

WYKORZYSTANIE KARBONIZATU Z DREWNA IGLASTEGO JAKO PALIWA ZASTĘPCZEGO W PROCESIE SPIEKANIA RUD ŻELAZA

USE OF CONIFEROUS WOOD BIOCHAR AS A SUBSTITUTE FUEL IN AN IRON ORE SINTERING PROCESS

W artykule przedstawiono wyniki badań wykonanych w Łukasiewicz – IMŻ, przy współpracy Instytutu Chemicznej Przetwórci Węgla, nad wykorzystaniem karbonizatu z drewna iglastego jako paliwa zastępczego w procesie spiekania rud żelaza. Stwierdzono, że biorąc pod uwagę wydajność produkcyjną, zużycie paliwa oraz właściwości powstałego spieku udział badanego karbonizatu nie powinien przekraczać 10% mas. w sumie paliwa. Przy stosowaniu badanego karbonizatu obniżała się zawartość FeO w spieku. Spiek posiadał lepszą wytrzymałość ISO T niż przy stosowaniu samego koksiku. Równocześnie ścieralność spieku ISO A zmniejszała się ze wzrostem udziału karbonizatu w sumie paliwa. Stosowanie badanego karbonizatu może bardzo pozytywnie wpływać zarówno na wytrzymałość spieku, jak i jego właściwości redukcyjne.

Słowa kluczowe: karbonizat, biomasa, koksik, spiekanie rud żelaza

1. WSTĘP

Dotychczas w procesie spiekania rud żelaza jako paliwo zastępcze wykorzystywano antracyt. Jego stosowanie w tym procesie jest podyktowane głównie ceną, a udział tego paliwa w łącznym koszcie zwykle nie przekracza 30% udziału paliwa stałego [1]. Obecnie na rynku pojawiło się szereg nowych materiałów węglonośnych. Wśród nich wyróżnić należy karbonizaty z biomasy, które powstają w wyniku termicznego przekształcania (pirolizy) wybranych rodzajów biomasy lub odpadów biodegradowalnych.

Piroliza to proces termiczny, w którym następuje termochemiczna przemiana substancji organicznych w gazowe, ciekłe i stałe produkty. W zależności od jakości tych produktów może pojawić się możliwość ich dalszego, racjonalnego wykorzystania. W przypadku przetwarzania odpadów następuje zatem ich przekształcenie w materiał użyteczny (produkt), a fakt ten stoi w pełnej zgodności z ideą gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ). Zastąpienie w procesie spiekania rud żelaza koksiku karbonizatem z biomasy (lub odpadów biodegradowalnych) może być ko-

The article presents the results of tests carried out at Łukasiewicz – IMŻ, in cooperation with the Institute for Chemical Processing of Coal, on the use of biochar from coniferous wood as a substitute fuel in the iron ore sintering process. It was found that, considering productivity, fuel consumption and properties of the obtained sinter, the content of the tested biochar should not exceed 10 wt% in total fuel. When using the tested biochar, the content of FeO in the sinter decreased. The sinter was characterised by better ISO T strength than when using only coke breeze. At the same time, the grindability of the ISO A sinter decreased with the increase in the content of the biochar in the total fuel. The use of the tested biochar can have a very positive effect on both the sinter strength and its reducing properties.

Keywords: biochar, biomass, coke breeze, iron ore sintering

1. INTRODUCTION

Until now, anthracite has been used as a substitute fuel in the iron ore sintering process. Its use in this process is mainly dictated by the price, and the share of this fuel in the total cost usually does not exceed 30% of the share of solid fuel [1]. Currently, a number of new carbon-bearing materials have appeared on the market. Among them, biomass chars which are produced as a result of thermal transformation (pyrolysis) of selected types of biomass or biodegradable waste can be identified.

Pyrolysis is a thermal process in which organic substances are transformed thermochemically into gaseous, liquid and solid products. Depending on the quality of these products, there may be a possibility of their further, rational use. Therefore, in the case of waste processing, they are transformed into a useful material (product), and this fact is in full compliance with the idea of circular economy. Replacing coke breeze in the iron ore sintering process with biomass char (or biodegradable waste) may be another way of implementing this idea [2]. The biochar produced

lejnym kierunkiem wdrażania tej idei życie [2]. Powstający w wyniku pirolizy karbonizat charakteryzuje się wysoką zawartością pozostałości węglowej (zawartość węgla nawet ok. 80% mas.). Ta cecha karbonizatu może być wykorzystana dla zamiany części koksiku (zawartość węgla powyżej 80% mas.) w procesie spiekania rud żelaza.

Badania nad zastąpieniem koksiku w spiekaniu rud żelaza prowadzone były przez Indian Institute of Technology oraz National Metallurgy Laboratory w Indiach. Proces spiekania z użyciem biomasy prowadzony był ze zmiennym udziałem biomasy w mieszance paliwa. Zgodnie z przeprowadzonymi badaniami możliwe było zastąpienie koksiku przez 10% mas. trocin, 30% mas. węgla drzewnego oraz 30% mas. mieszanki trocin z węglem drzewnym. Nie było możliwości całkowitego zastąpienia koksiku i prowadzenia procesu spiekania przy 100% mas. udziale biomasy. Właściwości otrzymanego spieku były zgodne z parametrami jakościowymi wymaganymi dla spieków [3].

W Nippon Steel Corporation jako materiał do badań wykorzystana została surowa biomasa oraz karbonizat po pirolizie biomasy. Zgodnie z wynikami badań uzyskany spiek był odpowiedniej jakości, zbliżonej do spieku wytworzonego podczas spiekania z wykorzystaniem koksiku. Stwierdzono, że ze względu na emisje do środowiska, surowa biomasa nie może być używana bezpośrednio jako paliwo w procesie spiekania. Jej wykorzystanie wiąże się z koniecznością budowy dodatkowych instalacji oczyszczania spalin. Korzystniejsza sytuacja występuje natomiast przy wykorzystaniu karbonizatu z biomasy, która zwiększa wydajność procesu przy jednoczesnym ograniczeniu emisji NO_x , SO_x oraz pyłów. W przypadku karbonizatu z biomasy celowa jest kontrola składu granulometrycznego oraz wilgotności, ponieważ szybkość jego spalania może być zbyt duża [4].

Możliwości zastosowania biomasy w procesach hutniczych analizowane były przez Łukasiewicz – Instytut Metallurgii Żelaza w Gliwicach. Badano czy istnieje uzasadnienie technologiczne, ekonomiczne i ekologiczne zastąpienia w procesie spiekania rud żelaza części koksiku przez surową biomasę. Analizowano jaki udział biomasy w mieszance spiekalniczej nie powoduje pogorszenia parametrów procesu spiekania oraz właściwości spieku. Stwierdzono, że zastosowanie biomasy na poziomie do 10% mas. jako zamiennika części koksiku w procesie spiekania, powoduje przede wszystkim spadek przewodności mieszanki, a co za tym idzie spadek wydajności procesu. Ponadto stwierdzono zwiększone zużycie sumarycznej ilości paliwa (koksik + biomasa), co wpływa niekorzystnie na ekonomikę procesu spiekania. Stwierdzono również zwiększoną emisję CO_2 , CO , NO_x w gazach odlotowych. Wydaje się więc, że stosowanie tak przygotowanej biomasy (nieprzetworzonej termicznie) w tym procesie jest nieefektywne [5–7].

Ponieważ surowa biomasa nie sprawdziła się jako paliwo zastępcze w procesie spiekania rud żelaza, postanowiono wykorzystać biomasę poddaną pirolizie. Do badań wytypowano karbonizat z drewna iglastego, który już funkcjonuje na rynku krajowym i możliwe jest jego pozyskanie.

2. WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOCHEMICZNE KARBONIZATU Z DREWNA IGLASTEGO

Karbonizat z drewna iglastego został wytworzony w Instytucie Chemicznej Przeróbki Węgla z wykorzystaniem pilotowej instalacji konwersji paliw stałych w cyrkulującym

as a result of pyrolysis is characterised by a high content of carbon residue (carbon content of up to about 80 wt%). This feature of the biochar can be used to replace part of the coke breeze (carbon content over 80 wt%) in the iron ore sintering process.

The research on replacing coke breeze in the iron ore sintering was conducted by the Indian Institute of Technology and the National Metallurgy Laboratory in India. The sintering process with the use of biomass was carried out with a variable content of biomass in the fuel mixture. According to the research, it was possible to replace coke breeze with 10 wt% of sawdust, 30 wt% of charcoal and 30 wt% of sawdust mixture with charcoal. It was not possible to completely replace the coke breeze and to carry out the sintering process at 100 wt% of biomass. The properties of the obtained sinter were consistent with the quality parameters required for sinters [3].

Nippon Steel Corporation used raw biomass and biochar after biomass pyrolysis as research material. According to the test results, the obtained sinter was of appropriate quality, similar to the sinter produced during sintering with the use of coke breeze. It was found that due to environmental emissions, raw biomass cannot be used directly as a fuel in the sintering process. Its use requires the construction of additional exhaust gas treatment installations. A more favourable situation occurs when using biomass char, which increases the efficiency of the process while reducing NO_x , SO_x and dust emissions. In the case of biomass char, it is advisable to control the grain size and moisture content, because the rate of its combustion may be too high [4].

The possibilities of using biomass in metallurgical processes were analysed by Łukasiewicz – Institute for Ferrous Metallurgy in Gliwice. It was investigated whether there was a technological, economic and ecological justification for replacing part of the coke breeze with raw biomass in the iron ore sintering process. It included an analysis of biomass content in the sintering mixture that did not deteriorate the parameters of the sintering process and the properties of the sinter. It was found that the use of biomass at the level of up to 10 wt% as a substitute for part of the coke breeze in the sintering process primarily causes a decrease in the airiness of the mixture, and thus a decrease in the efficiency of the process. Moreover, increased consumption of the total amount of fuel (coke breeze + biomass) was found, which adversely affects the economics of the sintering process. Increased emissions of CO_2 , CO , NO_x were also found in waste gases. Therefore, it seems that the use of biomass prepared in this way (thermally unprocessed) in this process is ineffective [5–7].

As raw biomass did not prove to be a substitute fuel in the iron ore sintering process, it was decided to use pyrolysed biomass. Coniferous wood biochar which is already used and available on the domestic market was selected for the research.

2. PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF CONIFEROUS WOOD BIOCHAR

The coniferous wood biochar was produced at the Institute for Chemical Processing of Coal using a pilot installation for converting solid fuels in a circulating fluidised bed.



Rys. 1. Widok fragmentów pilotowej instalacji pirolizy paliw stałych zlokalizowanej w IChPW

Fig. 1. Fragments of the pilot installation for pyrolysis of solid fuels located at IChPW

złożu fluidalnym. Widok części tej instalacji prezentuje rys. 1. Piroliza biomasy iglastej o uziarnieniu <10 mm prowadzona była w temperaturze ~800°C. Reżim procesu nie obejmował kwestii wytworzonego karbonizatu, stąd też uzyskany produkt charakteryzował się stosunkowo wysoką zawartością części lotnych.

Badania właściwości fizykochemicznych uzyskanego karbonizatu z drewna iglastego obejmowały:

- skład ziarnowy
- gęstość nasypową w stanie suchym
- analizę chemiczną.

W tabeli 1 przedstawiono analizę ziarnową karbonizatu z drewna iglastego w porównaniu do koksiku, standardowo stosowanego w spiekalniach rud.

Na rys. 2 i 3 przedstawiono postać karbonizatu z drewna iglastego w porównaniu do koksiku.

Karbonizat z drewna iglastego charakteryzuje się bardzo drobnym ziarnem, co w dużej mierze wynika z charakteru procesu w którym był wytworzony. Średnia wielkość ziarna wynosi tylko 0,50 mm, a ilość frakcji poniżej 1 mm stanowiła ponad 84% mas. Średnia wielkość ziarna dla koksiku wynosiła 1,45 mm, przy prawie 60% mas. frakcji poniżej 1 mm. Dotychczasowe krajowe doświadczenia przemysłowe

A part of this installation is showed in Fig. 1. The pyrolysis of coniferous biomass with grain size <10 mm was carried out at the temperature of ~ 800°C. The process regime did not include the issue of the produced biochar, hence the obtained product was characterised by a relatively high content of volatile matter.

The investigation of physicochemical properties of the obtained coniferous wood biochar included:

- grain composition
- bulk density in the dry state
- chemical analysis.

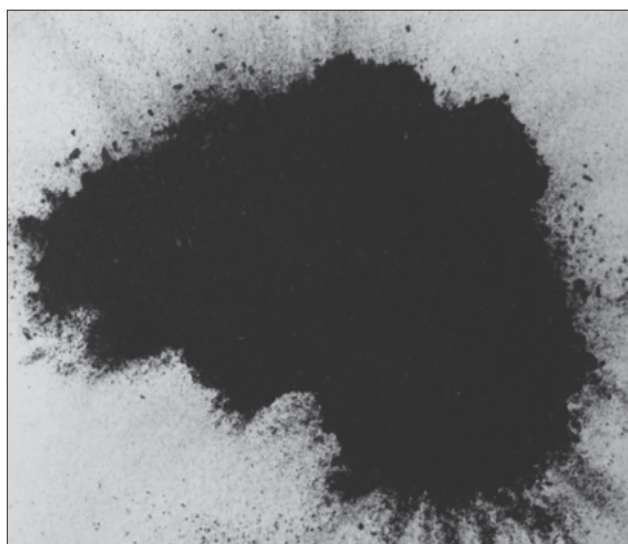
Table 1 shows the grain analysis of the coniferous wood biochar in comparison to coke breeze, commonly used in ore sintering plants.

Figures 2 and 3 show the form of coniferous wood biochar in comparison to coke breeze.

Coniferous wood biochar is characterised by a very fine grain, which is largely due to the nature of the process in which it is produced. The average grain size is only 0.50 mm, and the number of fractions below 1 mm accounted for over 84 wt%. The average grain size for coke breeze was 1.45 mm, with almost 60 wt% of fractions below 1 mm. The existing national industrial experience shows

Tabela 1. Analiza ziarnowa karbonizatu i koksiku
Table 1. Grain analysis of biochar and coke breeze

| Klasa ziarnowa ■ Grain class [mm] | Analiza ziarnowa, [% mas.] ■ Grain analysis, [wt%] | |
|--|--|-------------------------|
| | Karbonizat z drewna iglastego ■ Coniferous wood biochar | Koksik ■ Coke breeze |
| poniżej ■ below 0,10 | 14,32 | 9,18 |
| 0,10 ÷ 0,16 | 17,73 | 7,30 |
| 0,16 ÷ 0,20 | 8,71 | 6,08 |
| 0,20 ÷ 0,315 | 17,17 | 10,92 |
| 0,315 ÷ 0,40 | 8,08 | 8,53 |
| 0,40 ÷ 0,50 | 4,76 | 4,73 |
| 0,50 ÷ 0,63 | 4,32 | 4,22 |
| 0,63 ÷ 0,80 | 6,95 | 5,12 |
| 0,80 ÷ 1,00 | 1,97 | 3,12 |
| 1,00 ÷ 2,00 | 14,06 | 14,57 |
| 2,00 ÷ 3,15 | 1,39 | 11,28 |
| 3,15 ÷ 4,00 | 0,33 | 5,20 |
| 4,00 ÷ 5,00 | 0,16 | 5,02 |
| 5,00 ÷ 6,30 | 0,05 | 3,39 |
| powyżej ■ over 6,30 | 0,00 | 1,30 |
| Średnia wielkość ziarna ■ Average grain size, [mm] | 0,50 | 1,45 |
| Ciężar nasypowy ■ Bulk weight, [kg/m ³] | 316,8 | 759,9 |



Rys. 2. Karbonizat z drewna iglastego
Fig. 2. Coniferous wood biochar

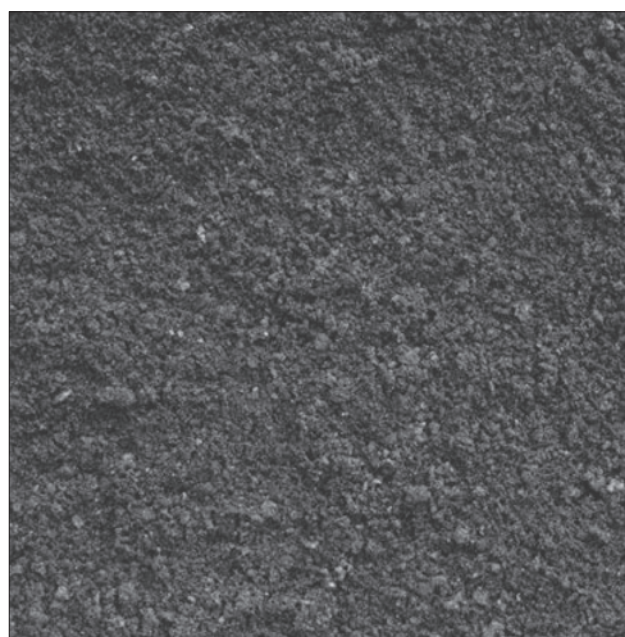
we wskazują, że w procesie spiekania, korzystnym jest stosowanie paliwa o zakresie uziarnienia od 1÷3 mm [1].

W tabeli 2 przedstawiono skład chemiczny badanego karbonizatu w porównaniu do koksiku.

W karbonizacie z drewna iglastego zawartość węgla pierwiastkowego była niższa niż w koksiku i wynosiła 75% mas. Karbonizat nie zawierał niepożądanych substancji olejowych, ale należy zwrócić uwagę na bardzo wysoką

Tabela 2. Skład chemiczny karbonizatu oraz koksiku
Table 2. Chemical composition of the biochar and coke breeze

| Oznaczenie [% mas.] ■ Identification, [wt%] | Karbonizat z drewna iglastego ■ Coniferous wood biochar | Koksik ■ Coke breeze |
|--|---|-------------------------|
| C | 75,0 | 81,0 |
| Części lotne ■ Volatile materials | 25,0 | 5,02 |
| SiO ₂ | 0,64 | 6,24 |
| CaO | 0,90 | 1,55 |
| K | 0,16 | 0,04 |
| Na | 0,02 | 0,12 |
| Cl | 0,04 | 0,08 |
| Cu | < 0,01 | 0,01 |
| Fe | 0,17 | 1,73 |
| Zn | 0,01 | 0,01 |
| S | 0,33 | 0,90 |
| Al ₂ O ₃ | 0,068 | 3,36 |
| MgO | 0,23 | 0,48 |
| Olej ■ Oil | 0,04 | 0,01 |



Rys. 3. Koksik
Fig. 3. Coke breeze

that in the sintering process, it is advantageous to use fuel with a grain size range of 1–3 mm [1].

Table 2 shows the chemical composition of the tested biochar in comparison to the coke breeze.

The content of elemental carbon in the coniferous wood biochar was lower than in coke breeze and amounted to 75 wt%. The biochar did not contain any undesirable oily substances, but it should be noted that it contained

zawartość w nim części lotnych, wynoszącą 25,0% mas. w stosunku do 5,02% mas. w koksiku. Może to powodować podczas spiekania rud wzmożone emisje węglodorów do środowiska.

Pozytywną właściwością karbonizatu była natomiast niska zawartość balastu, jakim jest SiO_2 (0,64% mas.). Koksik zawierał 6,24% mas. SiO_2 . Ponadto CaO zawarty w tym materiale powoduje, że nie trzeba dodawać do mieszanki zbyt dużo topnika wapiennego, aby ożuzłować krzemionkę. Karbonizat praktycznie nie zawierał szkodliwego sodu, chloru, cynku i miedzi. Należy zwrócić uwagę na potas, którego udział w karbonizacie wynosił 0,16% mas., przy 0,04% mas w koksiku. Kolejną cenną właściwością tego karbonizatu była niska zawartość siarki wynosząca 0,33% mas., w porównaniu do 0,9% mas. w koksiku. Interesujące właściwości karbonizatu z drewna iglastego w aspekcie wykorzystania go w charakterze zamiennika części koksiku w procesie spiekania rud żelaza uwiarygodniły potrzebę przeprowadzenia laboratoryjnych testów opisanych w kolejnym rozdziale.

3. LABORATORYJNE PRÓBY SPIEKANIA MIESZANKI Z UDZIAŁEM KARBONIZATU Z DREWNA IGLASTEGO JAKO PALIWA ZASTĘPCZEGO W PROCESIE SPIEKANIA

Laboratoryjne próby spiekania z udziałem karbonizatu z drewna iglastego jako paliwa zastępczego prowadzono z mieszanką o składzie: agloruda Krivbas w ilości 45% mas. i koncentrat magnetytowy Krzywy Róg w ilości 55% mas. W mieszance jako topnik stosowano kamień wapienny i dolomit, w ilości zapewniającej uzyskanie spieku o założonej zasadowości. Wszystkie próby spiekania prowadzono do uzyskania wskaźnika równowagi spieku zwrotnego, mieszczącego się w zakresie 95÷105% [8]. Do mieszanki dodawano 45% mas. spieku zwrotnego o uziarnieniu poniżej 5 mm. Spiek wytworzony bez udziału karbonizatu z drewna iglastego był spiekami porównawczym. Następnie, próby spiekania prowadzono w ten sposób, że stopniowo zwiększano procentowy udział tego paliwa zastępczego w mieszance, obniżając procentowy udział koksiku.

Próby spiekania prowadzone były w linii do półprzemysłowej symulacji procesu spiekania będącej na wyposażeniu Łukasiewicz – Instytutu Metalurgii Żelaza w Zakładzie Badań Procesów Surowcowych [9].

Założone parametry spieku.

- zawartość Fe – 55%
- zasadowość – 1,10
- zawartość MgO – 1,3%.

Próby spiekania prowadzono pod kątem określenia wpływu stosowania badanego karbonizatu na:

- parametry procesu spiekania
- skład emitowanych spalin z procesu
- fizykochemiczne właściwości spieku.

Próby spiekania prowadzono w konwencjonalnej misie spiekalniczej o średnicy 490 mm, przy stałej wysokości warstwy 550 mm, zgodnie ze schematem technologicznym zamieszczonym na rys. 4 [8].

Podczas prób spiekania prowadzono ciągły pomiar składu spalin, oznaczając zawartość O_2 , CO , CO_2 , NO_x , CH_4 , SO_2 i pyłu.

numerous volatile matter, amounting to 25.0 wt% in relation to 5.02 wt% in coke breeze. This may result in increased emissions of hydrocarbons to the environment during ore sintering.

On the other hand, the low content of ballast, which is SiO_2 (0.64 wt%), was a positive property of the biochar. The coke breeze contains 6.24 wt% of SiO_2 . Furthermore, the CaO contained in this material means that it is not necessary to add too much limestone flux to the mixture to slag the silica. The biochar was practically free of harmful sodium, chlorine, zinc and copper. Attention should be paid to potassium, the share of which in the biochar was 0.16 wt%, with 0.04 wt% in the coke breeze. Another valuable property of this biochar was the low sulphur content of 0.33 wt%, compared to 0.9 wt% in coke breeze. The interesting properties of coniferous wood biochar in the aspect of using it as a substitute for part of coke breeze in the iron ore sintering process substantiated the performance of the laboratory tests described in the next chapter.

3. LABORATORY SINTERING TESTS OF THE MIXTURE WITH CONIFEROUS WOOD BIOCHAR AS A REPLACEMENT FUEL IN THE SINTERING PROCESS

The laboratory sintering tests with the use of coniferous wood biochar as a substitute fuel were carried out with a mixture of: Krivbas agloore in the amount of 45 wt% and Kryvyi Rih magnetic concentrate in the amount of 55 wt%. Limestone and dolomite were used as a flux in the mixture, in an amount sufficient to obtain a sinter of the assumed alkalinity. All sintering tests were carried out to obtain the return sinter equilibrium index ranging from 95 through 105% [8]. 45 wt% of return sinter with particle size below 5 mm was added to the mixture. The sinter produced without the coniferous wood biochar was the comparative sinter. Subsequently, the sintering tests were carried out in such a way that the percentage of this substitute fuel in the mixture was gradually increased, reducing the percentage of coke breeze.

The sintering tests were carried out in a line for semi-industrial simulation of the sintering process located at Łukasiewicz – Institute for Ferrous Metallurgy at the Department of Primary Processes [9].

Assumed sinter parameters.

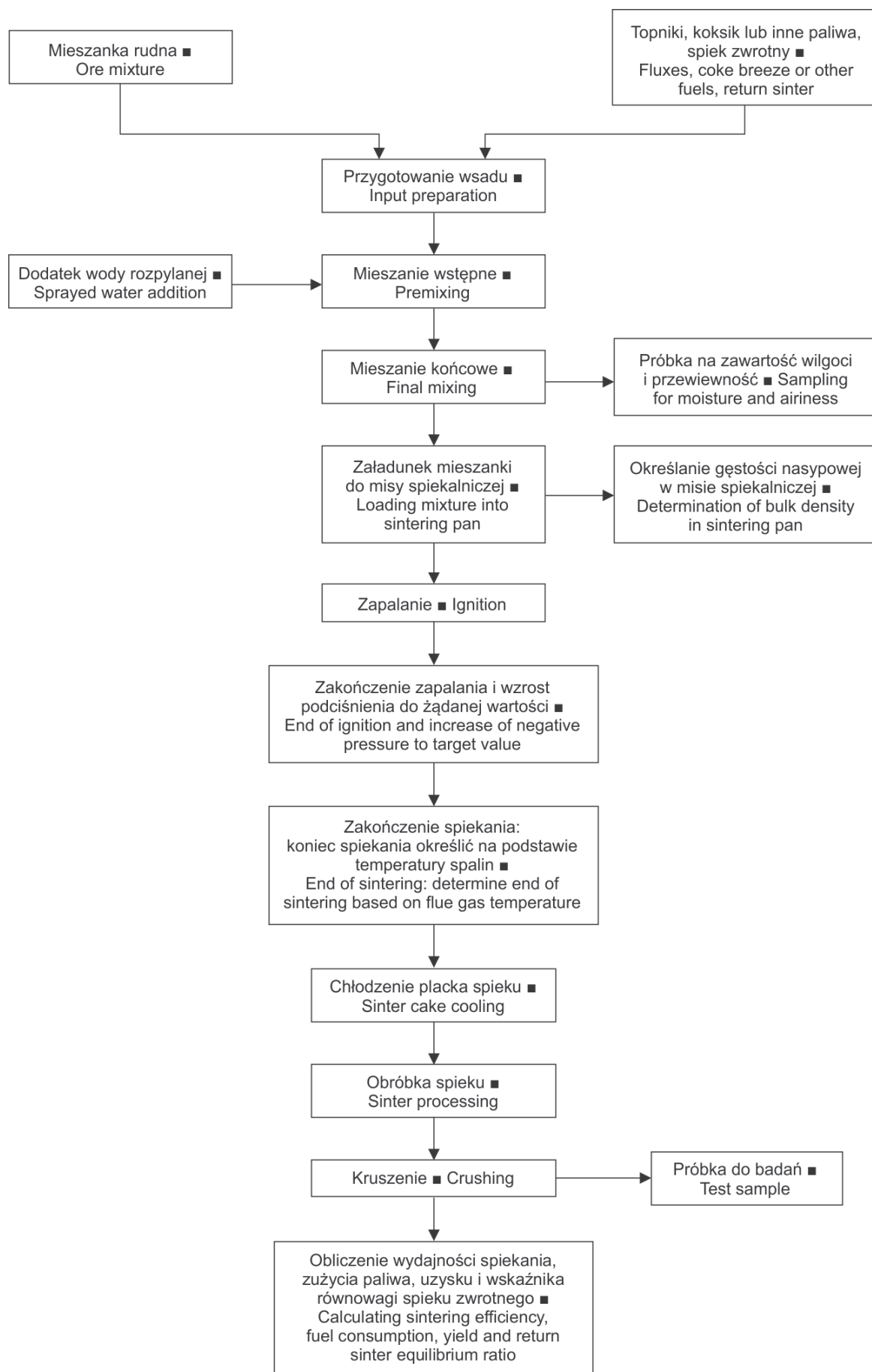
- Fe content – 55%
- alkalinity – 1.10
- MgO content – 1.3%.

The sintering tests were carried out to determine the effect of using the tested biochar on:

- sintering process parameters
- composition of exhaust gases from the process
- physical and chemical properties of the sinter.

The sintering tests were carried out in a conventional sintering pan with a diameter of 490 mm, with a constant layer height of 550 mm, according to the flow sheet presented in Fig. 4 [8].

During the sintering tests, the exhaust gas composition was measured continuously, determining the content of O_2 , CO , CO_2 , NO_x , CH_4 , SO_2 and dust.



Rys. 4. Schemat technologiczny prowadzenia prób spiekania

Fig. 4. Sintering test flow sheet

3.1. WPŁYW ZASTOSOWANIA KARBONIZATU Z DREWNA IGLASTEGO NA PARAMETRY PROCESU SPIEKANIA I WŁAŚCIWOŚCI SPIEKU

Próby spiekania przeprowadzono dla 10 i 20% mas. udziału karbonizatu w sumie paliwa. W tabeli 3 zamieszczono parametry procesu i właściwości spieku uzyskane w wyniku laboratoryjnych prób spiekania.

3.1. EFFECT OF THE APPLICATION OF CONIFEROUS WOOD BIOCHAR ON THE PARAMETERS OF THE SINTERING PROCESS AND SINTER PROPERTIES

The sintering tests were carried out for 10 and 20 wt% content of the biochar in total fuel. Table 3 shows the process parameters and sinter properties obtained as a result of laboratory sintering tests.

Tabela 3. Wyniki laboratoryjnych prób spiekania z 10% mas. i 20% mas. udziałem karbonizatu w sumie paliwa

Table 3. Results of laboratory sintering tests with 10 wt% and 20 wt % content of biochar in total fuel

| Parametr ■ Parameter | Jednostka ■ Unit | Spiek porównawczy, koksik 100% ■ Comparative sinter, 100% coke breeze | Karbonizat z drewna iglastego ■ Coniferous wood biochar | |
|---|------------------|---|---|-------|
| | | | 10% | 20% |
| KRIVBAS (stan mokry) ■ (wet state) | kg | 46,99 | 47,05 | 47,04 |
| Koncentrat KR (stan mokry) ■ KR concentrate (wet state) | kg | 59,91 | 59,99 | 59,98 |
| Kamień wapienny (stan mokry) ■ Limestone (wet state) | kg | 16,90 | 16,92 | 16,92 |
| Dolomit (stan mokry) ■ Dolomite (wet state) | kg | 5,44 | 5,45 | 5,45 |
| Wapno palone Loist ■ Loist quicklime | kg | 1,87 | 1,87 | 1,87 |
| Spiek zwrotny w mieszance ■ Return sinter in the mixture: 3÷5 mm | kg | 26,96 | 29,16 | 29,25 |
| Spiek zwrotny w mieszance ■ Return sinter in the mixture: 1÷3 mm | kg | 16,08 | 15,90 | 15,82 |
| Spiek zwrotny w mieszance ■ Return sinter in the mixture: < 1 mm | kg | 13,12 | 11,17 | 11,15 |
| Suma spieku zwrotnego ■ Total return sinter | kg | 56,16 | 56,23 | 56,22 |
| Masa paliwa – suma (koksik + karbonizat) (stan mokry) ■ Fuel weight – total (coke breeze + biochar) (wet state) | kg | 6,37 | 6,21 | 6,35 |
| Masa paliwa – suma (koksik + karbonizat) (stan suchy) ■ Fuel weight – total (coke breeze + biochar) (dry state) | kg | 6,12 | 5,99 | 6,16 |
| Masa paliwa – koksik (stan mokry) ■ Fuel weight – coke breeze (wet state) | kg | 6,12 | 5,29 | 4,74 |
| Masa paliwa – karbonizat (stan mokry) ■ Fuel weight – biochar (wet state) | kg | 0,00 | 0,71 | 1,42 |
| Udział paliwa w mieszance ■ Fuel share in the mixture | % | 4,91 | 4,70 | 4,74 |
| Masa mieszanki w misie (stan mokry) ■ Weight of mixture in the pan (wet state) | kg | 185,9 | 180,4 | 176,6 |
| Masa załadowanego zwrotu do misy ■ Weight of the return loaded into the pan | kg | 52,21 | 50,71 | 49,65 |
| Ilość dodanej wody do mieszanki ■ Water added to the mixture | l | 8,41 | 8,41 | 8,45 |
| Wilgotność mieszanki ■ Mixture moisture | % | 6,92 | 6,92 | 6,93 |
| Opór przepływu (przewiewność) ■ Flow resistance (airiness) | s | 5,40 | 5,30 | 5,40 |
| Masa spieku ■ Sinter weight (> 5 mm) | kg | 108,00 | 102,67 | 95,63 |
| Suma zwrotu ■ Total return | kg | 50,10 | 50,43 | 53,97 |
| Zwrot ■ Return: 3÷5 mm | kg | 24,53 | 26,50 | 27,33 |
| Zwrot ■ Return: 1÷3 mm | kg | 13,77 | 14,27 | 16,03 |
| Zwrot ■ Return: < 1 mm | kg | 11,80 | 9,67 | 10,60 |
| Suma spieku (zwrot + spiek > 5 mm) ■ Total sinter (return + sinter > 5 mm) | kg | 158,1 | 153,1 | 149,6 |
| Obliczona teoretyczna masa spieku ■ Calculated theoretical sinter weight | kg | 105,9 | 102,3 | 99,9 |

| Parametr ■ Parameter | Jednostka ■ Unit | Spiek porównawczy, koksik 100% ■ Comparative sinter, 100% coke breeze | Karbonizat z drewna iglastego ■ Coniferous wood biochar | | |
|---|--|---|---|-------|-------|
| | | | 10% | 20% | |
| Podstawowe parametry procesu ■ Basic process parameters | Wskaźnik równowagi ■ Balance index | % | 95,9 | 99,4 | 108,6 |
| | Czas spiekania ■ Sintering time | min | 21,43 | 21,04 | 21,72 |
| | Wydajność produkcyjna ■ Productivity | Mg·m ⁻² /24 h | 37,73 | 37,16 | 35,14 |
| | Maksymalna temperatura spalin ■ Maximum flue gas temperature | °C | 328,9 | 330,7 | 387,2 |
| | Jednostkowe zużycie koksiku ■ Specific coke breeze consumption | kg/Mg spieku ■ sinter | 57,8 | 51,7 | 47,4 |
| | Jednostkowe zużycie karbonizatu ■ Specific biochar consumption | kg/Mg spieku ■ sinter | 0,0 | 6,9 | 14,2 |
| | Sumaryczne zużycie paliwa ■ Total fuel consumption | kg/Mg spieku ■ sinter | 57,83 | 58,55 | 61,62 |
| Analiza chemiczna spieku ■ Chemical analysis of sinter | Fe | % | 54,03 | 53,93 | 54,98 |
| | FeO | % | 9,30 | 6,04 | 4,74 |
| | SiO ₂ | % | 10,32 | 10,27 | 9,55 |
| | CaO | % | 11,21 | 11,31 | 10,66 |
| | Zasadowość ■ Alkalinity (CaO/SiO ₂) | - | 1,09 | 1,10 | 1,13 |
| | Al ₂ O ₃ | % | 0,60 | 0,59 | 0,57 |
| | TiO ₂ | % | 0,019 | 0,020 | 0,018 |
| | MgO | % | 1,32 | 1,26 | 1,22 |
| | P | % | 0,023 | 0,023 | 0,023 |
| | Mn | % | 0,032 | 0,029 | 0,035 |
| | S | % | 0,019 | 0,029 | 0,030 |
| | K ₂ O | % | 0,023 | 0,024 | 0,024 |
| | Na ₂ O | % | 0,034 | 0,031 | 0,035 |
| | Zn | % | 0,010 | 0,013 | 0,009 |
| Cl | % | 0,007 | 0,007 | 0,005 | |
| Analiza sitowa spieku ■ Sieve analysis of sinter | > 40 mm | % | 13,54 | 12,63 | 14,26 |
| | >25 mm | % | 20,47 | 23,99 | 23,18 |
| | >15 mm | % | 21,42 | 22,37 | 20,59 |
| | >10 mm | % | 17,97 | 15,74 | 15,91 |
| | > 5 mm | % | 26,60 | 25,26 | 26,06 |
| | Mediana ■ Median | mm | 17,06 | 18,43 | 18,32 |
| Wytrzymałość spieku ■ Sinter strength | Wytrzymałość ISO T ■ ISO T strength > 6,3 mm | % | 68,17 | 70,92 | 71,12 |
| | Ścieralność ISO A ■ ISO A grindability < 0,5 mm | % | 5,80 | 5,60 | 5,56 |
| | Rozkruszalność zrzutowa ■ Discharge crushability | % | 31,58 | 32,94 | 36,07 |
| | Wytrzymałość zrzutowa ■ Drop resistance | % | 82,59 | 81,65 | 79,80 |
| RDI | < 3,15 mm | % | 17,7 | 17,1 | 16,4 |
| RI | dR/dt (O/Fe=0,9), %/min | % | 0,96 | 1,15 | 1,08 |

Analizując uzyskane dane stwierdzono, że przy zastosowaniu 10% mas. karbonizatu z drewna iglastego w sumie paliwa, wydajność procesu spiekania wynosiła 37,16 Mg·m⁻²/24 h w stosunku do 37,73 Mg·m⁻²/24 h, przy spieku porównawczym. Odnotowano więc nieznaczny ok. 1,5% spadek produkcji. Przy 20% mas. udziale karbonizatu spadek wydajności był już wyraźny i wynosił prawie 7%. Uzyskano wydajność produkcyjną na poziomie 35,14 Mg·m⁻²/24 h.

When analysing the obtained data, it was found that when using 10 wt% of coniferous wood biochar in total fuel, the efficiency of the sintering process was 37.16 Mg·m⁻²/24 h in relation to 37.73 Mg·m⁻²/24 h for the comparative sinter. Thus, a slight approx. 1.5% decrease in production was recorded. At 20 wt% content of biochar, the decrease in efficiency was already clear and amounted to almost 7%. A production capacity of 35.14 Mg·m⁻²/24 h was achieved.

Przy 10% mas. udziale tego karbonizatu, zużycie paliwa wzrasta z 57,83 kg/Mg spieku do 58,55 kg/Mg spieku, tj. ok. 1,2%. Wyraźny wzrost zużycia paliwa stwierdzono przy zastosowaniu 20% mas. karbonizatu i wyniósł on 6,5%. Zużycie paliwa wynosiło 61,62 kg/Mg spieku.

Bardzo ciekawym zjawiskiem, które stwierdzono przy stosowaniu karbonizatu było obniżenie się zawartości FeO w spieku. W spieku porównawczym, spiekany w 100% na koksiku, zawartość FeO wynosiła 9,3% mas. W przypadku badanego karbonizatu przy 10% mas. jego udziale zawartość FeO wynosiła 6,04% mas., a przy 20% mas. udziale spadła do 4,74% mas. Jest to bardzo pozytywne zjawisko z punktu widzenia procesu wielkopiecowego, gdyż spiek o niższej zawartości FeO wykazuje lepsze właściwości redukcyjne. Oznacza to, że w warunkach wielkiego pieca będzie potrzebował mniejszej ilości koksu na redukcję do żelaza metalicznego.

Potwierdzeniem lepszej redukcyjności tych spieków były wykonane badania RI, które pokazały, że wskaźnik redukcji dR/dt wynosi 1,15%/min przy 10% mas. udziale karbonizatu i 1,08%/min, przy 20% mas. w stosunku do 0,96%/min, dla spieku wyprodukowanego na koksiku. Również wykonane badania RDI wykazały, że spiek z udziałem tego karbonizatu ma lepsze właściwości wytrzymałościowe w warunkach redukcyjnych. Oznacza to, że spiek w szybszym wielkiego pieca ma mniejszą podatność na rozkruszanie i tworzenie frakcji < 3,15 mm. I tak, spiek wytworzony z udziałem koksu po redukcji zawierał 17,7% mas. frakcji < 3,15 mm, a przy stosowaniu 10% mas. karbonizatu ten udział wynosił 17,1% mas. i 16,4% mas. przy 20% mas. udziale tego paliwa. Spiek wytworzony z udziałem karbonizatu posiadał również lepszą wytrzymałość ISO T. Spiek na bazie koksu posiadał wytrzymałość ISO T (ilość ziarna > 6,3 mm) na poziomie 68,17%. Przy stosowaniu badanego karbonizatu stwierdzono, że wytrzymałość rośnie ze wzrostem udziału karbonizatu w sumie paliwa. Najwyższą wytrzymałość wynoszącą 71,12% uzyskano przy stosowaniu 20% mas. karbonizatu z drewna iglastego.

Równocześnie ścieralność spieku ISO A (ilość frakcji < 0,5 mm) zmniejszała się, ze wzrostem udziału karbonizatu w sumie paliwa. Ścieralność spieku przy stosowaniu koksu wynosiła 5,80%. Przy 10% mas. udziale karbonizatu ścieralność spadała do 5,60% i do 5,56% dla 20% mas. udziału tego paliwa. Bardzo dobra wytrzymałość spieku jest tym bardziej istotna i cenna, że uzyskana została przy obniżającej się zawartości FeO w spieku. Zgodnie bowiem z praktyką, im niższa zawartość FeO tym lepsza redukcyjność, ale gorsza wytrzymałość spieku. Stosowanie więc badanego karbonizatu może bardzo pozytywnie wpływać zarówno na wytrzymałość spieku, jak i jego właściwości redukcyjne. Kolejną bardzo pozytywną cechą stosowania badanego karbonizatu był fakt, że nie wnosił on do spieku niepożądanych alkaliów, chloru i cynku. Zawartości tych składników w spieku pozostały praktycznie na tym samym poziomie.

Biorąc pod uwagę wydajność produkcyjną, zużycie paliwa oraz właściwości powstałego spieku, udział badanego karbonizatu nie powinien przekraczać 10% mas. w sumie paliwa.

3.2. WPŁYW ZASTOSOWANIA KARBONIZATU Z DREWNA IGLASTEGO NA WŁAŚCIWOŚCI GAZÓW ODLOTOWYCH

Drugim istotnym czynnikiem oprócz parametrów procesu spiekania i właściwości spieku jest wpływ stosowania karbonizatów na emisję do środowiska. W trakcie testów spiekania prowadzono ciągłą analizę gazów odlotowych po

At 10 wt% content of this biochar, fuel consumption increases from 57.83 kg/Mg of sinter to 58.55 kg/Mg of sinter, i.e. approx. 1.2%. A clear increase in fuel consumption, which was 6.5%, was observed when using 20 wt% of biochar. The consumption of fuel was 61.62 kg/Mg of the sinter.

A very interesting phenomenon that was found when using the biochar was the decrease in FeO content in the sinter. In the comparative sinter, sintered on coke breeze in 100%, the FeO content was 9.3 wt%. In the case of the tested biochar, at its 10 wt% content, the content of FeO was 6.04 wt%, and at 20 wt%, the content dropped to 4.74 wt%. This is a very positive phenomenon from the point of view of the blast furnace process, as a sinter with a lower FeO content exhibits better reductive properties. This means that under blast furnace conditions, less coke will be required for reduction to metallic iron.

The RI tests, which showed that the dR/dt reduction ratio was 1.15%/min at 10 wt% of biochar content and 1.08%/min at 20 wt% in relation to 0.96%/min for the sinter produced on coke breeze, confirmed the better reducibility of these sinters. Also the performed RDI tests showed that the sinter with the content of this biochar had better strength properties under reducing conditions. This means that the sinter in the shaft of the blast furnace was less susceptible to crushing and the formation of fractions < 3.15 mm. Thus, the sinter produced with coke breeze contained 17.7 wt% of a < 3.15 mm fraction, and when using 10 wt% of biochar, this share was 17.1 wt% and 16.4 wt% at 20 wt% share of this fuel. The sinter produced with the biochar was also characterised by a better ISO T strength. The coke breeze sinter was characterised by an ISO T strength (grain quantity > 6.3 mm) of 68.17%. When using the tested biochar, it was found that the strength increases with the increase in the content of biochar in the total fuel. The highest strength of 71.12% was obtained with the use of 20 wt% of the coniferous wood biochar.

At the same time, the grindability of the ISO A (number of fraction < 0.5 mm) sinter decreased with the increase in the content of the biochar in the total fuel. The grindability of the sinter when using coke breeze was 5.80%. At a 10 wt% content of the biochar grindability decreased to 5.60% and to 5.56% for a 20 wt% content in this fuel. The very good sinter strength is all the more important and valuable as it was obtained with a decreasing FeO content in the sinter. According to practice, the lower the FeO content, the better the reduction potential, but the worse the sinter strength. Thus, the use of the tested biochar can have a very positive effect on both the sinter strength and its reducing properties. Another very positive feature of the use of the tested biochar was the fact that it did not add undesirable alkali, chlorine and zinc to the sinter. The contents of these ingredients in the sinter remained practically at the same level.

Considering productivity, fuel consumption and properties of the obtained sinter, the content of the tested biochar should not exceed 10 wt% in total fuel.

3.2. EFFECT OF THE APPLICATION OF CONIFEROUS WOOD BIOCHAR ON WASTE GAS PROPERTIES

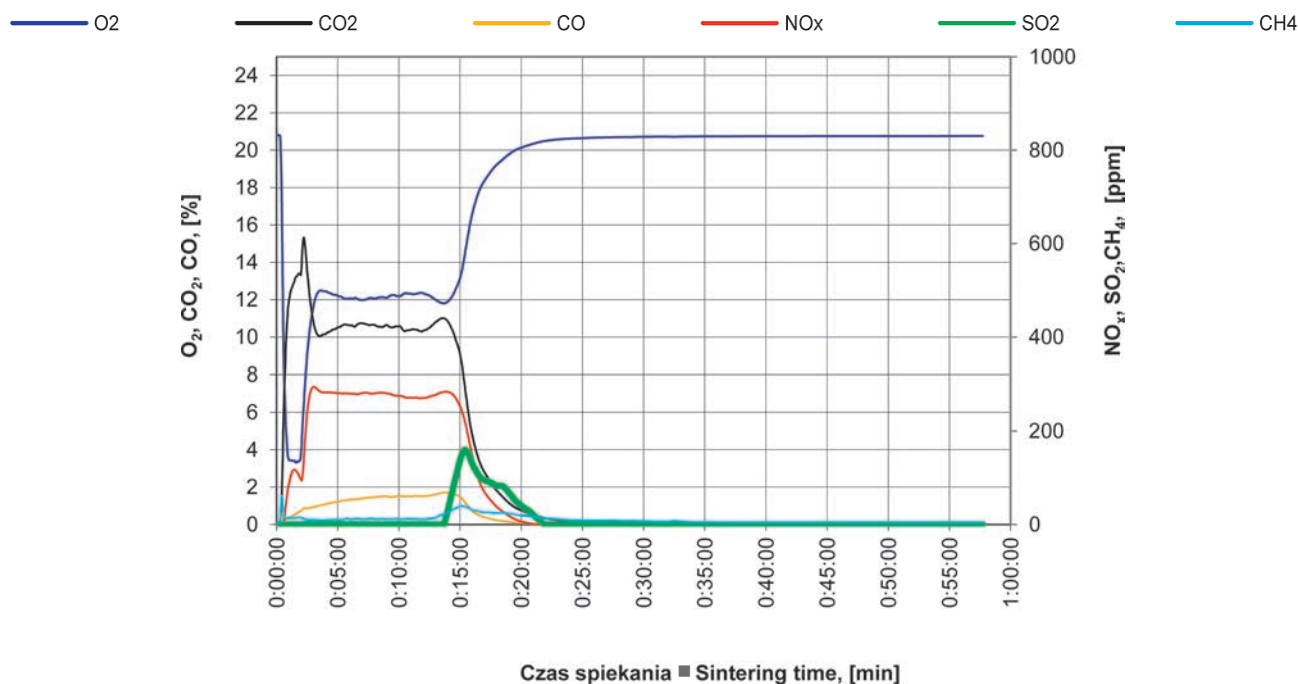
Another important factor, apart from the parameters of the sintering process and the properties of the sinter, is the influence of the use of biochars on emissions to the environment. During the sintering tests, the exhaust gas was continuously analysed on the dirty side (before the ceramic

stronie brudnej (przed filtrem ceramicznym) i po stronie czystej (w emitorze) na zawartość O_2 , CO , CO_2 , NO_x , SO_2 i CH_4 , a okresowo mierzono stężenie pyłu. W tabeli 4 przedstawiono wyniki emisji do powietrza, a na rys. 5 i 6 przykładowy skład gazów odlotowych po stronie brudnej i czystej.

Stwierdzono, że ilość powstającego CO_2 i NO_x przy stosowaniu karbonizatu jest nieznacznie wyższa (CO_2 8,89÷8,95%; NO_x 222÷234 ppm) niż przy stosowaniu koksi-ku (CO_2 8,24%; NO_x 216 ppm). Również ilość wydzielanego CO jest wyższa (1,22÷1,26%) niż przy stosowaniu koksi-ku (0,96%), co może świadczyć o niepełnym spalaniu tego paliwa zastępczego. Podwyższona zawartość metanu

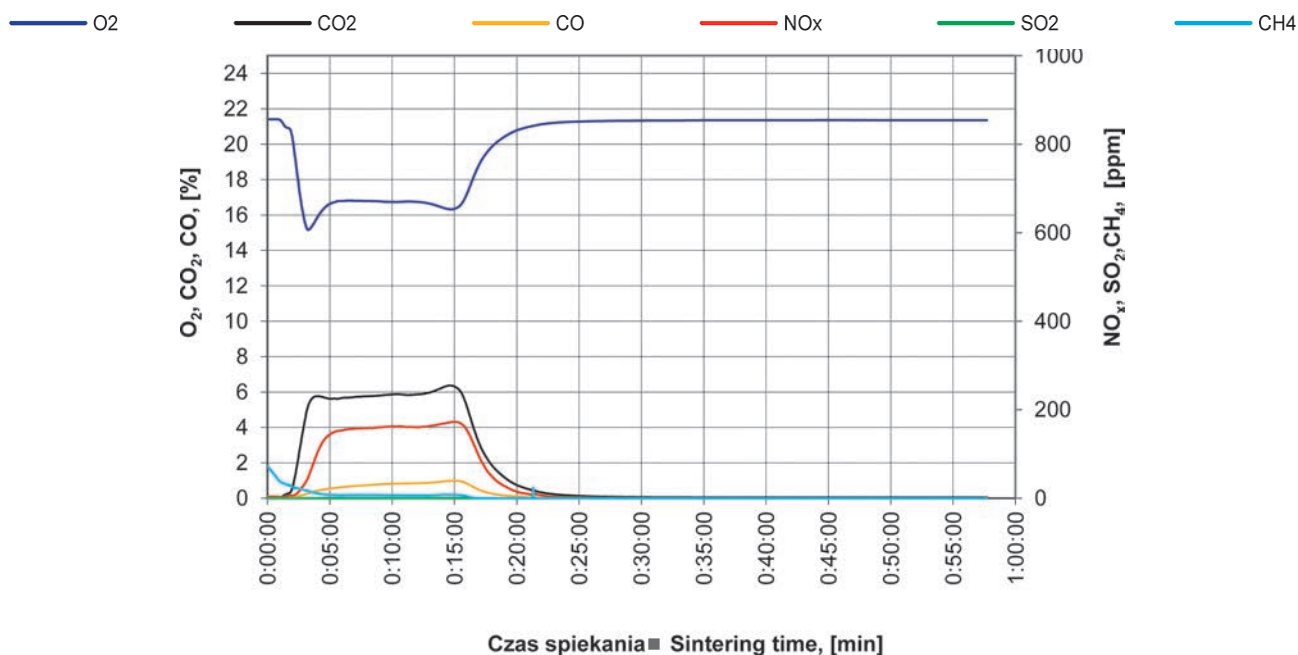
filter) and on the clean side (in the emitter) for the content of O_2 , CO , CO_2 , NO_x , SO_2 and CH_4 , and the dust concentration was periodically measured. Table 4 shows the results of emissions to air, and Figs. 5, 6 show an example of the composition of waste gases on the dirty and clean sides.

It was found that the amount of produced CO_2 and NO_x when using the biochar was slightly higher (CO_2 8.89–8.95%; NO_x 222–234 ppm) than when using coke breeze (CO_2 8.24%; NO_x 216 ppm). Also, the amount of released CO is higher (1.22–1.26%) than when coke breeze is used (0.96%), which may indicate incomplete combustion of this substitute fuel. The increased methane content



Rys. 5. Przykładowy skład gazów odlotowych po stronie brudnej przy spiekaniu mieszanek z udziałem karbonizatu z drewna iglastego

Fig. 5. Example of the composition of waste gases on the dirty side during sintering mixtures with coniferous wood biochar



Rys. 6. Przykładowy skład gazów odlotowych po stronie czystej przy spiekaniu mieszanek z udziałem karbonizatu z drewna iglastego

Fig. 6. Example of the composition of waste gases on the clean side during sintering mixtures with coniferous wood biochar

Tabela 4. Średni skład spalin po stronie brudnej (przed filtrem ceramicznym) i po stronie czystej (w emitorze) przy spiekaniu mieszanek z udziałem karbonizatu i koksiku

Table 4. Average composition of exhaust gases on the dirty side (before the ceramic filter) and on the clean side (in the emitter) when sintering mixtures with biochar and coke breeze

| Parametr ■ Parameter | Jednostka ■ Unit | Spiek porównawczy, koksik 100% ■ Comparative sinter, 100% coke breeze | | Karbonizat z drewna iglastego ■ Coniferous wood biochar | | Spiek porównawczy, koksik 100% ■ Comparative sinter, 100% coke breeze | | Karbonizat z drewna iglastego ■ Coniferous wood biochar | |
|-------------------------|--------------------------------|--|-------|---|-------|--|-------|---|-----|
| | | | | 10% | 20% | | | 10% | 20% |
| | | Strona brudna ■ Dirty side | | | | Strona czysta ■ Clean side | | | |
| O ₂ | % | 13,52 | 12,69 | 12,69 | 17,89 | 17,65 | 17,73 | | |
| CO ₂ | % | 8,24 | 8,95 | 8,89 | 4,20 | 4,30 | 4,25 | | |
| CO | % | 0,96 | 1,22 | 1,26 | 0,52 | 0,62 | 0,61 | | |
| CH ₄ | ppm | 19 | 32 | 68 | 13 | 26 | 56 | | |
| SO ₂ | ppm | 134 | 79 | 69 | < 1,0 | < 1,0 | < 1,0 | | |
| NO _x | ppm | 216 | 234 | 222 | 116 | 126 | 119 | | |
| Pył ■ Dust | mg/m _n ³ | 222 | 351 | 393 | < 1,0 | < 1,0 | < 1,0 | | |

(32÷68 ppm) w stosunku do podstawowego paliwa (19 ppm) może być wynikiem zwiększonej ilości części lotnych zawartych w karbonizacie. Pozytywnym zjawiskiem są mniejsze ilości emitowanego SO₂ (69÷79 ppm) w stosunku do koksiku (134 ppm). Związane jest to z mniejszą ilością siarki w samym karbonizacie. Okresowe pomiary stężenia pyłu wykazały, że przy stosowaniu karbonizatów można się spodziewać większych emisji pyłu (351÷393 mg/m_n³) niż przy standardowym paliwie (222 mg/m_n³). Może to być związane z drobnociarnistą postacią tego paliwa, który może być częściowo wydmuchiwany z mieszanki spiekalniczej.

Proces oczyszczania gazów odlotowych prowadzony był z wykorzystaniem katalitycznego filtra ceramicznego zabudowanego w linii do półprzemysłowej symulacji procesu spiekania rud żelaza, co pozwoliło na znaczącą redukcję zanieczyszczeń emitowanych do powietrza.

Stwierdzono, że przy stosowaniu sorbentu wapniowego, występuje zjawisko całkowitego pochłonięcia siarki zawartej w gazach procesowych przez zastosowany sorbent. Analizator gazu umieszczony po stronie czystej w emitorze nie wykazał w żadnym z testów emisji siarki w gazach procesowych (granica oznaczalności < 1,0 ppm). Na rys. 5 kolorem zielonym pokazano moment pojawiania się siarki w trakcie procesu spiekania oraz maksymalną zawartość SO₂ w gazach odlotowych.

Zastosowany sorbent prawdopodobnie pochłonił również część CO₂. Jego ilość w gazach procesowych emitowanych do atmosfery zmniejszyła się z 8,89÷8,95% obj. do 4,25÷4,30% obj. Jest to bardzo dobry efekt umożliwiający ograniczenie emisji gazów cieplarnianych.

Bardzo ciekawym zjawiskiem, charakterystycznym dla stosowanego filtra ceramicznego, była ok. 46% redukcja NO_x w spalinach, którą uzyskano dzięki katalizatorowi umieszczonego na powierzchni powłoki ceramicznej. Zmniejszyła się również emisja CO (z 1,22÷1,26% obj. do 0,61÷0,62% obj.) i CH₄ (z 32÷68 ppm do 26÷56 ppm).

Zastosowany filtr ceramiczny umożliwia więc zintegrowane usuwanie zanieczyszczeń, poprzez utlenianie łatwopalnych komponentów i neutralizowanie do CO₂, N₂ i H₂O. Kolejną bardzo cenną właściwością zastosowanego filtra ceramicznego jest skuteczność odpylania. Jak opisano powyżej emisje pyłu po stronie brudnej dochodziły do 393 mg/m_n³. Po stronie czystej, dla wszystkich badanych wariantów, emisja pyłu do środowiska była na poziomie < 1,0 mg/m_n³ (granica oznaczalności). Oznacza to około 99,7% skuteczność odpylania.

(32–68 ppm) as compared to the basic fuel (19 ppm) may be the result of an increased amount of volatile matter contained in the biochar. The lower amount of emitted SO₂ (69–79 ppm) compared to coke breeze (134 ppm) is a positive phenomenon. This is due to the lower amount of sulphur in the biochar itself. Periodic measurement of dust concentration showed that when using biochars, higher dust emissions (351–393 mg/m_n³) than with standard fuel (222 mg/m_n³) can be expected. This may be due to the fine grain form of this fuel which may be partially blown from the sinter mixture.

The exhaust gas purification process was carried out with the use of a catalytic ceramic filter installed in a line for semi-industrial simulation of the iron ore sintering process, which allowed for a significant reduction of pollutants emitted into the air.

It was found that when using calcium sorbent, there is a phenomenon of complete absorption of sulphur contained in process gases by the used sorbent. The clean side gas analyser in the emitter did not show sulphur emissions in the process gases (limit of quantification <1.0 ppm) in any of the tests. The green colour in Fig. 5 shows the moment of sulphur appearance during the sintering process and the maximum content of SO₂ in the waste gases.

The sorbent used probably also absorbed some of the CO₂. Its amount in process gases emitted to the atmosphere decreased from 8.89–8.95 vol% to 4.25–4.30 vol%. This is a very good effect reducing greenhouse gas emissions.

The approx. 46% reduction in NO_x in the exhaust gas was a very interesting phenomenon, characteristic of the used ceramic filter, which was achieved thanks to the catalyst placed on the surface of the ceramic coating. The emission of CO (from 1.22–1.26 vol% to 0.61–0.62 vol%) and CH₄ (from 32–68 ppm to 26–56 ppm) also decreased.

Thus, the applied ceramic filter enables the integrated removal of impurities by oxidising flammable components and neutralising them to CO₂, N₂ and H₂O. Another very valuable property of the applied ceramic filter is its dedusting efficiency. As described above, dust emissions on the dirty side reached 393 mg/m_n³. On the clean side, the emission of dust to the environment was at level <1.0 mg/m_n³ (limit of quantification) for all tested variants. This means about 99.7% dust removal efficiency.

4. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań zastosowania karbonizatu z drewna iglastego jako paliwa zastępczego w procesie spiekania rud żelaza stwierdzono:

1. Pozyskany do badań karbonizat z drewna iglastego charakteryzował się bardzo drobnym uziarnieniem. Średnia wielkość ziarna wynosi tylko 0,50 mm, a ilość frakcji poniżej 1 mm stanowiła ponad 84% mas. Średnia wielkość ziarna dla koksiku wynosiła 1,45 mm, przy prawie 60% mas. frakcji poniżej 1 mm. Taka ziarnistość paliwa może niekorzystnie wpływać na przewodność mieszanek spiekalniczej.
2. Zawartość węgla w karbonizacie wynosiła 75% mas., a w koksiku 81% mas. Niższa zawartość węgla w karbonizacie może powodować zwiększone zużycie tego paliwa w procesie spiekania.
3. Karbonizat nie zawierał niepożądanych substancji olejowych, ale należy zwrócić uwagę na bardzo wysoką zawartość części lotnych w badanym karbonizacie, która wynosiła 25,0% mas. w stosunku do 5,02% mas. w koksiku. Może to powodować przy spiekaniu wzmożone emisje węglowodorów do środowiska.
4. Karbonizat praktycznie nie zawierał szkodliwego sodu, chloru, cynku i miedzi. Również zawartość siarki była niska i wynosiła 0,33% mas. w porównaniu do 0,9% mas. w koksiku.
5. Biorąc pod uwagę wydajność produkcyjną, zużycie paliwa oraz właściwości powstałego spieku, udział badanego karbonizatu nie powinien przekraczać 10% mas. w sumie paliwa.
6. Przy stosowaniu badanego karbonizatu obniżała się zawartość FeO w spieku. Jest to bardzo pozytywne zjawisko z punktu widzenia procesu wielkopiecowego, gdyż spiek o niższej zawartości FeO jest lepiej redukcyjny. Oznacza to, że w warunkach wielkiego pieca będzie potrzebował mniejszej ilości koksiku na redukcję do żelaza metalicznego.
7. Spiek wytworzony z udziałem karbonizatu posiadał lepszą wytrzymałość ISO T (ilość frakcji > 6,3 mm) niż przy stosowaniu samego koksiku. Stwierdzono, że wytrzymałość rośnie ze wzrostem udziału karbonizatu w sumie paliwa. Równocześnie ścieralność spieku ISO A (ilość frakcji < 0,5 mm) zmniejszała się ze wzrostem udziału karbonizatu w sumie paliwa. Stosowanie więc badanego karbonizatu może bardzo pozytywnie wpływać zarówno na wytrzymałość spieku, jak i jego właściwości redukcyjne.
8. Zastosowanie sorbentu wapniowego pozwoliło na całkowite pochłonięcie siarki zawartej w gazach procesowych. Stężenia siarki w emiterze były poniżej granicy oznaczalności, tj. < 1,0 ppm. Sorbent pochłoniął również część CO₂, co umożliwia ograniczenie emisji gazów cieplarnianych.
9. Zastosowanie katalitycznego filtra ceramicznego w linii do półprzemysłowej symulacji procesu spiekania rud żelaza umożliwiło ok. 46% redukcję NO_x w spalinach. Zastosowany filtr ceramiczny umożliwia więc zintegrowane usuwanie zanieczyszczeń poprzez utlenianie łatwopalnych komponentów i neutralizowanie do CO₂, N₂ i H₂O.
10. Stwierdzoną właściwością zastosowanego filtra ceramicznego była wysoka skuteczność odpylania. Emisje pyłu po stronie brudnej dochodziły do 393 mg/m_n³. Po stronie czystej, emisja pyłu do środowiska była na poziomie <1,0 mg/m_n³. Oznacza to około 99,7% skuteczność odpylania.

4. CONCLUSIONS

Based on the research carried out on the use of coniferous wood biochar as a substitute fuel in the iron ore sintering process, it was found that:

1. The coniferous wood biochar obtained for research was characterised by very fine graining. The average grain size is only 0.50 mm, and the number of fractions below 1 mm accounted for over 84 wt%. The average grain size for coke breeze was 1.45 mm, with almost 60 wt% of fractions below 1 mm. Such fuel grain size may adversely affect the airiness of the sinter mixture.
2. The carbon content in the biochar was 75 wt%, and 81 wt% in the coke breeze. Lower carbon content in the biochar may result in increased consumption of this fuel in the sintering process.
3. The biochar did not contain any undesirable oily substances, but it should be noted that the tested biochar contained a large amount of volatile matter, which amounted to 25.0 wt% in relation to 5.02 wt% in coke breeze. This may result in increased emissions of hydrocarbons to the environment during ore sintering.
4. The biochar was practically free of harmful sodium, chlorine, zinc and copper. The sulphur content was also low and amounted to 0.33 wt% compared to 0.9 wt% in the coke breeze.
5. Considering productivity, fuel consumption and properties of the obtained sinter, the content of the tested biochar should not exceed 10 wt% in total fuel.
6. When using the tested biochar, the content of FeO in the sinter decreased. This is a very positive phenomenon from the point of view of the blast furnace process, as a sinter with a lower FeO content is more reductive. This means that under blast furnace conditions, less coke will be required for reduction to metallic iron.
7. The sinter produced with the use of biochar was characterised by a higher ISO T strength (number of fractions > 6.3 mm) than when using coke breeze alone. It was found that the strength increases with the increase in the content of biochar in the total fuel. At the same time, the grindability of the ISO A (number of fraction < 0.5 mm) sinter decreased with the increase in the content of the biochar in the total fuel. Thus, the use of the tested biochar can have a very positive effect on both the sinter strength and its reducing properties.
8. The use of calcium sorbent allowed for the complete absorption of sulphur contained in the process gases. The sulphur concentrations in the emitter were below the quantification limit, i.e. < 1.0 ppm. The sorbent also absorbed some of the CO₂, which helps to reduce greenhouse gas emissions.
9. The use of a catalytic ceramic filter in the line for semi-industrial simulation of the iron ore sintering process enabled an approx. 46% reduction of NO_x in the exhaust gases. Thus, the applied ceramic filter enables the integrated removal of impurities by oxidising flammable components and neutralising them to CO₂, N₂ and H₂O.
10. The stated property of the applied ceramic filter was the high dust removal efficiency. Dust emissions on the dirty side reached 393 mg/m_n³. On the clean side, the emission of dust to the environment was at level <1.0 mg/m_n³. This means about 99.7% dust removal efficiency.

LITERATURA ■ REFERENCES

- [1] J. Stecko, M. Niesler. *Ocena możliwości całkowitego zastąpienia koksiu antracytem w procesie spiekania*. Sprawozdanie IMŻ nr S0-0787, 2011. [niepublikowane].
- [2] S. Stelmach. *Piroliza odpadów jako element gospodarki o obiegu zamkniętym*. Monografia. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2019.
- [3] P. Ostrowska-Popielska, A. Sorek. Możliwości wykorzystania biomasy w procesach hutniczych. *Prace Instytutu Metalurgii Żelaza*, 2013, 65 (4), s. 46-52.
- [4] G. Jha, K.D. Mehta, S. Soren. Partial substitution of coke breeze with biomass and charcoal in metallurgical sintering. *Fuel*, 2020, 278, 118350.
- [5] M. Hara, T. Kawaguchi. Utilization of Biomass for Iron Ore Sintering. *ISIJ International*, 2013, 53(9), s. 1599-1606.
- [6] T. Fray, M. Martinez-Pacheco, M. Zandi. Biomass for iron ore sintering. *Minerals Engineering*, 2010, 23 (14), s. 1139-1145.
- [7] M. Niesler, M. Nowak. Ocena możliwości wykorzystania paliwa alternatywnego z opadów komunalnych w procesie spiekania rud żelaza. *Prace Instytutu Metalurgii Żelaza*, 2014, 66 (3), s. 18-26.
- [8] Polski Komitet Normalizacyjny. PN-ISO 8263:1999. *Miałkie rudy żelaza. Metoda przedstawiania wyników prób spiekania*. Warszawa: PKN, 1999.
- [9] Łukasiewicz – Instytut Metalurgii Żelaza im. Stanisława Staszica. Linia do półprzemysłowej symulacji procesu spiekania rud żelaza i odpadów z wykorzystaniem nowatorskiego systemu neutralizacji spalin (LS). [Online] Dostępny z: [https://www.imz.pl/pl/aktualnosci/BS_-_Zaklad_Badan_Procesow_Surowcowych/Linia_do_polprzemyslowej_symulacji_procesu/\[31,605,,,\]](https://www.imz.pl/pl/aktualnosci/BS_-_Zaklad_Badan_Procesow_Surowcowych/Linia_do_polprzemyslowej_symulacji_procesu/[31,605,,,]) [Dostęp 20 stycznia 2021].