

Wykorzystanie chłodzonego powietrzem żużla wielkopieczowego w produkcji cementu – wkład w redukcję emisji CO₂

Use of air-cooled blast furnace slag in cement production – a contribution to the reduction of CO₂ emissions

Stefan Krispel^{1*}, Stefanie Klackl¹, Mario Mauhart²

¹Smart Minerals GmbH, Franz-Grill-Straße 9, 1030 Wien, Austria

²voestalpine Stahl GmbH, voestalpine-Straße 3, 4020 Linz, Austria

*Corresponding author: St. Krispel, e-mail: office@smartminerals.at

Streszczenie

Wykorzystanie surowców odpadowych obok tradycyjnie stosowanego wapienia, gliny i margla do produkcji klinkieru cementu portlandzkiego oszczędza zasoby naturalne i umożliwia recykling odpadów w nowym procesie o wartości dodanej. Ponadto niektóre surowce alternatywne mają również tę wielką zaletę, że nie emitują CO₂ lub emitują go mniej w trakcie procesu wypału. Stanowi to znaczący wkład w osiągnięcie neutralności klimatycznej.

Celem tego projektu badawczego była ocena możliwości recyklingu żużla wielkopieczowego chłodzonego powietrzem [ACBFS] jako surowca alternatywnego w procesie wypalania klinkieru portlandzkiego. W ciągu kilku tygodni do zestawu surowcowego do produkcji klinkieru w austriackiej cementowni dodawano w różnych ilościach żużel wielkopieczowy chłodzony powietrzem. Po ocenie wpływu na podatność na mielenie i zużycie energii podczas mielenia, wyprodukowane cementy poddano serii testów zaprawy i betonu, w tym określeniu czasu wiązania, wodożądności, właściwości mieszanki betonowej, wytrzymałości na ściskanie i odporności na karbonatyzację stwardniałego betonu. Uzyskane wyniki pozwalają lepiej ocenić przydatność odpadowego żużla w technologii produkcji cementu oraz określić ilość żużla, jaką można dodać bez utraty jakości cementu.

Słowa kluczowe: cement, beton, emisja CO₂, żużel wielkopieczowy chłodzony powietrzem

Summary

Using substitute raw materials alongside the traditionally used limestone, clay, and marl to produce Portland cement clinker saves natural resources and achieves the recycling of waste in a new value-added process. Additionally, certain substitute raw materials also have the great advantage that they release no or very little CO₂ during the burning process. This represents a significant contribution to achieving climate neutrality.

The aim of this research project was to evaluate the recyclability of air-cooled blast furnace slag [ACBFS] as a substitute raw material in the clinker burning process of cement production. Over a course of several weeks, air-cooled blast furnace slag was added in varying quantities to the raw materials for clinker production in an Austrian cement plant. After assessing the influence on grindability and grinding energy consumption, the produced cements underwent a series of mortar and concrete tests, including the determination of solidification times, water requirement, fresh concrete parameters, compressive strength, and carbonation resistance. The results obtained allow for a better understanding of the basic usefulness of waste slag in cement production technology and the amount of slag that can be added without losing the quality of cement.

Keywords: cement, concrete, CO₂ emissions, air-cooled blast furnace slag

1. Wprowadzenie

Surowce naturalne: wapień, glina i margiel wykorzystuje się do produkcji klinkieru portlandzkiego. Margiel to skała osadowa, która

1. Introduction

The natural raw materials limestone, clay and marl are used to produce Portland cement clinker. Marl is a sedimentary rock that is

jest mieszaniną składników węglanowych i ilastych. W celu uzyskania optymalnego składu chemicznego, w razie potrzeby dodaje się materiały korekcyjne, takie jak piasek kwarcowy, substancje zawierające tlenek żelaza, popiół lotny itp., aby zoptymalizować skład fazowy klinkieru.

Surowce alternatywne, a także surowce naturalne, zawierają główne składniki ważne dla produkcji cementu. W związku z tym zamiast materiałów konwencjonalnych można zastosować odpowiednie surowce alternatywne. W ten sposób oszczędza się zasoby naturalne oraz miejsce na składowiskach odpadów, które w przeciwnym razie jest niezbędne do utylizacji tych odpadów, a także prowadzi się recykling materiałów w nowym procesie o wartości dodanej (1, 2).

Tak zwane surowce alternatywne to głównie produkty uboczne z innych przemysłowych procesów produkcyjnych, które mogą być poddane recyklingowi w procesie wypalania klinkieru lub w procesie produkcji cementu. Przed zastosowaniem takich alternatywnych surowców należy jednak sprawdzić, czy główne składniki substancji pasują do określonej mieszaniny surowców i nie prowadzą do zwiększonego udziału składników śladowych, co mogłoby mieć negatywny wpływ na emisje lub jakość cementu.

Zawarty w mieszaninie surowcowej wapień ulega w procesie wypalania dysocjacji termicznej [rozkład na dwutlenek węgla CO_2 i tlenek wapnia CaO]. Ten proces odpowiada za około 60 procent emisji CO_2 przy produkcji cementu (3).

W porównaniu z wapieniem, niektóre surowce alternatywne mają tę wielką zaletę, że nie uwalniają CO_2 lub uwalniają go bardzo mało. Proporcjonalne zastąpienie kamienia wapiennego w mieszance surowcowej do produkcji klinkieru, a tym samym w produkcji cementu, ma zatem pozytywny wpływ na zmniejszenie emisji CO_2 przez cementownię. Stanowi to istotny wkład w osiągnięcie neutralności klimatycznej.

Celem niniejszego projektu badawczego była ocena możliwości recyklingu żużla wielkopieczowego chłodzonego powietrzem [ACBFS] jako surowca alternatywnego w procesie produkcji klinkieru portlandzkiego. Z jednej strony należy ocenić podstawową przydatność do technologii produkcji, a z drugiej określić maksymalną ilość dodawaną – bez utraty jakości cementu.

Z piśmiennictwa wynika, że zastosowanie ACBFS jako surowca zastępczego w procesie wypalania klinkieru w produkcji cementu było rzadko brane pod uwagę, ponieważ dostępne były inne odpowiednie materiały (4). W przeszłości materiał ten był stosowany jako kruszywo (5, 6) i dodatek mineralny [SCM] (7–9), ale nie został uznany za odpowiedni do produkcji klinkieru (10).

2. Materiały i składy mieszanin

W ciągu kilku tygodni chłodzony powietrzem żużel wielkopieczowy był dodawany w różnych ilościach do mieszanki surowcowej do produkcji klinkieru w austriackiej cementowni. W celu uzyskania

a mixture of carbonate and clayey components. In order to achieve the optimal chemical composition, correction materials such as quartz sand, substances containing iron oxide, fly ash, etc. are added if necessary to optimise the clinker mineralogy.

Alternative raw materials, as well as the natural raw materials, contain the main ingredients important for cement production. In this respect, suitable alternative raw materials can be used instead of conventional materials. This saves natural resources, saves landfill space for otherwise necessary disposal and achieves the recycling of waste in a new value-added process (1, 2).

The so-called alternative raw materials are mainly by-products from other industrial production processes, which can be recycled in the clinker burning process or in the cement production process. Before using such alternative raw materials, however, it must be checked whether the main components of the substance match a specified raw material mixture and do not lead to an increased input of trace components, which could have a negative effect on emissions or the quality of the cement.

The limestone contained in the raw mix is deacidified during the firing process [expulsion of carbon dioxide CO_2 , formation of calcium oxide CaO]. This chemical process of deacidification is responsible for about 60 percent of the CO_2 emissions in the production of cement (3).

Compared to the limestone used, certain substitute raw materials have the great advantage that they release no or very little CO_2 during the burning process. Proportionate replacement of limestone in the raw mix and thus in cement production therefore has a positive effect on reducing the CO_2 emissions of the cement plant. This represents a significant contribution to achieving climate neutrality.

The aim of the present research project was to evaluate the recyclability of air-cooled blast furnace slag [ACBFS] as a substitute raw material in the clinker burning process of cement production. On the one hand, the basic suitability for production technology should be assessed and, on the other, the maximum amount added – without loss of quality – should be determined.

According to literature the use of ACBFS as a substitute raw material in the clinker burning process of cement production was rarely considered because other suitable materials were available (4). The material was used as aggregate (5, 6) and supplementary cementitious material [SCM] (7–9) in the past, but it was not considered applicable for clinker production (10).

2. Materials and mix proportions

Over a course of several weeks, air-cooled blast furnace slag was added in varying quantities to the raw materials for clinker production in an Austrian cement plant. To gain homogeneous samples the production with a defined ACBFS quantity was carried out for a week before the composition was changed. The air-cooled blast furnace slag added was ground together with the regular raw

Tablica 1 / Table 1

ILOŚCI CHŁODZONEGO POWIETRZEM ŻUŻLA WIELKOPIECOWEGO DODANEGO DO MAŁKI SUROWCOWEJ DO PRODUKCJI KLINKIERU.
 QUANTITIES OF AIR-COOLED BLAST FURNACE SLAG ADDED TO THE RAW MEAL FOR CLINKER PRODUCTION.

Tydzień produkcji / Production week	Ilość żużla dodanego do mieszanki surowcowej / Quantity of air-cooled blast furnace slag added	Oznaczenie próbki / Sample description
1	0 % (Reference 1)	Tydzień 1 / Week 1 / R0
2	5 % to raw mix	Tydzień 2 / Week 2 / S5
3	7 % to raw mix	Tydzień 3 / Week 3 / S7
4	10 % to raw mix	Tydzień 4 / Week 4 / S10
5	0 % to raw mix ¹⁾	Tydzień 5 / Week 5 / R0
6	0 % (Reference 2)	Tydzień 6 / Week 6 / R0

¹⁾ Pierwotnie planowana dodana ilość 12% nie mogła być zastosowana w instalacji doświadczalnej z przyczyn technicznych, ponieważ wykryto zmianę w zachowaniu materiału w piecu obrotowym i istniało ryzyko przywierania do wykładziny pieca. W związku z tym dodanie ACBFS zostało ustawione na zero. / The originally planned added quantity of 12 % could not be handled by the experimental plant for technical reasons, as a change in the behaviour of the material in the rotary kiln was detected and there was a risk of adhesions to the kiln lining at this mixture ratio. Thus, the addition of ACBFS was set to zero.

jednorodnych próbek produkcja z określoną ilością ACBFS była prowadzona przez tydzień przed zmianą składu. Dodany chłodzony powietrzem żużel wielkopiecowy został zmielony razem ze zwykłymi surowcami, a wszelkie zmiany w zapotrzebowaniu na energię pracy młyna zostały udokumentowane przez cementownię. Dodane ilości i przedziały czasowe podsumowano w tablicy 1.

W tablicy 2 podano przybliżony skład mąki surowcowej. Dokładne ilości wapienia i margla są zwykle zróżnicowane w zależności od składu chemicznego materiałów podczas procesu produkcyjnego.

Klinkier wytworzony z tych mieszanek został zmielony na cement poprzez dodanie około 5% masowych anhydrytu lub gipsu w celu poprawy właściwości cementu.

3. Metody

W celu oceny wpływu żużla wielkopiecowego chłodzonego powietrzem na proces wypału klinkieru, regularnie badano surowce, klinkier i materiały cementowe, a tym samym ocenie poddano cały łańcuch produkcji cementu. Aby zbadać możliwe przeniesienia, badano również surową mieszankę, klinkier i cement tydzień przed i dwa tygodnie po dodaniu.

Cementy wyprodukowane w odpowiednich okresach testowych wykorzystano do badań betonu, aby móc ocenić właściwości cementu i możliwy wpływ na produkowane z niego betony. Poniżej przedstawiono program badawczy trwającego kilka tygodni wielkoskalowego testu.

3.1. Charakterystyka żużla

W celu określenia składu chemicznego żużla wielkopiecowego przeanalizowano dwanaście próbek za pomocą spektroskopii fluorescencji rentgenowskiej [XRF]. Materiał został przygotowany w postaci próbek proszkowych. Pomiar został wykonany za pomocą urządzenia Bruker D8 Endeavor.

Tablica 2 / Table 2

SKŁAD SUROWCA PRZED WEJŚCIEM DO PIECA OBROTOWEGO.

COMPOSITION OF THE RAW MATERIAL BEFORE ENTERING THE ROTARY KILN.

Próbka / Sample	Żużel / ACBFS, %	Wapień / Limestone, %	Margiel / Marl %
R0	0	67	33
S5	5	63	32
S7	7	62	31
S10	10	60	30

materials and any changes in the energy requirements of the mill operation of the cement plant were documented. The quantities added and the time intervals are summarised in Table 1.

In Table 2 an approximate mixture ratio of the raw materials is given. The exact quantities of Limestone and Marl usually are varied according to the bulk chemistry of the materials during the production process.

The clinkers produced from these mixtures were milled to cements by the addition of about 5 m % anhydrite or gypsum to improve the cement properties.

3. Methods

To assess the influence of air-cooled blast furnace slag on the clinker burning process, the raw mix, clinker and cement materials were regularly tested and thus, the entire cement production chain was included in the assessment. To investigate possible carryovers, raw mix, clinkers and cements were also investigated one week before and two weeks after the addition.

The cements produced in the respective test periods were used for concrete investigations in order to be able to assess the cement properties and possible effects on concretes produced from these cements.

3.2. Badania mąki surowcowej

Celem badań mieszanki surowcowej było określenie wpływu żużla wielkopieczowego chłodzonego powietrzem na mielność surowca przed jego wejściem do pieca obrotowego. Zmierzone, czy w wyniku dodania można stwierdzić zmianę stopnia rozdrobnienia lub wzrost zapotrzebowania na energię. Rozkład wielkości cząstek w trzech próbkach na tydzień oceniono za pomocą analizatora wielkości cząstek Morphologi G3 [Malvern Panalytical] i porównano z wartościami z tygodni referencyjnych [bez dodatku ACBFS]. Zużycie energii na mielenie było mierzone i dokumentowane przez cementownię przez cały okres badawczy.

3.3. Badania klinkieru

Z wyprodukowanego klinkieru pobierano próbki trzy razy w tygodniu i badano je pod kątem właściwości chemicznych, mineralogicznych i strukturalnych za pomocą analizy XRF, dyfraktometrii rentgenowskiej [XRD – konfiguracja w tablicy 3] oraz mikroskopii optycznej cienkich przekrojów.

3.4. Testy cementu

Każdego tygodnia produkowano dwie próbki cementu [oznaczone jako C1 i C2], obie sklasyfikowane jako CEM I 52.5, które były wykorzystywane do badań cementu i zaprawy zgodnie z serią ÖNORM EN 196 w celu sprawdzenia jednorodności produktu i jego zgodności z wymaganiami normatywnymi zgodnie z normą ÖNORM EN 197-1 (11). Cement typu CEM I 52,5 został wybrany w celu oceny jak najwyższej zawartości klinkieru i odpowiednio zanotowania bardziej wyraźnych efektów w przypadku ewentualnych odchyłań spowodowanych zmienioną mieszanką surowcową.

Badania wytrzymałości beleczek zaprawy na ściskanie przeprowadzono zgodnie z normą ÖNORM EN 196-1 (12). Dodatkowe charakterystyki obejmowały określenie powierzchni właściwej wg. Blaine'a zgodnie z ÖNORM EN 196-6 (13), czasu wiązania i wodozadržności zgodnie z ÖNORM EN 196-3 (14).

3.5. Testy betonu

Ze wszystkich wyprodukowanych cementów wykonano mieszanki betonowe [oznaczono jakie CC]. Aby uzyskać porównywalne wyniki, betony wyprodukowano bez dodatku domieszek do betonu [np. superplastyfikatorów]. Użyte kruszywo pochodziło z okolic Wiednia i składało się głównie ze skał węglanowych. Skład mieszanek przedstawiono w tablicy 4. Na rys. 1. Pokazano krzywą uziarnienia kruszywa.

Przeprowadzono szeroko zakrojone badania stwardniałego betonu, aby ocenić wpływ właściwości wytworzonych cementów na jego właściwości. Oceniono właściwości mieszanki betonowej, wytrzymałość na ściskanie betonu po 2, 28 i 56 dniach. W celu ustalenia, czy dodatek chłodzonego powietrzem żużla wielkopieczowego ma jakikolwiek wpływ na trwałość betonu, przeprowadzono przyspieszone badanie karbonatyzacji zgodnie z ÖNORM EN 1239012 (15) w atmosferze 3 % CO₂.

Tablica 3 / Table 3

USTAWIENIA POMIARÓW DYFRAKCYJNYCH.

XRD SET UP FOR MEASUREMENT.

Źródło promieniowania / X-Ray source	CuK _α
Zakres kątowy / Range, °2θ	8 – 65
Wielkość kroku / Step size, °2θ	0.02
Napięcie / Voltage, kV	45
Natężenie / Current, mA	30

The testing programme of the large-scale test lasting several weeks is presented below.

3.1. Characterization of ACBFS

To determine the chemical composition of the blast furnace slag twelve samples were analysed using X-ray fluorescence spectroscopy [XRF]. The material was prepared as powder samples. The measurement was done with a Bruker D8 Endeavor device.

3.2. Tests on raw mix

The aim of the raw mix tests was to determine the influence of air-cooled blast furnace slag on the grindability of the raw material before the material enters the rotary kiln. It was measured whether a change in the grinding fineness or an increase in the energy requirement can be determined as a result of the addition. The particle size distribution of three samples per week was evaluated with a Morphologi G3 particle size analyser [Malvern Panalytical] and compared to the values from the reference weeks [no added ACBFS]. The grinding energy consumption was observed and documented by the cement plant throughout the testing period.

3.3. Clinker tests

The clinkers produced were sampled three times per week and investigated with regard to their chemical, mineralogical and structural properties by means of XRF analysis, X-ray diffractometry [XRD – see Table 3 for set up] and clinker microscopy of thin sections.

3.4. Cement tests

Each week two cement samples [named C1 and C2 in the following tables and descriptions], both categorized as CEM I 52.5, were produced and used for cement and mortar tests according to the ÖNORM series EN 196 in order to check the uniformity of the produce and its compliance with the normative requirements according to the standard ÖNORM EN 197-1 (11). The type CEM I 52.5 cement was chosen in order to assess the highest possible clinker content and to correspondingly observe greater effects in the event of possible deviations due to the changed raw mix.

Mortar bar compressive strength tests were carried out in accordance with ÖNORM EN 196-1 (12). Additional characterisations were the determination of the specific surface [Blaine fineness]

Tablica 4 / Table 4

SKŁAD MIESZANEK BETONOWYCH
CONCRETE MIX PROPORTIONS

Składniki / Components	Zawartość / Content, kg/m ³
Cement	286
Woda ¹⁾ Water ¹⁾	155
Kruszywo RK 0/4 Graded aggregate RK 0/4	831
Kruszywo RK 4/8 Graded aggregate RK 4/8	339
Kruszywo RK 8/16 Graded aggregate RK 8/16	418
Kruszywo RK 16/32 Graded aggregate RK 16/32	398

¹⁾W/C = 0.54

4. Wyniki

4.1. Charakterystyka żużla wielkopieczowego chłodzonego powietrzem

Skład chemiczny żużla wielkopieczowego oznaczonego za pomocą XRF przedstawiono w tabelicy 5. Skład badanych żużli jest bardzo stały z odchyleniem standardowym [SN] poszczególnych pierwiastków wynoszącym < 1%. Średnia zawartość siarki w przeliczeniu na SO₃ wynosi 1,9% przy odchyleniu standardowym 0,07%.

4.2. Badania mąki surowcowej

Rozkłady wielkości cząstek dla trzech próbek z każdej mąki surowcowej, uzyskane za pomocą analizatora wielkości cząstek Morphologi G3, wykazują mniejsze wielkości ziaren [zarówno pod względem liczby, jak i objętości] w próbkach mąki surowcowej bez dodatku żużla [tablica 6, rys. 2]. Ponieważ wyniki są na ogół bardzo zbliżone i na ich podstawie nie da się ustalić ścisłej zależności od ilości dodawanego żużla, można założyć, że wpływ na zdolność do

according to ÖNORM EN 196-6 (13), the solidification times and water requirement according to ÖNORM EN 196-3 (14).

3.5. Concrete tests

Concrete mixtures were made for all produced cements [concrete is indicated by samples with CC in the name]. To obtain comparable results the formulations were produced without the addition of concrete additives [e.g. superplasticizers]. The used aggregate originated from the Vienna region and predominantly consisted of carbonate rock. The concrete composition is shown in Table 4. The associated grading curve is shown in Fig. 1.

Extensive tests were carried out on the concrete to assess the effects of the properties of the cements produced on the concrete behaviour. The fresh concrete parameters, compressive strength after 2, 28 and 56 days. In order to detect whether the addition of air-cooled blast furnace slag has any influence on the durability of concrete, testing of rapid carbonation in accordance with ÖNORM EN 1239012 (15) [storage at 3 % CO₂ atmosphere] was carried out on all concrete compositions.

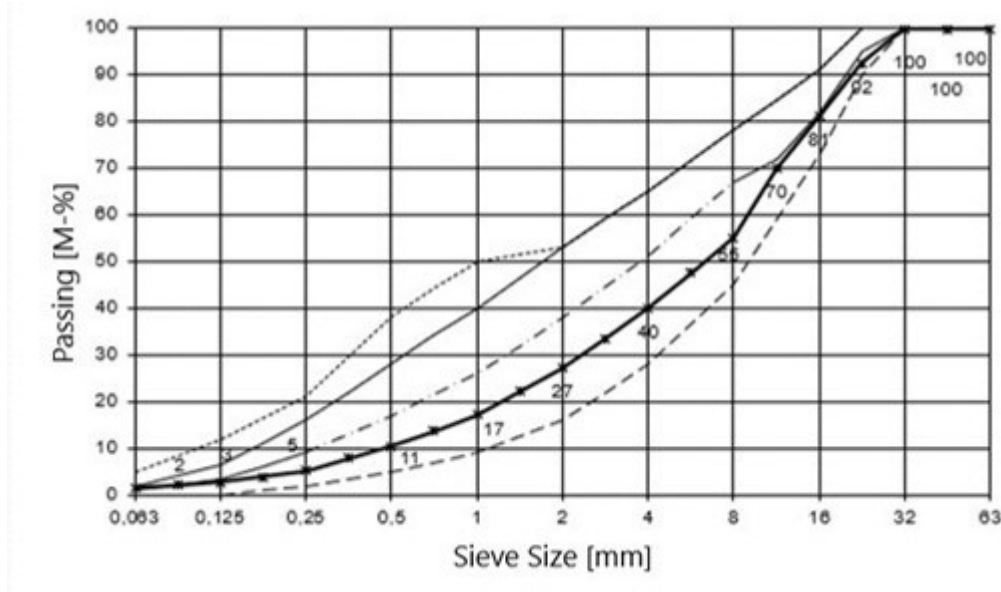
4. Results

4.1. Characterization of air-cooled blast furnace slag

The chemical composition of the blast furnace slag determined through XRF is presented in Table 5. The composition of the analysed slags is very constant with a standard deviation [SN] of the respective elements of <1. The average sulphur content calculated as SO₃ is 1.9 % with a standard deviation of 0.07 %.

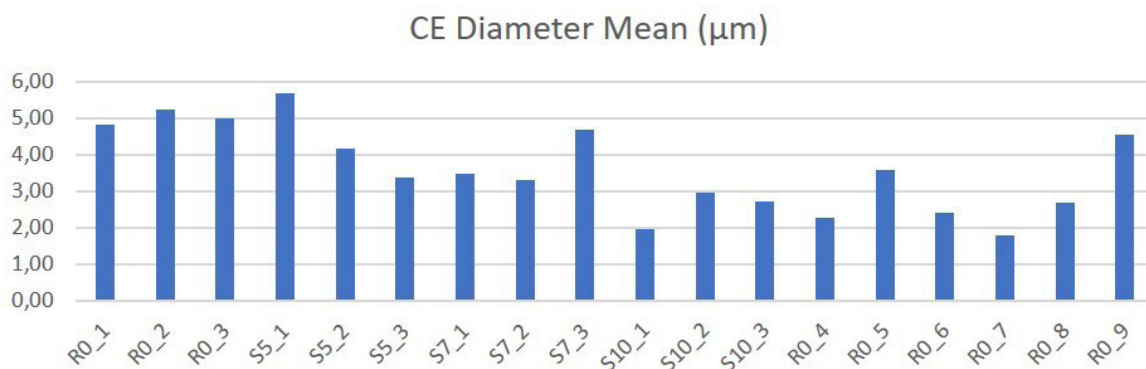
4.2. Raw mix examinations

The particle size distributions for three samples of each raw mix, acquired with an Morphologi G3 particle size analyser show finer distributions [both in terms of number and volume] in raw dust



Rys. 1. Krzywa uziarnienia kruszywa.

Fig. 1. Aggregate grading curve.



Rys. 2. Średnica zastępcza ziaren mąki surowcowej z tygodni 1 – 6.

Fig. 2. Circle equivalent diameter of the raw mix samples of weeks 1 to 6.

mielenia jest znikomy. Ponadto w całym okresie objętym badaniem nie zanotowano istotnych odchyień w energii mielenia [tablica 7].

4.3. Badania klinkieru

Skład chemiczny klinkieru [z dodatkiem i bez dodatku żużla wielkopieczowego chłodzonego powietrzem], zmierzony za pomocą XRF, jest różny [tab. 8]. Dyfraktogramy pokazują również fluktuacje głównych faz: alitu [C₃S] i belitu [C₂S] [tablica 9]. Wahania te występują również w poszczególnych okresach i dlatego nie są spowodowane dodatkiem chłodzonego powietrzem żużla wielkopieczowego, ale zmianą zawartości wapna. Analiza optyczna cienkich przekrojów klinkieru nie wykazała istotnego wpływu dodatku chłodzonego powietrzem żużla wielkopieczowego na warunki wypału [rys. 3].

4.4. Badania cementu

Wyniki uzyskane z badań wytrzymałości zaprawy na ściskanie wskazują, że dodatek chłodzonego powietrzem żużla wielkopieczowego do pyłu surowego do produkcji klinkieru nie wpływa negatywnie na wytrzymałość na ściskanie [tab. 10, rys. 4]. Stwierdzone odchylenia odpowiadają typowym odchyleniom w produkcji. Wszystkie badane cementy osiągają określoną klasę wytrzymałości cementu [52,5 N lub 52,5 R zgodnie z ÖNORM EN 197-1 (11)].

Średnio wyniki powierzchni właściwej wg. Blaine'a wykazują nieco niższe wartości, tj. mniejsze rozdrobnienie przy większych ilościach dodanego żużla wielkopieczowego chłodzonego powietrzem [tydzień 4]. Po dokonaniu klasyfikacji zgodnie z ÖNORM B 3327-1 (16) [kryterium »ograniczony zakres zmienności powierzchni właściwej wg. Blaine'a«] wymagania zostałyby spełnione [tablica 11, rys. 5].

Porównanie cementów pod względem czasu początku wiązania pokazuje, że uzyskane wartości wynoszą od 115 do 180 minut [tab. 12, rys. 6]. Zmierzona fluktuacja wartości jest niezależna od badanego okresu i wyznaczonych wartości Blaine'a. Nie ma korelacji z dodatkiem chłodzonego powietrzem żużla wielkopieczowego. Wodozgodność wykazuje jednolite, stałe wartości dla wszystkich badanych próbek. Ze względu na równoważność zapotrzebowania cementu na wodę nie można zakładać negatywnego uszczerbku na właściwości betonu w tym zakresie [patrz również (17, 18)].

Tablica 5 / Table 5

SKŁAD CHEMICZNY BADANYCH ŻUŻLI WIELKOPIECOWYCH.
CHEMICAL COMPOSITION OF THE ANALYSED BLAST FURNACE SLAGS.

Składnik Compound	Zawartość średnia Mean content	Odchylenie standardowe Standard deviation
	% masowy / % by mass	
Suma / Total	100.27	0.25
LOI	0.43	0.62
SiO ₂	36.81	0.60
Al ₂ O ₃	12.03	0.42
Fe ₂ O ₃	0.88	0.10
CaO 33.07		0.88
MgO	10.90	0.29
Na ₂ O	0.49	0.02
K ₂ O	1.30	0.03
Na ₂ O _{eq}	1.34	0.04
TiO ₂	0.57	0.03
Mn ₂ O ₃	1.74	0.06
P ₂ O ₅	0.01	0.00
Cr ₂ O ₃	0.01	0.00
BaO	0.08	0.00
SrO	0.07	0.00
ZnO	0.00	0.00
Siarka całkowita jako SO ₃ / S total as SO ₃	1.89	0.07

samples without the addition of slag [Table 6, Fig. 2]. Since the results are generally very closely related and no basic classification can be derived from the results with the respective amount added, a negligible influence on grindability can be assumed. Further no significant deviations in grinding energy were observed on the part of the executing cement plant during the entire investigation period [Table 7].

4.3. Clinker examinations

The chemical composition of the clinker [with and without added air-cooled blast furnace slag], acquired with XRF, varies [Table 8]. The XRD-Data also shows fluctuations of the main mineralogical phases alite [C₃S] and belite [C₂S] [Table 9]. These fluctuations

Tablica 6 / Table 6

DANE MORFOLOGICZNE DOTYCZĄCE ROZKŁADU WIELKOŚCI CZĄSTEK W PRÓBKACH MIESZANKI SUROWEJ.

MORPHOLOGICAL DATA OF THE PARTICLE SIZE DISTRIBUTION OF THE RAW MIX SAMPLES.

Sample	CE Diameter Mean, μm	CED[n, 0.1], μm	CED[n, 0.5] μm	CED[n, 0.9], μm	CED[v, 0.1], μm	CED[v, 0.5], μm	CED[v, 0.9], μm	HS Circularity Mean
R0_1	4.83	1.29	3.95	9.05	7.15	22.71	124.00	0.788
R0_2	5.23	1.34	4.20	9.84	8.05	27.15	99.40	0.795
R0_3	5.00	1.09	3.91	9.60	9.65	55.01	144.40	0.795
S5_1	5.68	1.46	4.68	10.57	8.00	22.69	101.40	0.765
S5_2	4.18	0.94	3.07	8.47	7.81	28.34	100.80	0.815
S5_3	3.36	0.96	2.53	6.47	6.70	45.22	144.00	0.834
S7_1	3.48	0.93	2.46	6.88	8.13	42.07	133.70	0.833
S7_2	3.31	0.86	2.46	6.36	7.14	39.38	117.40	0.835
S7_3	4.70	1.18	3.73	9.04	7.26	21.72	118.40	0.774
S10_1	1.96	0.66	1.30	3.79	7.09	48.13	109.60	0.891
S10_2	2.95	0.85	2.04	6.03	5.66	18.16	84.18	0.827
S10_3	2.71	0.80	1.92	5.38	5.14	16.68	75.20	0.839
R0_4	2.28	0.76	1.59	4.51	4.50	14.65	66.50	0.876
R0_5	3.58	0.98	2.53	7.33	6.52	18.12	73.77	0.793
R0_6	2.42	0.80	1.72	4.65	4.90	18.13	88.48	0.869
R0_7	1.80	0.71	1.30	3.28	5.47	52.98	156.80	0.905
R0_8	2.69	0.80	1.83	5.45	5.54	18.81	71.55	0.860
R0_9	4.54	1.20	3.65	8.71	6.49	16.22	84.96	0.764
CE Diameter Mean		Średnica równoważna średnia (CE) / Circle Equivalent (CE) diameter						
CED[n, 0.X]		Średnica równoważna [z rozkładu liczbowego] / CE diameter [number distribution]						
CED[v, 0.X]		Średnica równoważna [z rozkładu objętościowego] / CE diameter [volume distribution]						
HS Circularity Mean		Stosunek kwadratu obwodu zastępczego ziarna do kwadratu obwodu obrazu ziarna / HS (High Sensitivity) Circularity						

Tablica 7 / Table 7

ZAPOTRZEBOWANIE NA ENERGIĘ MIELENIA UDOKUMENTOWANE PRZEZ CEMENTOWNIĘ.

GRINDING ENERGY DEMAND DOCUMENTED BY THE CEMENT PLANT.

	Tydzień 1 / Week 1	Tydzień 2 / Week 2	Tydzień 3 / Week 3	Tydzień 4 / Week 4	Tydzień 5 / Week 5	Tydzień 6 / Week 6
Zapotrzebowanie energetyczne / Energy demand, kWh/t	9.8	9.7	9.5	9.5	9.6	9.7

4.5. Badania betonu

Wyznaczone właściwości mieszanki betonowej [gęstość, wartość przepływu, zawartość powietrza i temperatura mieszanki] podsumowano w tablicy 13. Wszystkie oznaczenia przeprowadzono po 10 minutach od wymieszania cementu z wodą zgodnie z ONR 23303 (19).

Wszystkie osiem badanych mieszanek wykazuje podobne właściwości po 10 minutach od dodania wody.

Wytrzymałości betonu na ściskanie określone dla betonu wyprodukowanego zgodnie z ONR 23303 (19) podsumowano lub przedstawiono w tablicy 14 i na rys. 7.

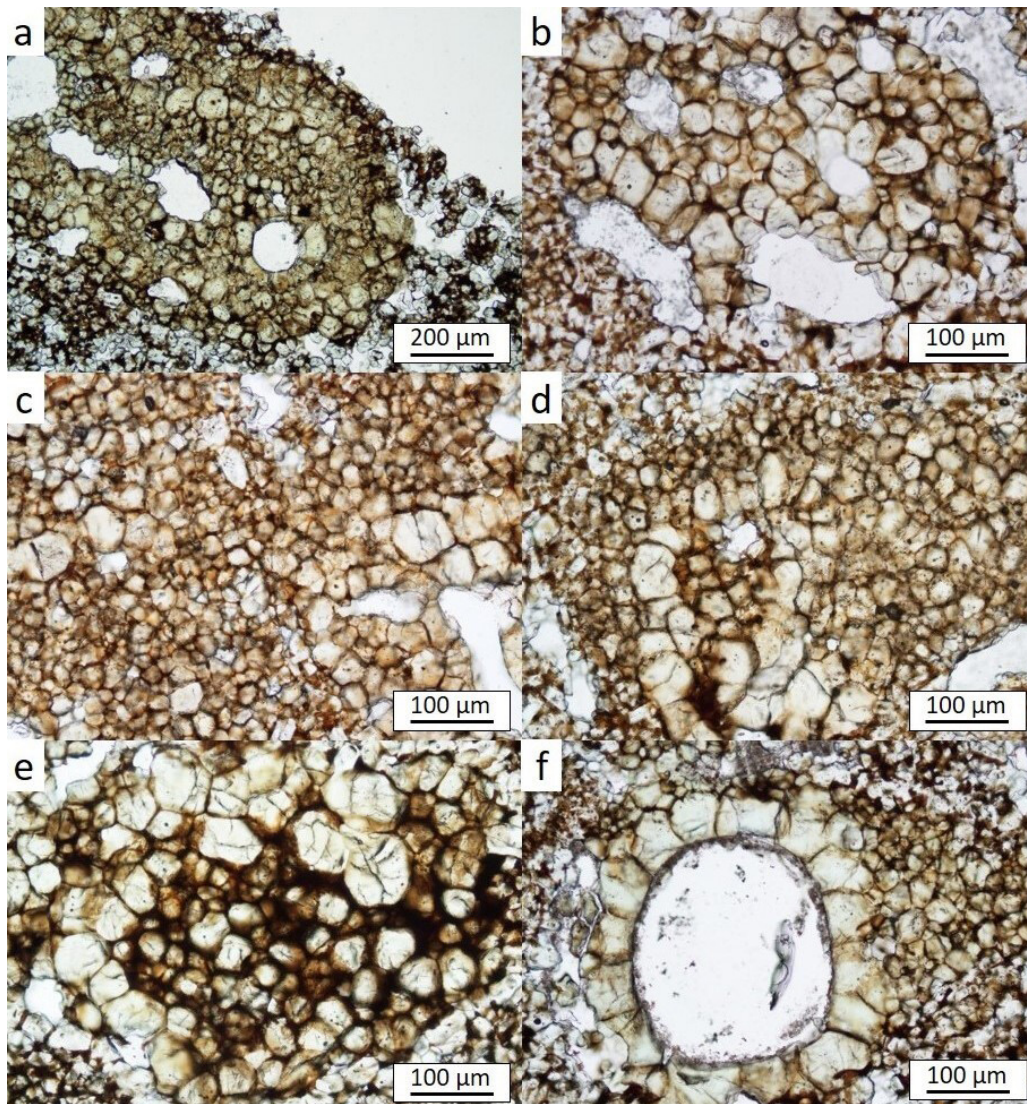
Wszystkie osiem badanych mieszanek spełnia wymagania dotyczące betonu o klasie wytrzymałości na ściskanie C30/37 zgodnie z ÖNORM B 4710-1 (20) po 28 dniach. Z jednej strony wyniki wskazują na zwykłe wahania zgodnie z metodą badawczą,

also occur within the individual periods and are therefore not due to the addition of air-cooled blast furnace slag, but to the variation of the lime standard [CaO content in the raw mix]. The optical analysis of the thin clinker sections showed no significant influence on the furnace conditions due to the addition of air-cooled blast furnace slag [Fig. 3].

4.4. Cement examinations

The results obtained from the mortar compressive strength show that the addition of air-cooled blast furnace slag to the raw dust for clinker production does not adversely affect the compressive strength [Table 10, Fig. 4]. The deviations found correspond to typical deviations in production. All tested cements reach the specified strength class of the cement [52.5 N or 52.5 R according to ÖNORM EN 197-1 (11)].

On average the Blaine fineness results show slightly lower values, i.e. a lower fineness of grinding, with higher amounts of air-cooled



Rys. 3. Przykładowe obrazy gniazd belitowych ze wszystkich okresów testowych, polaryzacja równoległa. a) Tydzień 1; b) Tydzień 2; c) Tydzień 3; d) Tydzień 4; e) Tydzień 5; f) Tydzień 6.

Fig. 3. Exemplary representation of belite nests from all testing periods, parallel polarisation. a) Week 1; b) Week 2; c) Week 3; d) Week 4; e) Week 5; f) Week 6.

a z drugiej strony na analogię do różnych partii dostaw materiałów wyjściowych lub produkcji betonu. Nie można określić negatywnego wpływu na wytrzymałość betonu na ściskanie wynikającego z dodatku chłodzonego powietrzem żużla wielkopieczowego do mieszanki surowcowej do produkcji klinkieru.

Wyznaczone głębokości karbonatyzacji mają wartości od 2,4 do 6,8 mm po 70 dniach przyspieszonej karbonatyzacji [tab. 15, rys. 8]. Nie można wykazać związku z dodatkiem chłodzonego powietrzem żużla wielkopieczowego do mieszanki surowej, ponieważ cementy o najniższych głębokościach karbonatyzacji pochodzą z 3 tygodnia [7 % dodatku] i 4 [10 % dodatku]. Cementy o największej głębokości karbonatyzacji to cementy z 1. tygodnia [0 % dodatku] i 2 [5 % dodatku]. Negatywny wpływ na odporność na karbonatyzację spowodowany dodatkiem chłodzonego powietrzem żużla wielkopieczowego do procesu spalania klinkieru nie jest zatem wykrywalny.

blast furnace slag added [week 4]. Following a classification according to ÖNORM B 3327-1 (16) [criterion "limited range of Blaine fluctuation"], the requirements would be met [Table 11, Fig. 5].

The comparison of the cements with regard to the initial setting time shows that the resulting values are between 115 and 180 minutes [Table 12, Fig.6]. The measured value fluctuation is independent of the examined period and the Blaine values determined. There is no correlation with the addition of air-cooled blast furnace slag. The water demand shows uniform, constant values for all tested samples. Due to the equivalence of the water demand of the cement, no negative impairment in the concrete can be assumed in this respect [see also (17, 18)].

4.5. Concrete examinations

The determined fresh concrete parameters [density, flow value, air content and fresh concrete temperature] are summarised in Table 13. All determinations were carried out at a concrete age of 10 minutes in accordance with ONR 23303 (19).

Tablica 8 / Table 8

ŚREDNIE WARTOŚCI SKŁADU CHEMICZNEGO KLINKIERU [ŚREDNIA WARTOŚĆ Z 3 INDYWIDUALNYCH ANALIZ KAŻDA], LOI = STRATA PRAŻENIA.

MEAN VALUES OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF CLINKER [MEAN VALUE FROM 3 INDIVIDUAL ANALYSES EACH], LOI = LOSS ON IGNITION.

	Wartości średnie / Mean Value					
	Tydzień 1 / Week 1 / R0 [1-3]	Tydzień 2 / Week 2 / S5 [1-3]	Tydzień 3 / Week 3 / S7 [1-3]	Tydzień 4 / Week 2 / S10 [1-3]	Tydzień 5 / Week 5 / R0 [1-3]	Tydzień 6 / Week 6 / R0 [1-3]
	% masowy / % by mass					
Suma / Total	100.2	100.2	100.3	100.3	100.0	100.4
LOI	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6
SiO ₂	21.8	21.6	22.5	21.4	21.6	21.5
Al ₂ O ₃	4.3	4.6	4.6	5.0	4.3	4.2
Fe ₂ O ₃	3.6	3.3	3.3	3.1	3.7	3.8
CaO	65.5	65.0	63.8	64.3	64.9	65.5
MgO	2.4	2.9	3.2	3.8	2.9	2.8
Na ₂ O	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.3
K ₂ O	0.5	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5
Na ₂ O _{eq}	0.6	0.7	0.7	0.6	0.7	0.7
TiO ₂	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Mn ₂ O ₃	0.5	0.5	0.6	0.5	0.4	0.2
P ₂ O ₅	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Cr ₂ O ₃	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BaO	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
SrO	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
ZnO	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1
Stosunek SO ₃ /alkalia / SO ₃ /alkali ratio	0.4	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5
Siarka całkowita jako SO ₃ / S total as SO ₃	0.4	0.6	0.5	0.5	0.4	0.5

Tablica 9 / Table 9

ŚREDNIE WARTOŚCI SKŁADU FAZOWEGO KLINKIERU [ŚREDNIA WARTOŚĆ Z 3 INDYWIDUALNYCH ANALIZ KAŻDA].

MEAN VALUES OF THE MINERALOGICAL COMPOSITION OF CLINKER [MEAN VALUE FROM 3 INDIVIDUAL ANALYSES EACH].

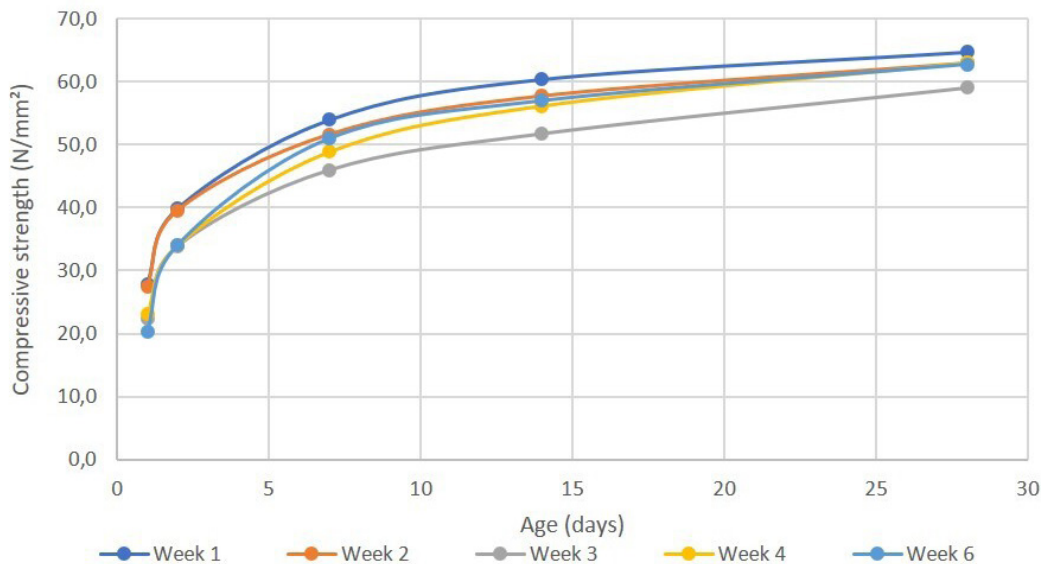
Faza / Phase	Średnia zawartość / Mean Value					
	Tydzień 1 / Week 1 / R0 [1-3]	Tydzień 2 / Week 2 / S5 [1-3]	Tydzień 3 / Week 3 / S7 [1-3]	Tydzień 4 / Week 2 / S10 [1-3]	Tydzień 5 / Week 5 / R0 [1-3]	Tydzień 6 / Week 6 / R0 [1-3]
	% masowy / % by mass					
Alit / Alite	68.6	65.1	53.0	58.2	58.2	63.8
Belit / Belite	10.8	14.4	26.5	19.2	19.2	15.2
Glinozelazian / Ferrite	13.9	13.0	13.1	11.8	11.8	12.4
Glinian suma / Aluminate total	3.8	4.2	4.1	5.9	5.9	3.9
Wolne wapno / Free lime	1.0	1.0	0.5	1.5	1.5	2.0
Portlandyt / Portlandite	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.7
Peryklaz / Periclase	1.1	1.6	2.0	2.6	2.6	1.6
Arkanit / Arcanite	0.3	0.5	0.4	0.3	0.3	0.4
Kwarc / Quartz	0.1	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0

5. Podsumowanie i wnioski

Na pytanie, czy chłodzony powietrzem żużel wielkopieczowy nadaje się jako surowiec alternatywny do produkcji klinkieru lub cementu, udzielono pozytywnej odpowiedzi w niniejszych badaniach. Okres

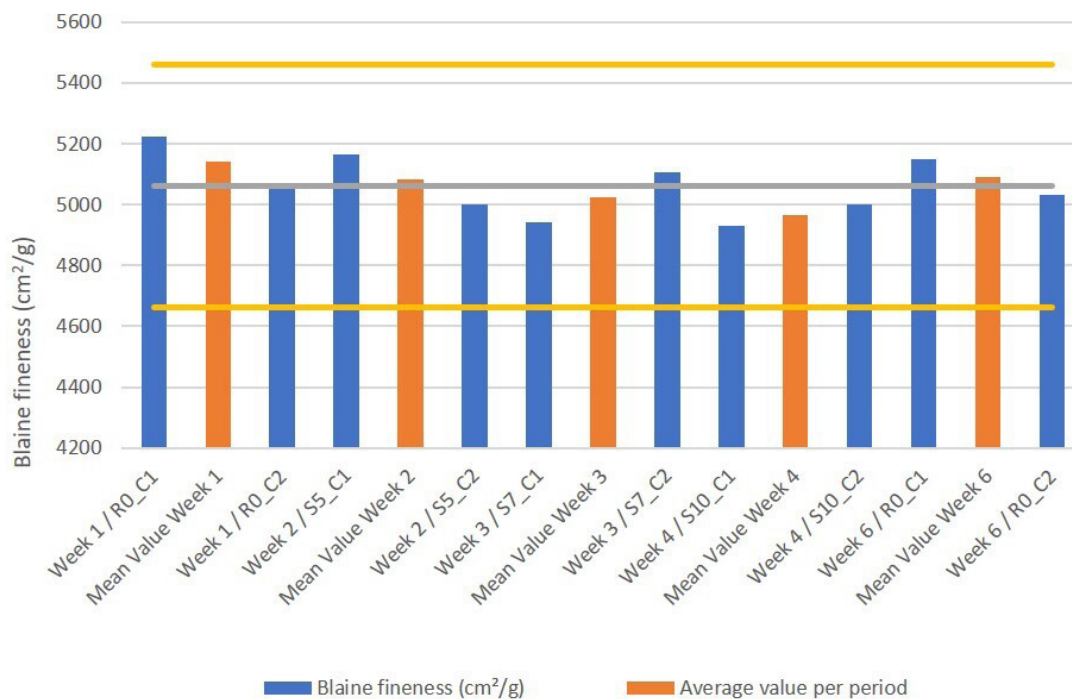
All eight concretes tested show similar fresh concrete characteristics 10 minutes after addition of water.

The concrete compressive strengths determined on the concrete produced in accordance with ONR 23303 (19) are summarised or shown in Table 14 and Fig. 7.



Rys. 4. Rozwój wytrzymałości na ściskanie badanych cementów w wieku 1, 2, 7, 14 i 28 dni.

Fig. 4. Compressive strength curves of the tested cements at the ages of 1, 2, 7, 14 and 28 days.



Rys. 5. Porównanie wyznaczonej powierzchni właściwej [Blaine] badanych cementów.

Fig. 5. Comparison of the determined specific surface [Blaine] of the tested cements.

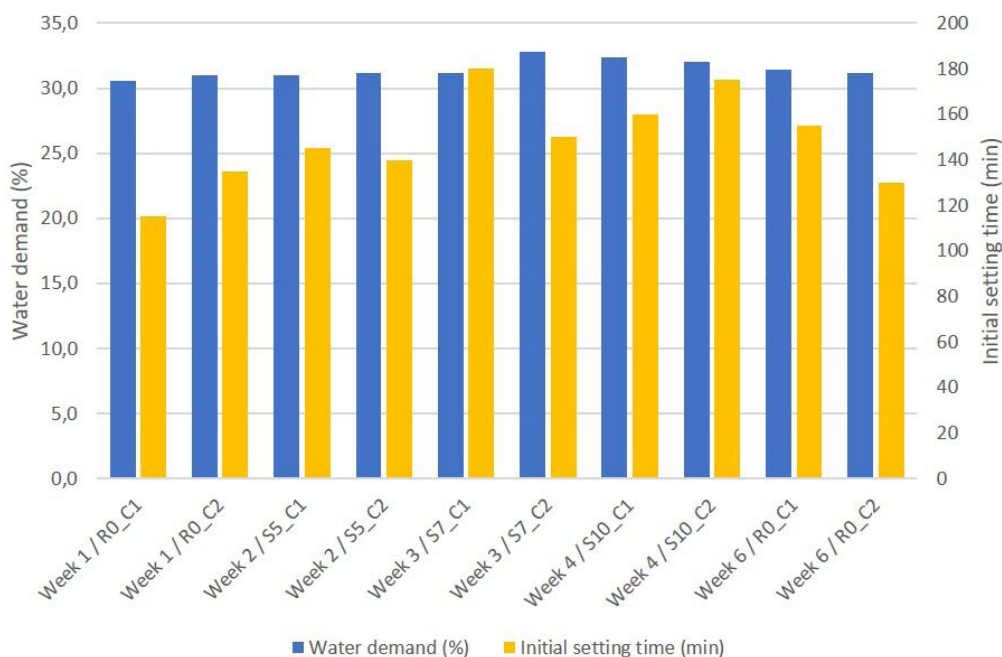
badania trwał kilka tygodni i oceniano wskaźniki zastąpienia do 10%.

Główne wyniki można podsumować w następujący sposób.

- Zdolność mielenia surowców z dodatkiem chłodzonego powietrzem żużla wielkopieczowego [mielenie spoin] jest porównywalna z sytuacją mielenia bez żużla. W przypadku cementowni wykonującej badanie nie stwierdzono zwiększenia ilości wymaganej energii do mielenia w całym okresie objętym badaniami.
- Niewielkie wahania składu chemicznego klinkieru [z dodatkiem żużla wielkopieczowego chłodzonego powietrzem i bez niego]

All eight tested concretes meet the requirement for a concrete of compressive strength class C30/37 according to ÖNORM B 4710-1 (20) at the detection age of 28 days. On the one hand, the results show usual fluctuations in accordance with the test method and on the other in analogy to different delivery batches of the starting materials or concrete production. A negative influence on the concrete compressive strengths due to the addition of air-cooled blast furnace slag to the raw mix for clinker production cannot be determined.

The determined carbonation depths have values of between 2.4 and 6.8 mm after 70 days of ageing [Table 15, Fig.8]. A connection



Rys. 6. Porównanie wyznaczonych czasów początku wiązania i wodożądności badanych cementów.

Fig. 6. Comparison of the determined initial setting times and the water demand of the tested cements.

Tablica 10 / Table 10

WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCISKANIE PO 1, 2, 7, 14 I 28 DNIACH.

COMPRESSIVE STRENGTHS AFTER 1, 2, 7, 14 AND 28 DAYS.

	Wytrzymałość na ściskanie po / Compressive strength after				
	1 dzień / 1 day	2 dni / 2 days	7 dni / 7 days	14 dni / 14 days	28 dni / 28 days
	N/mm ²				
Tydzień 1 / Week 1 / R0_C1	27.8	39.6	54.6	60.3	63.7
Tydzień 1 / Week 1 / R0_C2	28.0	40.1	53.2	60.4	65.7
Tydzień 2 / Week 2 / S5_C1	28.8	41.6	53.1	60.2	64.1
Tydzień 2 / Week 2 / S5_C2	26.2	37.5	50.2	55.4	61.9
Tydzień 3 / Week 3 / S7_C1	23.4	37.7	51.2	56.5	62.4
Tydzień 3 / Week 3 / S7_C2	21.2	30.1	40.7	47.0	55.6
Tydzień 4 / Week 4 / S10_C1	21.8	32.5	47.4	55.3	62.4
Tydzień 4 / Week 4 / S10_C2	24.4	35.6	50.3	57.0	63.6
Tydzień 6 / Week 6 / R0_C1	23.2	36.9	53.4	58.4	63.7
Tydzień 6 / Week 6 / R0_C2	17.6	31.2	48.6	55.6	61.9

można również zaobserwować w poszczególnych ocenianych okresach produkcji i są one przypisywane naturalnym wahaniom składu pozostałych surowców.

- Wszystkie badania wytworzonych cementów [wytrzymałość na ściskanie na beleczkach zaprawy zgodnie z (12), powierzchnia właściwa zgodnie z (13) oraz czasy wiązania i wodożądność zgodnie z (14)] wykazały, że nie można stwierdzić negatywnego wpływu dodatku chłodzonego powietrzem żużla wielkopiecowego na produkt lub proces produkcyjny.
- Przeprowadzono szeroko zakrojone badania, aby ocenić wpływ właściwości produkowanych cementów na beton. Oprócz określenia właściwości mieszanki betonowej w celu oceny ewentualnych zmian w urabialności betonu, przeprowadzono również badania stwardniałego betonu. Obejmowały one m.in.

with the addition of the air-cooled blast furnace slag to the raw mix cannot be derived, since the cements with the lowest carbonation depths come from week 3 [7 % addition] and 4 [10 % addition]. The cements with the highest carbonation depths are cements from week 1 [0 % addition] and 2 [5 % addition]. A negative influence on the carbonation resistance due to the addition of air-cooled blast furnace slag to the clinker burning process is therefore not detectable.

5. Summary and conclusions

The question of whether air-cooled blast furnace slag is suitable as a raw material substitute for the production of clinker or cement was answered positively in the present investigations. The study

Tablica 11 / Table 11

WYNIKI BADAŃ OZNACZANIA POWIERZCHNI WŁAŚCIWEJ WG. BLAINE'A.

TEST RESULTS OF THE DETERMINATION OF THE SPECIFIC SURFACE [BLAINE FINENESS].

	Gęstość / Density, g/cm ³	Powierzchnia właściwa wg. Blaine'a / Blaine fineness, cm ² /g	Średnia powierzchnia właściwa w danym tygodniu / Average fineness value per week, cm ² /g	Średnia powierzchnia właściwa / Average fineness value, cm ² /g
Tydzień 1 / Week 1 / R0_C1	3.17	5225	5143	5061
Tydzień 1 / Week 1 / R0_C2	3.16	5060		
Tydzień 2 / Week 2 / S5_C1	3.15	5165	5083	
Tydzień 2 / Week 2 / S5_C2	3.17	5000		
Tydzień 3 / Week 3 / S7_C1	3.16	4940	5023	
Tydzień 3 / Week 3 / S7_C2	3.15	5105		
Tydzień 4 / Week 4 / S10_C1	3.14	4930	4965	
Tydzień 4 / Week 4 / S10_C2	3.15	5000		
Tydzień 6 / Week 6 / R0_C1	3.15	5150	5090	
Tydzień 6 / Week 6 / R0_C2	3.14	5030		

Tablica 12 / Table 12

WYNIKI BADAŃ WODOŻĄDNOŚCI I CZASÓW WIĄZANIA.

TEST RESULTS OF THE WATER REQUIREMENT AND THE SETTING TIMES.

	Wodożądność / Water demand, %	Czas początku wiązania / Initial setting time, min	Czas końca wiązania / Final setting time, min
Tydzień 1 / Week 1 / R0_C1	30.6	115	150
Tydzień 1 / Week 1 / R0_C2	31.0	135	195
Tydzień 2 / Week 2 / S5_C1	31.0	145	210
Tydzień 2 / Week 2 / S5_C2	31.2	140	330
Tydzień 3 / Week 3 / S7_C1	31.2	180	315
Tydzień 3 / Week 3 / S7_C2	32.8	150	345
Tydzień 4 / Week 4 / S10_C1	32.4	160	195
Tydzień 4 / Week 4 / S10_C2	32.0	175	240
Tydzień 6 / Week 6 / R0_C1	31.4	155	210
Tydzień 6 / Week 6 / R0_C2	31.2	130	195

Tablica 13 / Table 13

WŁAŚCIWOŚCI MIESZANKI BETONOWEJ 10 MINUT PO DODANIU WODY.

FRESH CONCRETE MIX PROPERTIES 10 MINUTES AFTER ADDITION OF WATER.

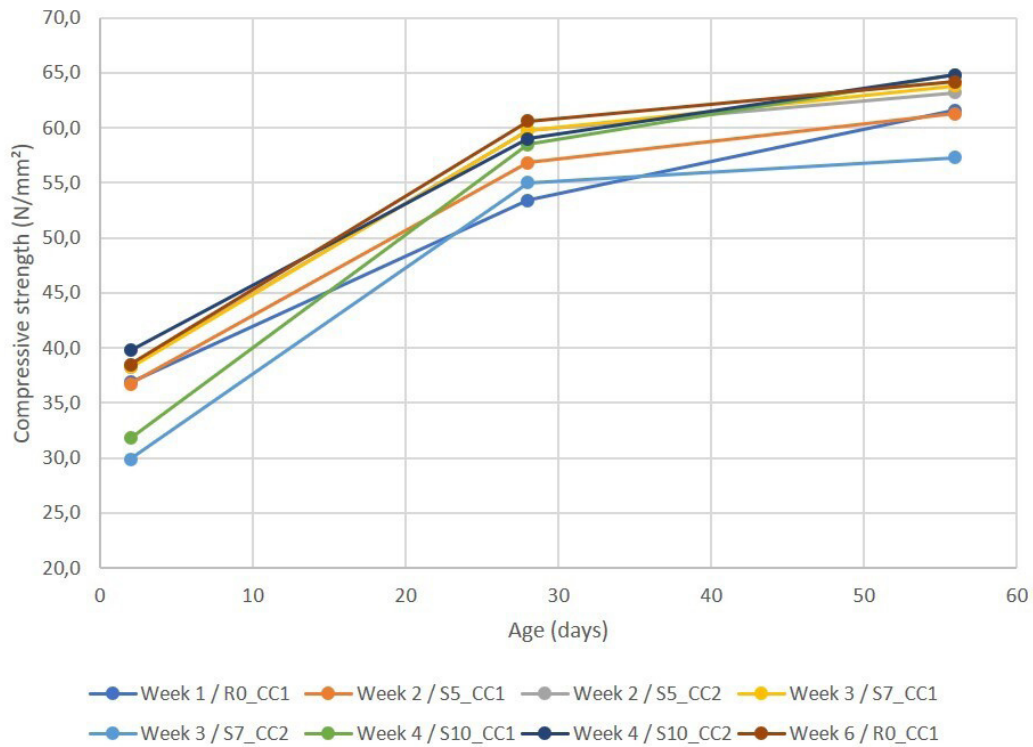
	Gęstość / Density [kg/m ³]	Rozptyw / Flow value [cm]	Zawartość powietrza / Air content [%]	Temperatura / Temperature [°C]
Tydzień 1 / Week 1 / R0_CC2	2441	37	1.9	24.6
Tydzień 2 / Week 2 / S5_CC1	2438	40	2.2	23.3
Tydzień 2 / Week 2 / S5_CC2	2456	37	1.4	24.1
Tydzień 3 / Week 3 / S7_CC1	2468	37	1.5	24
Tydzień 3 / Week 3 / S7_CC2	2446	37	1.7	21.7
Tydzień 4 / Week 4 / S10_CC1	2448	39	1.8	23.6
Tydzień 4 / Week 4 / S10_CC2	2452	38	1.8	22.2
Tydzień 6 / Week 6 / R0_CC1	2441	36	1.9	24.1

określenie rozwoju wytrzymałości na ściskanie [wymaganej konstrukcyjnie] oraz odporności na karbonatyzację [wymaganej do ochrony zbrojenia przed ewentualną korozją]. Badania te wykazały również równoważność cementów wytwarzanych z dodatkiem chłodzonego powietrzem żużla wielkopiecowego w produkcji klinkieru w porównaniu z cementami tradycyjnymi.

period spanned several weeks and replacement rates of up to 10 % were assessed.

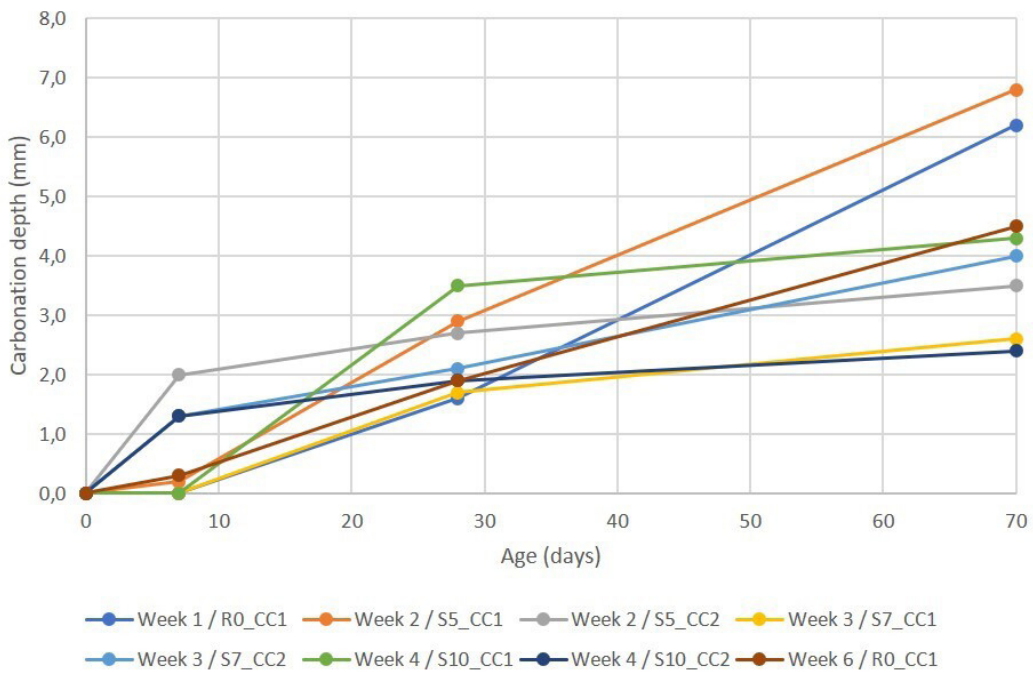
The main results can be summarised as follows:

- The grindability of the raw materials with added air-cooled blast furnace slag [joint grinding] is comparable to the grinding situ-



Rys. 7. Ewolucja wytrzymałości betonu na ściskanie.

Fig. 7. Evolution of concrete compressive strengths.



Rys. 8. Głębokości frontu karbonatyzacji podczas badania zgodnie z ÖNORM EN 12390-12.

Fig. 8. Carbonation depths during storage in accordance with ÖNORM EN 12390-12.

Jak już wspomniano, wapień zawarty w mące surowcowej ulega rozkładowi termicznemu podczas procesu wypału powodując emisję dwutlenku węgla CO₂. Ten chemiczny proces odpowiada za około 60 procent emisji CO₂ przy produkcji cementu. Poprzez dodanie chłodzonego powietrzem żużla wielkopieczowego można zmniejszyć ilość wapienia w nadawie surowcowej. To z kolei pozytywnie wpływa na ograniczenie emisji CO₂ z produkcji cementu

ation without slag. On the part of the executing cement plant, no increase in the required grinding energy was detected during the entire investigation period.

- Slight fluctuations in the chemical composition of the clinker [with and without added air-cooled blast furnace slag] can also be observed within the individual production periods assessed

Tablica 14 / Table 14

WYTRZYMAŁOŚĆ BETONU NA ŚCISKANIE W WIEKU 2, 28 I 56 DNI.

CONCRETE COMPRESSIVE STRENGTHS AT THE AGES OF 2, 28 AND 56 DAYS.

	Wytrzymałość na ściskanie po / Compressive strength after		
	2 dni / 2 days	28 dni / 28 days	56 dni / 56 days
	N/mm ²		
Tydzień 1 / Week 1 / R0_CC2	36.9	53.4	61.6
Tydzień 2 / Week 2 / S5_CC1	36.7	56.8	61.3
Tydzień 2 / Week 2 / S5_CC2	38.3	59.8	63.2
Tydzień 3 / Week 3 / S7_CC1	38.2	59.8	63.8
Tydzień 3 / Week 3 / S7_CC2	29.9	55.0	57.3
Tydzień 4 / Week 4 / S10_CC1	31.8	58.5	64.8
Tydzień 4 / Week 4 / S10_CC2	39.8	59.0	64.8
Tydzień 6 / Week 6 / R0_CC1	38.5	60.6	64.2

Tablica 15 / Table 15

WYNIKI OZNACZANIA GŁĘBOKOŚCI KARBONATYZACJI PRZY PRZECZOWYWANIU W ATMOSFERZE 3% CO₂.RESULTS OF THE CARBONATION DEPTH DETERMINATIONS WHEN STORED IN A 3% CO₂ ATMOSPHERE.

	Wartość początkowa / Initial measurement	7 dni / 7 days	28 dni / 28 days	70 dni / 70 days
	[mm]			
Tydzień 1 / Week 1 / R0_CC2	0.0	0.0	1.6	6.2
Tydzień 2 / Week 2 / S5_CC1	0.0	0.2	2.9	6.8
Tydzień 2 / Week 2 / S5_CC2	0.0	2.0	2.7	3.5
Tydzień 3 / Week 3 / S7_CC1	0.0	0.0	1.7	2.6
Tydzień 3 / Week 3 / S7_CC2	0.0	1.3	2.1	4.0
Tydzień 4 / Week 4 / S10_CC1	0.0	0.0	3.5	4.3
Tydzień 4 / Week 4 / S10_CC2	0.0	1.3	1.9	2.4
Tydzień 6 / Week 6 / R0_CC1	0.0	0.3	1.9	4.5

i stanowi cenny wkład w osiągnięcie neutralności klimatycznej w przyszłości.

Przeprowadzone badania wykazały również, że nawet w przypadku dodawania chłodzonego powietrzem żużla wielkopieczowego do procesu wypalania klinkieru można wyprodukować cementy równoważne jakościowo produktom tradycyjnym i że nie notuje się negatywnego wpływu na produkt końcowy.

Literatura / References

1. W. Kurdowski, Cement and Concrete Chemistry, Springer, Dordrecht, 2014. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7945-7>.
2. F.M. Lea, P.C. Hewlett, Lea's Chemistry of Cement and Concrete, 4th edition, Elsevier-Butterworth-Heinemann, Amsterdam London Paris, 2004.
3. M.B. Ali, R. Saidur, M.S. Hossain, A review on emission analysis in cement industries. *Renew. Sust. Ener. Rev.* **15**(5), 2252-2261 (2011). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.014>.
4. G.U. Ryu, H.J. Kim, H.J. Yu, S. Pyo, Utilization of steelmaking slag in cement clinker production: A review. *J. CO₂ Util.* **84**, 102842 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2024.102842>.
5. J. Shi, J. Tan, B. Liu, J. Chen, J. Dai, Z. He, Experimental study on full-volume slag alkali-activated mortars: Air-cooled blast furnace slag versus machine-made sand as fine aggregates. *J. Hazard. Mater.* **403**, 123983 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123983>.

and are attributed to the natural fluctuation in composition of the other raw materials.

- All investigations on the cements produced [compressive strength on mortar prisms according to (12), specific surface according to (13) as well as setting times and water demand according to (14)] showed, that no negative influence on the produce or production process can be found due to the addition of air-cooled blast furnace slag.
- Extensive tests were carried out on concrete to assess the effects of the properties of the cements produced on a specific concrete. In addition to determining the fresh concrete mix properties in order to assess possible changes in the workability of the concrete, investigations were also carried out on the hardened concrete. These included, among others, determinations of the compressive strength development [structurally required] and of the carbonation resistance [required for the protection of the reinforcement against possible corrosion]. These investigations also demonstrated the equivalence of cements produced with the addition of air-cooled blast furnace slag in clinker production compared to traditional cements.

As stated, the limestone contained in the raw dust is decomposed during the burning process resulting in CO₂ emission. This chemical process is responsible for about 60 percent of the CO₂ emissions

6. Q. Cao, U. Nawaz, X. Jiang, L. Zhang, W.S. Ansari, Effect of air-cooled blast furnace slag aggregate on mechanical properties of ultra-high-performance concrete. *Case Stud. Constr. Mater.* **16**, e01027 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01027>.
7. P.R. De Matos, J.C.P. Oliveira, T.M. Medina, D.C. Magalhães, P.J.P. Gleize, R.A. Schankoski, R. Pilar, Use of air-cooled blast furnace slag as supplementary cementitious material for self-compacting concrete production. *Constr. Build. Mater.* **262**, 120102 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120102>.
8. K.P. Verian, A. Behnood, Effects of deicers on the performance of concrete pavements containing air-cooled blast furnace slag and supplementary cementitious materials. *Cem. Concr. Comp.* **90**, 27-41 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.03.009>.
9. F. Bullerjahn, G. Bolte, Composition of the reactivity of engineered slags from bauxite residue and steel slag smelting and use as SCM for Portland cement. *Constr. Build. Mater.* **321**, 126331 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126331>.
10. S.K. Tripathy, J. Dasu, Y.R. Murthy, G. Kapure, A.R. Pal, L.O. Filipov, Utilisation perspective on water quenched and air-cooled blast furnace slags. *J. Clean. Prod.* **262**, 121354 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121354>.
11. ÖNORM EN 197-1: Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements. Austrian Institute for Standardisation, Vienna (2011).
12. ÖNORM EN 196-1: Methods of testing cement - Part 1: Determination of strength. Austrian Institute for Standardisation, Vienna (2016).
13. ÖNORM EN 196-6: Methods of testing cement - Part 6: Determination of fineness. Austrian Institute for Standardisation, Vienna (2019).
14. ÖNORM EN 196-3: Methods of testing cement - Part 3: Determination of setting times and soundness. Austrian Institute for Standardisation, Vienna (2017).
15. ÖNORM EN 1239012: Testing hardened concrete - Part 12: Determination of the carbonation resistance of concrete - Accelerated carbonation method. Austrian Institute for Standardisation, Vienna (2020).
16. ÖNORM B 3327-1: Cements according to ÖNORM EN 197-1 for special use - Part 1: Additional requirements. Austrian Institute for Standardisation, Vienna (2002).
17. J. Bonzel, J. Dahms, Über den Wasseranspruch des Frischbetons. *Betontechnische Berichte* **78**, 121-56 (1978).
18. R. Springenschmid, *Betontechnologie für die Praxis*, 2. Auflage, Beuth, Berlin, 2018.
19. ONR 23303: Test methods for concrete - National application of testing standards for concrete and its source materials. Austrian Institute for Standardisation, Vienna (2010).
20. ÖNORM B 4710-1: Concrete - Specification, performance, production, use and conformity - Part 1: Rules for the implementation of ÖNORM EN 206 for normal and heavy concrete. Austrian Institute for Standardisation, Vienna (2018).

in the production of cement. By adding air-cooled blast furnace slag, a proportionate replacement of limestone in the raw dust can take place. This in turn has a positive effect on the reduction of CO₂ emissions from cement production and makes a valuable contribution to achieving climate neutrality in the future.

The investigations carried out also show that even when air-cooled blast furnace slag is added to the clinker burning process, qualitatively equivalent cements to traditional products can be produced and that no negative effects on the end product concrete can be observed.