskaźników, do których należą: części lotne (V_{daf}), zdolność spiekania (RI), dylatacja (b), wskaźnik wolnego wydymania (SI), ciepło spalania Q_s^{daf} oraz dla węgla typ 35.2A i 35.2B uzupełniająco wchodzi parametr jak zawartość inertynitu, która w węglu typ 35.2A nie powinna przekroczyć 30%. Na ich podstawie badane węgle z pokładu 364, 405, 502 i 510 zostały zaklasyfikowane do węgla kamiennych w podziale na poszczególne typy. Węgiel z pokładu 364 i 405 (ZG Brzeszcze) oraz 330 (KWK Krupiński) to węgiel płomienny typ 31.1. Węgiel pokładu 405 (KWK Knurów) to węgiel ortokoksowy typ 35.1. Węgiel z pokładu 510 (ZG Brzeszcze) to węgiel gazowy typ 33. Węgiel z pokładu 502 (KWK Jastrzębie) to węgiel semikoksowy typ 37.1.

Przedstawiane w niniejszym artykule wyniki badań węgla wyrażone przez współczesną klasyfikację, w tym międzynarodową Europejskiej Komisji Gospodarczej NZ (ECE, 1995) i przemysłową kodyfikację tej Komisji, opierają się na parametrach petrograficznych, gdzie typ jest reprezentowany przez grupy macerałów, bądź zawartość inertynitu, a głównym parametrem uwęglenia (rank) jest zdolność odbicia światła witrynytu (R_p) (tab. 4). Na jej podstawie węgiel z pokładu 118, 203 i 207 (ZG Janina) oraz z pokładu 209 (ZG Sobieski) należy zaliczyć do błyszczących twardych węgla brunatnych subbitumicznych w przedziale A. Pozostały węgiel z pokładu 364, 405 i 510 (ZG Brzeszcze) oraz węgiel z pokładu 330 (KWK Krupiński) to orto-bitumiczny węgiel kamienny w przedziale C. Węgiel z pokładu 405 (KWK Knurów) to orto-bitumiczny węgiel kamienny w przedziale D. Natomiast węgiel z pokładu 502 (KWK Jastrzębie) należy do meta-bitumicznego węgla kamiennego w przedziale B.

Zawartość wilgoci w badanych próbkach węgla wynosi od 17,7% dla węgla z pokładu 118 z ZG Janina do 1,1% dla węgla z pokładu 405 z KWK Knurów oraz pokładu 502 z KWK Jastrzębie. Z punktu widzenia spalania i wymiany ciepła, korzystna jest taka ilość wody zawartej w paliwie, która nie obniża jakości spalania. Praktyka wykazuje, iż optimum zawiera się

między 10% a 12%, tzn. do momentu, gdy nadmiar wody zaczyna opóźniać zapłon węgla lecz tylko jedna z badanych próbek węgla z pokładu 207 z ZG Janina, której zawartość wilgoci wynosi 9,8% zmieściła się w tym przedziale. Zbyt mała zawartość wody powoduje osłabienie płomienia, natomiast zbyt duża zawartość, powoduje obniżenie temperatury w dużej części komory paleniskowej, poniżej temperatury zapłonu węglowodorów (szczególnie tych ciężkich). Zawartość wody na poziomie >15% prowadzi do kłopotów z transportem węgla (lepienie się), co wpływa na osiągi kotła (wydajność i sprawność). W związku z powyższym węgiel z pokładu 364, 330, 405 (ZG Brzeszcze, KWK Knurów), 510 i 502 nie jest optymalnym lecz nie najgorszym paliwem dla energetyki ale z powodzeniem może być przeznaczony do procesu koksowania w którym zawartość wilgoci nie powinna przekroczyć około 12%.

Badany pellet drzewny to energetyczne biopaliwo stałe najczęściej w kształcie walca, o wymiarach nie mniejszych niż: długość 3,15 mm i średnicy nie przekraczającej 25 mm. W wszystkich badanych próbkach pelletów drzewnych zawartość wilgoci nie przekroczyła wartości granicznej 12% określonej w obowiązującej normie ISO oraz pozostałych prezentowanych normach jakości.

Na podstawie analizy technicznej próbek pelletów drzewnych oprócz próbki nr 1, która posiada atest EN Plus A1 jeszcze tylko próbka nr 2 spełnia rygorystyczne parametry jakości. Pozostałe próbki dyskwalifikuje niższa wartość opałowa (próbka nr 4) oraz podwyższona zawartość popiołu (próbka nr 3 i 5) dlatego najprawdopodobniej nie uzyskały atestu jakości.

Stopień uwęglenia i zawartość popiołu decydują o wartości opałowej węgla, która średnio wynosi od 20,3 MJ/kg do 32,2 MJ/kg [6]. Ciepło spalania dla węgla kamiennego wynosi 30-36 MJ/kg [3]. Badane węgle, które zostały według klasyfikacji ECE zaklasyfikowane do orto- i meta-bitumicznych węgla kamiennych mieszczą się w tym zakresie od 30 do 36 MJ/kg (tab. 3). Spalanie węgla gorszej jakości oraz pelletów drzewnych (<21MJ/kg) wywiera negatywny wpływ na: osiągi, sprawność, stan techniczny kotła, awaryjność, dyspozycyjność i koszty remontów. Spalanie węgla o wysokiej wartości opałowej (>25MJ/kg) w kotle powoduje wzrost temperatury jądra płomienia, a co za tym idzie wzrost emisji tlenków azotu. Może też doprowadzić do powstania uszkodzeń w wyniku nadmiernej lokalnych temperatur [9]. Przebadane pellety drzewne nie osiągnęły wartości opałowej powyżej 20% (tab. 5), co wskazuje że jest to paliwo o niskiej emisji tlenków azotu.

Literatura

- [1] International Classification of Seam Coals, Final Version. Economic Commission For Europe, Committee On Energy, Working Party On Coal, Fifth session, 1995
- [2] International Codification System For Medium and High Rank Coals. Economic Commission For Europe, Committee On Energy, 1998, 2001
- [3] Gabzdyl W., 1987 – *Petrografia węgla*. Skrypty uczelniane Politechniki Śląskiej nr 1337, Gliwice
- [4] Kruszewska K., Dybova-Jachowicz S., 1997 – *Zarys petrologii węgla*. Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego, Katowice. ISSN 0239-6432
- [5] Hamala K., Róg L., 2004 – *Wpływ składu chemicznego i właściwości fizykochemicznych węgla oraz ich popiołów na wskaźniki zużycia i zanieczyszczenia powierzchni grzewczych kotłów energetycznych*. Prace Naukowe GIG: Górnictwo i Środowisko, nr 3, s. 81-109, Katowice

- [6] Ney R., 1996 – *Surowce mineralne Polski – surowce energetyczne*. Wydawnictwo Centrum PPGSMiE PAN, s. 387, Kraków
- [7] Stach E., Mackowsky M.Th., Teichmüller M., Taylor G.H., Chandra D., Teichmüller R., 1982 – *Stach's Textbook of Coal Petrology*. Gebrüder Borntraeger, Berlin. ISBN 978-3-443-01018-8
- [8] Gabzdyl W., 1978 – *Wybrane zagadnienia z petrografii węgla*. Skrypty Politechniki Śląskiej nr 803, s. 146, Gliwice
- [9] Szkarowski A., Janta-Lipińska S., Gawin R., 2016 – *Obniżenie emisji tlenków azotu z kotłów DKVR*. Annual Set The Environment Protection, Vol. 18, s. 565-578

Cytowane normy:

- [10] ENplus® Quality Certification Scheme For Wood Pellets (2005), Part 3: Pellet Quality Requirements, European Pellet Council (EPC), s. 7-10
- [11] PN – 04513:1981. *Paliwa stałe - Oznaczanie ciepła spalania i obliczanie wartości opałowej*. s. 11 *Górnictwo Odkrywkowe* 2018 nr Konferencja Spała czerwiec 2018
- [12] PN – G – 04501: 1998. *Węgiel kamienny i antracyt – Pobieranie próbek pokładowych bruzdowych*. s. 3
- [13] PN – 90/G – 04502: 2014-11. *Węgiel kamienny i brunatny -- Pobieranie i przygotowanie próbek do badań laboratoryjnych – Metody podstawowe*. s. 22
- [14] PN – ISO 501:2007. *Węgiel kamienny - Oznaczanie wskaźnika wolnego wydymania*. s. 9
- [15] PN – ISO 7404-2: 2005. *Metody analizy petrograficznej węgla kamiennego (bitumicznego) i antracytu – Część 2: Metoda przygotowania próbek węgla*. s.14
- [16] PN – ISO 7404-5:2002. *Metody analizy petrograficznej węgla kamiennego (bitumicznego) i antracytu – Część 5: Metoda mikroskopowa oznaczania refleksyjności wityrynytu*. s.19
- [17] PN – EN ISO 17225-1:2014-07. *Biopaliwa stałe - Specyfikacje paliw i klasy – Część 1: Wymagania ogólne* s. 70
- [18] PN – EN ISO 17225-2:2014-07. *Biopaliwa stałe - Specyfikacje paliw i klasy – Część 2: Klasy peletów drzewnych* s. 16
- [19] PN – EN ISO 17225-3:2014-07. *Biopaliwa stałe - Specyfikacje paliw i klasy – Część 3: Klasy brykietów drzewnych* s. 14
- [20] PN – EN 15234-1:2011. *Biopaliwa stałe - Zapewnienie jakości paliwa – Część 1: Wymagania ogólne*. s.22
- [21] PN – EN 15234-2:2012. *Biopaliwa stałe - Zapewnienie jakości paliwa – Część 2: Pelety drzewne do użytku nieprzemysłowego* s. 16
- [22] PN – EN ISO 16559:2014-09. *Biopaliwa stałe – Terminologia, definicje i określenia*. s. 46

Źródła internetowe:

- [23] AEBIOM Statistical Report 2016: <http://www.aebiom.org/statistical-report-2016/> [dostęp online z dnia: 19.04.2018]
- [24] DIN plus: http://www.dincertco.de/de/dincertco/produkte_leistungen/zertifizierung_produkte/brennstoffe/holzpellets_heizkessel/holzpellets_heizkessel.html [dostęp online z dnia 19.04.2018]



Kopalnia Biała Góra

z arch. Kopalni