



MICHAŁ CWIAKAŁA¹⁾
 JOANNA KORZENIOWSKA²⁾
 CEZARY KRASZEWSKI³⁾
 ALEKSANDER WIDUCH⁴⁾

SOIL STABILISATION WITH THE USE OF HYDRAULIC ROAD BINDERS ON THE BASIS OF BROWN COAL FLY ASH

STABILIZACJA GRUNTÓW HYDRAULICZNYMI SPOIWAMI DROGOWYMI NA BAZIE POPIOŁÓW LOTNYCH Z WĘGLA BRUNATNEGO

STRESZCZENIE. Popioły lotne są coraz częściej stosowane w sektorze budowlanym z uwagi na posiadane właściwości fizyczne i chemiczne, jak również aspekt ekonomiczny i środowiskowy. Celem pracy było określenie możliwości zastosowania zmodyfikowanego (w aktywatorze magnetycznym Wapeco) popiołu lotnego z węgla brunatnego z Elektrowni Pątnów, jako głównego składnika hydraulicznego spoiwa drogowego stabilizującego podłoże gruntowe. W pracy przedstawiono analizę wyników badań wytrzymałości na ściskanie R_c mieszanek gruntowo-spoiwowych z udziałem zmodyfikowanych popiołów lotnych z węgla brunatnego. Badania przeprowadzono na siedmiu rodzajach gruntów o zróżnicowanym wskaźniku różnoziarnistości oraz zawartości frakcji pyłowej i ilowej. Do stabilizacji gruntów użyto drogowych spoiw hydraulicznych o niskich klasach wytrzymałościowych (3 MPa oraz 9 MPa). Składnikami tych spoiw w obu przypadkach był cement oraz aktywowany popiół lotny. Uzyskane wyniki badań potwierdziły przydatność mieszanek gruntowo-spoiwowych w konstrukcjach drogowych, szczególnie w robotach ziemnych.

SŁOWA KLUCZOWE: hydrauliczne spoiwa drogowe, mieszanki gruntowo-spoiwowe, popioły lotne, stabilizacja gruntów.

ABSTRACT. Brown coal fly ash is used more and more often in the construction industry because of its physical and chemical properties as well as economic and environmental aspects. The purpose of this study was to determine the prospects of using the modified (in magnetic activator Wapeco) fly ash from Pątnów Power Plant – as a main component of hydraulic road binding agent for soil stabilisation. In this paper the investigation on compressive strength R_c of soil and binder mixtures with the use of brown coal fly ash is reported. The research was done on seven types of soil with variable uniformity coefficient as well as silt and clay fraction content. The soil was stabilised with the use of hydraulic road binding agents with low strength grade (3 MPa and 9 MPa). In both cases, the components of those binders were cement and activated fly ash. The obtained results proved the soil and binder mixtures very useful for road structures, especially in earth works.

KEYWORDS: fly ash, hydraulic binding agents, soil and binder mixtures, soil stabilisation.

¹⁾ Wapeco Sp. z o.o., Zakład Geotechniki, Warszawa; m.cwiakala@wapeco.eu (✉)

²⁾ Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, Kraków

³⁾ Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa; ckraszewski@ibdim.edu.pl

⁴⁾ Wapeco Sp. z o.o., Zakład Geotechniki, Warszawa; a.widuch@wapeco.eu

1. WPROWADZENIE

Stabilizacja gruntów, czyli ich wzmacnianie i utrwalanie dla celów budowlanych [1], jest technologią powszechnie stosowaną w celu poprawy właściwości mechanicznych i geotechnicznych gruntów słabych, tzn. trudnych do wykorzystania w budownictwie drogowym [2]. Obecnie, dzięki nowym rozwiązaniom technologicznym, większość miejscowych gruntów, materiałów odpadowych i z recyklingu wykorzystywana jest w budownictwie inżynierskim. Stosowane technologie stwarzają bogate możliwości wzmacniania i ulepszania podłoża słabych, a tym samym wykorzystywania miejscowego gruntu oraz materiałów, np.: popioły lotne, żużle, odpady kopalniane i hutnicze [3 - 5].

Materiały odpadowe z przemysłu nazywane są ogólnie produktami ubocznymi, np. odpady ze spalania węgla (popioły lotne, żużle) nazywa się ubocznymi produktami spalania (UPS). Popiół lotny ze spalania węgla brunatnego z uwagi na swoje właściwości fizykochemiczne, jest jednym z materiałów wykorzystywanych do wzmacniania i ulepszania gruntów. Jest on ubocznym produktem spalania, który już znalazł szerokie zastosowanie w drogownictwie [3 - 7].

Popioły lotne z węgla kamiennego i brunatnego są tańszymi substytutami materiałów naturalnych do budowy konstrukcji drogowych [2], [5], [8], [9] w tym do:

- wzmacniania i ulepszania gruntów pod nawierzchnie drogowe (stabilizacja gruntów),
- zastępowania kruszyw naturalnych w podbudowach drogowych (mieszanki związane hydraulicznie w podłożu i w podbudowach),
- wytwarzania betonu cementowego i asfaltowego stosowanego w warstwach nawierzchni.

Celem badań jest określenie możliwości wykorzystania aktywowanych popiołów lotnych z węgla brunatnego jako składnika hydraulicznego spoiwa drogowego do ulepszenia i wzmacniania podłoża gruntowego. Od dłuższego czasu prowadzone są badania nad aktywacją popiołu lotnego ze spalania węgla brunatnego, aby poprawić jego właściwości fizyko-chemiczne, a w szczególności hydrauliczno-pucolanowe. Popioły lotne o większej powierzchni aktywnej i lepszych właściwościach hydrauliczno-pucolanowych uzyskuje się dzięki np. zastosowaniu aktywatora magnetycznego (Rys. 1).

Użycie aktywatora elektromagnetycznego w celu domięlenia popiołów lotnych wpływa na uzyskanie drobniejszego

1. INTRODUCTION

Soil stabilisation, i.e. strengthening and protection of soil as required for the planned construction [1] is commonly used to improve the mechanical and geotechnical properties of soil classified as weak, that are difficult to be used in road engineering [2]. Using current technologies it is possible to make most kinds of native soil, waste and recycled materials suitable for use in construction. These technologies offer a wide selection of soil strengthening and modification options and in this way enable use of native soil and various waste materials, such as fly ash, slag, mining and steel mill wastes [3 - 5].

Such industrial waste is generally called by-product, e.g. waste materials from coal combustion (fly and bottom ash) are called coal combustion products (CCP). The materials used in soil strengthening and modification must have adequate physical and chemical properties and lignite fly ash is an example of such materials. It is one of combustion products, which has already found a wide range of application in road construction [3 - 7].

Coal and lignite fly ash are used in road construction as cheaper substitutes of natural materials [2], [5], [8], [9] for the range of application including:

- strengthening and modification of road subgrades (soil stabilisation),
- preparation of mixtures for production of the lower courses of pavement (hydraulically bound mixtures for subgrade and base layers) – as a substitute to natural aggregates,
- production of Portland cement and asphalt concrete mixes for production of the upper courses of pavement.

The objective of the investigation is to check the suitability of activated lignite fly ash as an ingredient of binders used for modification and strengthening of road subgrades. The problem of activating lignite fly ash to improve its physical and chemical properties, including in particular hydraulic and pozzolanic properties, has been investigated by the authors for a long time. One of the methods to increase the active surface and improve hydraulic and pozzolanic properties of fly ash is its processing with the use of electromagnetic mill (Fig. 1).

Fly ash grinding in electromagnetic mill produces a fine, highly reactive material [10]. Increase of reactivity results from acceleration of pozzolanic reaction due to greater specific surface and accelerated reaction with activators [3], [11]. Such activation process changes the physical and

produktu końcowego o dużej reaktywności [10]. Domielenie popiołów powoduje wzrost ich aktywności, wynikający z przyspieszenia reakcji pucolanowej na skutek zwiększenia powierzchni właściwej i tempa reakcji z aktywatorami [3], [11]. W procesie aktywacji popiołów lotnych przeprowadzonym według tej technologii następuje zmiana właściwości fizyko-chemicznych popiołów [12]. Zmodyfikowane popioły lotne w mieszankach grunto-spoiwowych powodują większą dynamikę narastania wytrzymałości tych mieszanek. Uzyskane cechy użytkowe mieszanek grunto-spoiwowych (z udziałem zmodyfikowanych popiołów lotnych z węgla brunatnego) wpływają na wysoki poziom wytrzymałości i trwałość konstrukcji nawierzchni drogowej.

Rys. 1. Aktywator magnetyczny
Fig. 1. Magnetic activator

Technologia aktywacji popiołów lotnych, stanowiących główny składnik hydraulicznych spoiw drogowych, znalazła zastosowanie przy stabilizacji gruntów w budownictwie drogowym [8], [13], [14]. Zastosowanie aktywowanego popiołu lotnego w hydraulicznych spoiwach drogowych wpływa korzystnie na poprawę urabialności stabilizowanych gruntów, zwłaszcza przewilgoconych gruntów spoistych. Przede wszystkim ze względu na dużą chłonność wody wynikającą z zastosowania aktywowanych popiołów lotnych. Daje to możliwość wykorzystania spoiw na bazie popiołów lotnych do ulepszania i wzmacniania gruntów spoistych, o ograniczonej przydatności w budownictwie komunikacyjnym, np. ze względu na nadmierną wilgotność i plastyczność oraz niską nośność. Ulepszanie oraz stabilizacja gruntów z udziałem spoiw hydraulicznych na bazie popiołów lotnych z węgla brunatnego Elektrowni Pątnów powoduje poprawę właściwości geotechnicznych gruntów, a mianowicie: osuszenie przewilgoconych gruntów, zmniejszenie stopnia plastyczności, poprawę zagęszczalności, zwiększenie nośności oraz, przy podwyższonych wymaganiach konstrukcyjnych drogi, uzyskanie właściwej wytrzymałości na ścislenie R_c , odpowiedniej dla poszczególnych warstw konstrukcji drogowej. Użycie hydraulicznych spoiw drogowych na bazie aktywowanych popiołów lotnych, przygotowanych zgodnie z omawianą technologią, umożliwia wykorzystanie gruntów o ograniczonej przydatności do budowy dróg według [15].

chemical properties of ash [12]. Modified fly ash accelerates the development of strength in soil mixtures. The performance parameters of soil mixtures obtained in this way (i.e. with the use of modified lignite fly ash) have a positive effect on the strength and lifetime of road pavements.



Fly ash, which has been activated in this way, is the main ingredient of hydraulic road binders used for soil stabilisation in road building applications [8], [13], [14]. In hydraulic road binders activated fly ash improves the workability of the soil stabilisation mixture, especially when mixed with cohesive soil with high moisture content. This is primarily owing to the high water absorbing capacity of activated fly ash. Such properties make binders based on fly ash suitable for modification and strengthening of cohesive soils, largely unsuitable for construction of transport infrastructure facilities due to their intrinsic properties, including high moisture content, plasticity and low bearing capacity. Hydraulic binders produced with lignite fly ash from the Pątnów Power Plant improve the geotechnical properties of soil, namely reduce excessive moisture content and excessive plasticity, increase the bearing capacity and, where required, allow for obtaining the specified compressive strength R_c for the respective pavement courses. Fly ash activated with above mentioned technology is used in production of hydraulic road binders intended for treatment of

Celem niniejszej pracy było sprawdzenie przydatności hydraulicznych spoiw drogowych, na bazie popiołów lotnych z węgla brunatnego do stabilizacji i ulepszenia gruntów.

2. WŁAŚCIWOŚCI POPIOŁÓW

2.1. WŁAŚCIWOŚCI POPIOŁU Z ELEKTROWNI PĄTNÓW

O jakości popiołów lotnych i ich właściwościach według [3], [4] decydują głównie:

- rodzaj węgla,
- skład chemiczny i mineralogiczny przerostów skały płonnej, zawartych w węglu,
- wartość opałowa i wilgotność węgla,
- rodzaj i stan urządzeń rozdrabniających węgiel,
- konstrukcja paleniska i warunki jego eksploatacji,
- rodzaj i sprawność urządzeń wychwytyjących popiół ze strumienia spalin,
- sposób odprowadzenia popiołów i warunki ich przechowania.

Podstawowymi składnikami chemicznymi popiołu lotnego z Elektrowni Pątnów według [16], [17] są: krzemiany w przeliczeniu na SiO_2 , gliniany w przeliczeniu na Al_2O_3 , tlenek wapnia CaO i siarczany w przeliczeniu na SO_3 (Rys. 2).

soils considered largely unsuitable for road construction [15].

The purpose of this research is to check suitability of hydraulic road binders produced with lignite fly ash for stabilisation and modification of soil.

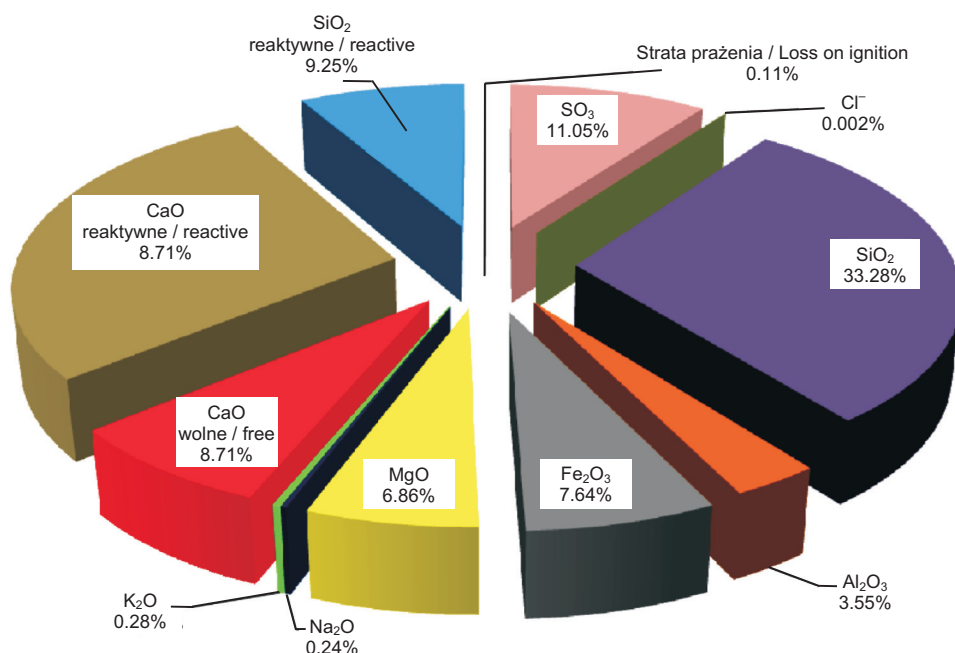
2. FLY ASH PROPERTIES

2.1. PROPERTIES OF FLY ASH FROM PĄTNÓW POWER PLANT

The quality and properties of fly ash as [3], [4] depend primarily on:

- type of coal,
- chemical and mineralogical composition of mineral streaks in coal,
- net calorific value and moisture content of coal,
- type and condition of coal crushing equipment,
- combustion chamber design and operational parameters,
- type and efficiency of fly ash capturing system from a stream of flue gas,
- fly ash transport method and storage conditions.

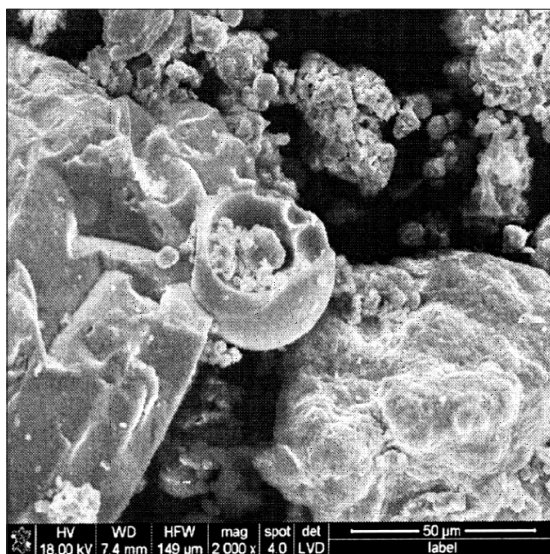
According to [16], [17] the primary chemical components of fly ash from the Pątnów Power Plant are: silicates SiO_2 , aluminates Al_2O_3 , calcium oxide CaO and sulphates SO_3 (Fig. 2).



Rys. 2. Skład chemiczny popiołu lotnego z Elektrowni Pątnów
Fig. 2. Chemical composition of the fly ash from Pątnów Power Plant

Popioły lotne o powyższym składzie chemicznym charakteryzują się właściwościami hydraulicznymi i pucolanowymi. Pucolany to materiały krzemianowe lub krzemianowo-glinowe o dużej powierzchni właściwej, występujące w formie popiołów lotnych, pyłów, drobnych okruchów, ale także w formie zwartej (porowatej) lub jako skały osadowe, posiadające właściwości wiążące w obecności aktywatora. Rozdrobnione popioły lotne, jako składnik spoiw drogowych, w obecności wody reagują ze związkami wapna (zawartymi w klinkierze cementowym), tworząc nierozpuszczalne związki stałe.

Istotnym parametrem wszystkich rodzajów popiołów lotnych jest ich skład granulometryczny, ponieważ poszczególne frakcje ziarnowe mają różny skład mineralny [3], [8]. Technologia spalania i rodzaj użytego paliwa determinują morfologię i rozmiar ziaren popiołu (Rys. 3 i 4).



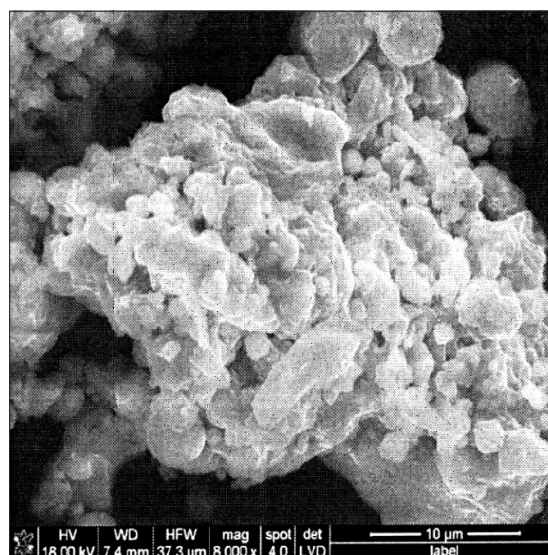
Rys. 3. Morfologia cząstek popiołu lotnego z Elektrowni Pątnów [8]

Fig. 3. Morphology of fly ash molecules from Państwowa power station [8]

Na podstawie zdjęć wykonanych na skaningowym mikroskopie elektronowym (Rys. 3 i 4) można stwierdzić, że badany popiół lotny jest substancją o bardzo różnorodnej granulacji. W przypadku spalania konwencjonalnego w kotłach pyłowych najczęściej powstają kuliste cząstki popiołów. Ziarna mogą być częściowo puste wewnątrz, co dotyczy głównie grubszych frakcji popiołów (Rys. 3). Frakcje drobniejsze składają się z kulistych zwartych ziaren, a także

Fly ash with the above described chemical composition has hydraulic and pozzolanic properties. Pozzolans are siliceous or siliceous/aluminous materials featuring high specific surface having the form of fly ash, fumes, fine particles, solid (porous) material or sedimentary rock having binding properties in the presence of activating agent. Ground fly ash used as an ingredient of road binders in the presence of water reacts with lime compounds (present in cement clinker) to produce insoluble solids.

The particle size distribution is an important parameter for any type of fly ash, since each fraction has a different mineral composition [3], [8]. The morphology and size of fly ash particles depend both on the burning process and on the type of fuel burnt (Fig. 3 and Fig. 4).



Rys. 4. Aglomerat cząstek popiołu lotnego z Elektrowni Pątnów [8]

Fig. 4. Agglomerate of fly ash molecules from Państwowa power station [8]

On the SEM images (Fig. 3 and Fig. 4) we can see clearly varying size of fly ash particles. Conventional burning of pulverised coal in combustion chambers produces mostly spherical particles. The ash particles, especially larger ones, may include internal voids (Fig. 3). Finer fractions consist of compact spherical grains accompanied with irregular particles (Fig. 4). It is therefore concluded that both the size and type of ash particles depend primarily on the coal fineness and on the conditions of burning [3].

z okruchów o nieregularnych kształtach (Rys. 4). Można zatem stwierdzić, że wielkość i rodzaj ziaren popiołu zależy głównie od stopnia rozdrobnienia węgla i warunków jego spalania [3].

Kinetyka reakcji pucolanowej w znaczącym stopniu wiąże się ze stopniem rozdrobnienia popiołu lotnego. W wyniku obróbki mechanicznej popiołu lotnego (rozdrobnienie - aktywowanie) uzyskuje się zwiększenie jego powierzchni właściwej, prowadzące do większej reaktywności, czyli efektywności pucolanowej [8], [11]. Innymi słowy, przemiał popiołu lotnego powoduje zwiększenie pucolanowości (przyspiesza postęp reakcji pucolanowej). Dzięki temu popiół lotny jest bardziej aktywny. Skutkiem zwiększonej reaktywności krzemionki jest szybki przyrost wytrzymałości w początkowej fazie procesu twardnienia, ale także osiągnięcie wysokiej docelowej wytrzymałości spoiwa hydraulicznego [8], [10], [12]. To z kolei prowadzi do uzyskania lepszych parametrów wytrzymałościowych stwardniałego kompozytu [10], co w praktyce wyraża się poprzez zwiększenie tempa przyrostu wytrzymałości spoiw hydraulicznych w porównaniu do spoiw z popiołem nierozdrobnionym (nieaktywowanym).

2.2. KLASYFIKACJA POPIOŁÓW LOTNYCH ZASTOSOWANYCH W BADANIACH

Dotychczas, głównym kryterium klasyfikacji popiołów lotnych był rodzaj spalanego węgla [3]. Na Rys. 5 przedstawiono lokalizacje elektrowni w Polsce z podziałem na rodzaj używanego węgla.

Zgodnie z polską normą PN-S-96035 [18] podstawowy podział popiołów lotnych jest następujący:

- popioły z węgla kamiennego PK,
- popioły z węgla brunatnego PB.

Dodatkowo według PN-S-96035 występuje podział na trzy odmiany popiołów:

- PK odmiana a – popiół lotny, jako dodatek hydrauliczny do materiałów wiążących,
- PK odmiana b – popiół lotny, jako materiał doziarniający do materiałów mineralnych o słabszym uziarnieniu,
- PB odmiana c – popiół lotny, jako samodzielny materiał wiążący.

Fineness of fly ash is in turn highly relevant to the kinetics of the pozzolanic reaction. The process of mechanical activation (grinding) increases the specific surface, thus improving reactivity i.e. pozzolanic effect [8], [11]. Putting it in other words: grinding of fly ash increases pozzolanic properties (increases the rate of pozzolanic reaction). This is what we mean by fly ash activation. Increased reactivity of silica increases the rate of strength development in the initial phase of hardening and produces greater final strength of the hydraulic binder [8], [10], [12]. This in turn improves the performance of hardened composite material [10], as practically demonstrated by increased rate of strength development of hydraulic binder in comparison to binders containing raw (not activated) fly ash.

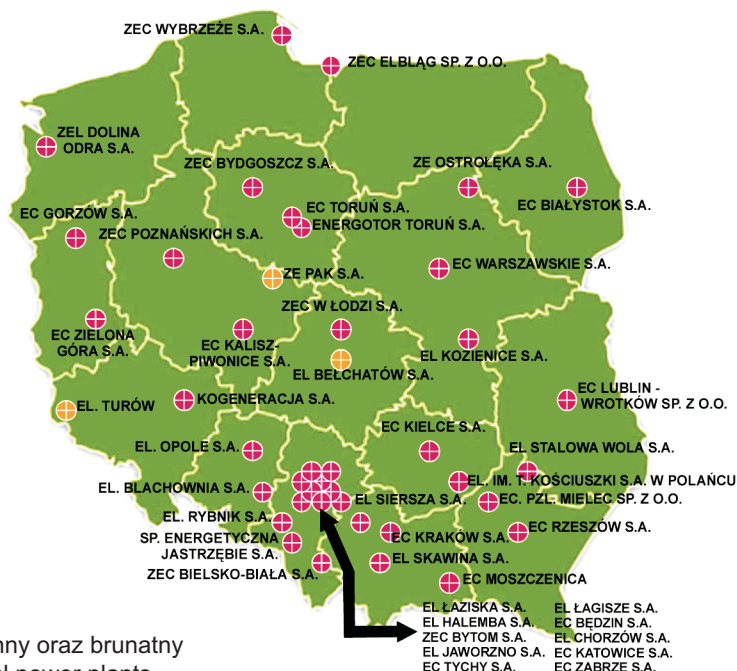
2.2. CLASSIFICATION OF ANALYSED FLY ASH TYPES

So far classification was based mainly on the type of burnt coal [3]. Fig. 5 shows the locations of coal-fired power plants in Poland and the types of coal they burn.

The Polish Standard PN-S-96035 [18] sets out the following classification:

- coal fly ash PK,
- lignite fly ash PB.

- ⊕ elektrownie na węgiel kamienny / hard coal power plants
- ⊙ elektrownie na węgiel brunatny / brown coal power plants



Rys. 5. Lokalizacja elektrowni na węgiel kamienny oraz brunatny
Fig. 5. Location of the hard coal and brown coal power plants

Dla każdej odmiany norma podaje wymagania odnośnie składu chemicznego – zawartości charakterystycznych związków chemicznych (SiO_2 , CaO , SO_3). Należy zwrócić uwagę, że norma PN-S-96035 dotyczy jedynie popiołów ze spalania konwencjonalnego w kotłach pyłowych, nie obejmując nowej generacji popiołów z technologii odsiarczania spalin.

Wprowadzona w 2005 roku norma PN EN 14227-4 [19] zawiera zbliżoną do PN-S-96035, lecz mniej złożoną klasyfikację. Nie wyszczególnia rodzaju spalanego węgla ani nie technologii spalania węgla, a popioły dzieli na 2 rodzaje:

- popioły krzemionkowe,
- popioły wapienne.

Zakwalifikowanie popiołu lotnego do danej grupy według PN EN 14227-4 następuje na podstawie oznaczenia składu chemicznego (SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , SO_3 , Fe_2O_3). Norma obejmuje także popioły uzyskane w technologii odsiarczania spalin.

Przedmiotem badań przedstawionych w niniejszej pracy były popioły lotne uzyskane podczas spalania węgla brunatnego w ZE „PAK” S.A. Elektrowni Pątnów z Okręgu Konińskiego (Rys. 2) w kotłach pyłowych. Stanowią one mieszaninę substancji mineralnych, pozostałych po prawie całkowitym spaleniu sproszkowanego węgla brunatnego w paleniskach kotłów energetycznych. Substancje te przeszły już przekształcenia, jakie zachodzą w składnikach mineralnych węgla pod wpływem wysokiej temperatury i zostały wytracone mechanicznie lub elektrostatycznie ze strumienia spalin.

Na podstawie składu chemicznego tlenków (rys. 2) popioły będące przedmiotem badań zakwalifikowano jako:

- popioły lotne rodzaju PB i odmiany c według PN-S-96035,
- popioły lotne wapienne według PN EN 14227-4.

Popiół lotny stanowił główny składnik spoiwa hydraulicznego zastosowanego do stabilizacji gruntów.

3. METODY BADAŃ

Popioły lotne z węgla brunatnego Elektrowni Pątnów poddano obróbce mechanicznej z wykorzystaniem innowacyjnej technologii przy użyciu aktywatora magnetycznego (rys. 1). W aktywatorze tym, na skutek drgań elementów wypełnienia ferromagnetycznego zachodzi proces kruszenia ziaren popiołowych, co skutkuje zwiększeniem ich

Moreover, PN-S-96035 sub-divides the above-mentioned types into the following varieties:

- PK a – fly ash used as a hydraulic binding ingredient of cementing materials (binders),
- PK b – fly ash used to improve grading of poorly graded mineral materials,
- PB c – fly ash used as a cementing material on its own.

For each variety the above-mentioned standard specifies the chemical composition requirements by giving the contents of typical substances (SiO_2 , CaO , SO_3). It must be noted that the standard PN-S-96035 refers solely to fly ash produced during conventional burning in dust furnaces and, as such, it does not refer to the new generation of fly ash generated in the FGD process.

A similar, yet less specific classification is provided in EN 14227-4 [19], a new standard introduced in 2005 which divides fly ashes into the following two types:

- siliceous fly ash,
- calcareous fly ash.

Classification according to the system set out in EN 14227-4 is based on the chemical composition (SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , SO_3 , Fe_2O_3) determined by laboratory testing. The standard covers also fly ash generated in the FGD process.

The tests described in this report were carried out on fly ash produced during burning of lignite dust in Pątnów Power Plant located near Konin in Poland (Fig. 2), operated by the power company ZE PAK S.A. The material is composed of minerals which remain after almost complete burning of pulverised lignite in fire boxes of power generating boilers. These substances have already undergone processes which occur in minerals normally present in coal exposed to high temperatures and have been captured from the stream of flue gas by mechanical or electrostatic precipitation.

The chemical composition of oxides (Fig. 2) was established in the tests and on this basis the material was classified as:

- fly ash type PB c – according to PN-S-96035
- calcareous fly ash – according to EN 14227-4.

Fly ash was the main ingredient of hydraulic binder used in soil stabilisation.

powierzchni właściwej, a tym samym – polepszeniem właściwości reaktywnych [10], [12]. Potwierdzają to wyniki badań metodą Blaine’a powierzchni właściwej popiołu po czasach mielenia 10, 15, 30 sekund i przed mieleniem. Wynoszą one odpowiednio: 3120 cm²/g, 3626 cm²/g, 3969 cm²/g i 2450 cm²/g według [10]. Otrzymany w ten sposób aktywowany popiół lotny z węgla brunatnego charakteryzuje się znacznie drobniejszym uziarnieniem w stosunku do popiołu „niemielonego”, uzyskanego w bardzo w krótkim czasie, a cały proces temu towarzyszący cechuje się wysoką wydajnością energetyczną i dużą efektywnością.

Popioły lotne z węgla brunatnego, charakteryzujące się zmiennym składem chemicznym, mają ograniczoną przydatność do stabilizacji gruntów, gdy wymagana jest trwała wytrzymałość na ściskanie. Ograniczenia dotyczą dużej zawartości związków siarki SO₃ wywołujących zjawisko pęcznienia. W związku z powyższym mogą stanowić jedynie dodatki do spoiw cementowych, przy jednoczesnym założeniu minimalizacji niepożądanych zjawisk fizyko-chemicznych (pęcznienia i skurczu).. Spoiwa należy projektować tak, aby popiół stanowił główny składnik spoiwa zarówno pod względem objętościowym, jak i masowym. Zadaniem projektanta (bądź technologa) powinien być optymalny dobór składników spoiwa hydraulicznego, w taki sposób, aby uwzględniać, a przede wszystkim minimalizować niekorzystne cechy występujące podczas twardnienia spoiwa hydraulicznego, jakimi są np. skurcz i pęcznienie.

Jednym z rodzajów spoiw hydraulicznych są spoiwa drogowe o niskich klasach wytrzymałościowych, zawierających się w obszarach wytrzymałości na ściskanie od 3 do 12 MPa. Stosowane są one głównie do ulepszania gruntów w budownictwie drogowym. Do przeprowadzenia badań stabilizacji gruntów użyto dwóch rodzajów hydraulicznego spoiwa drogowego (o klasie wytrzymałości 3 MPa oraz 9 MPa) w proporcjach od 2% do 10% w stosunku do suchej masy gruntu. Badania przeprowadzono na siedmiu typowych rodzajach gruntu naturalnego (Rys. 6). Badania przeprowadzono na charakterystycznych gruntach (miejscowych - lokalnych), różniących się między sobą wskaźnikiem różnoziarnistości, zawartością frakcji żwirowej, pyłowej oraz ilowej. Były to: dwa rodzaje piasku średniego, dwa rodzaje pospółki gliniastej, glina, piasek gliniasty oraz pospółka.

Podstawowymi parametrami, charakteryzującymi właściwości mechaniczne hydraulicznych spoiw drogowych są: wytrzymałość na ściskanie R_c [MPa] i wytrzymałość na

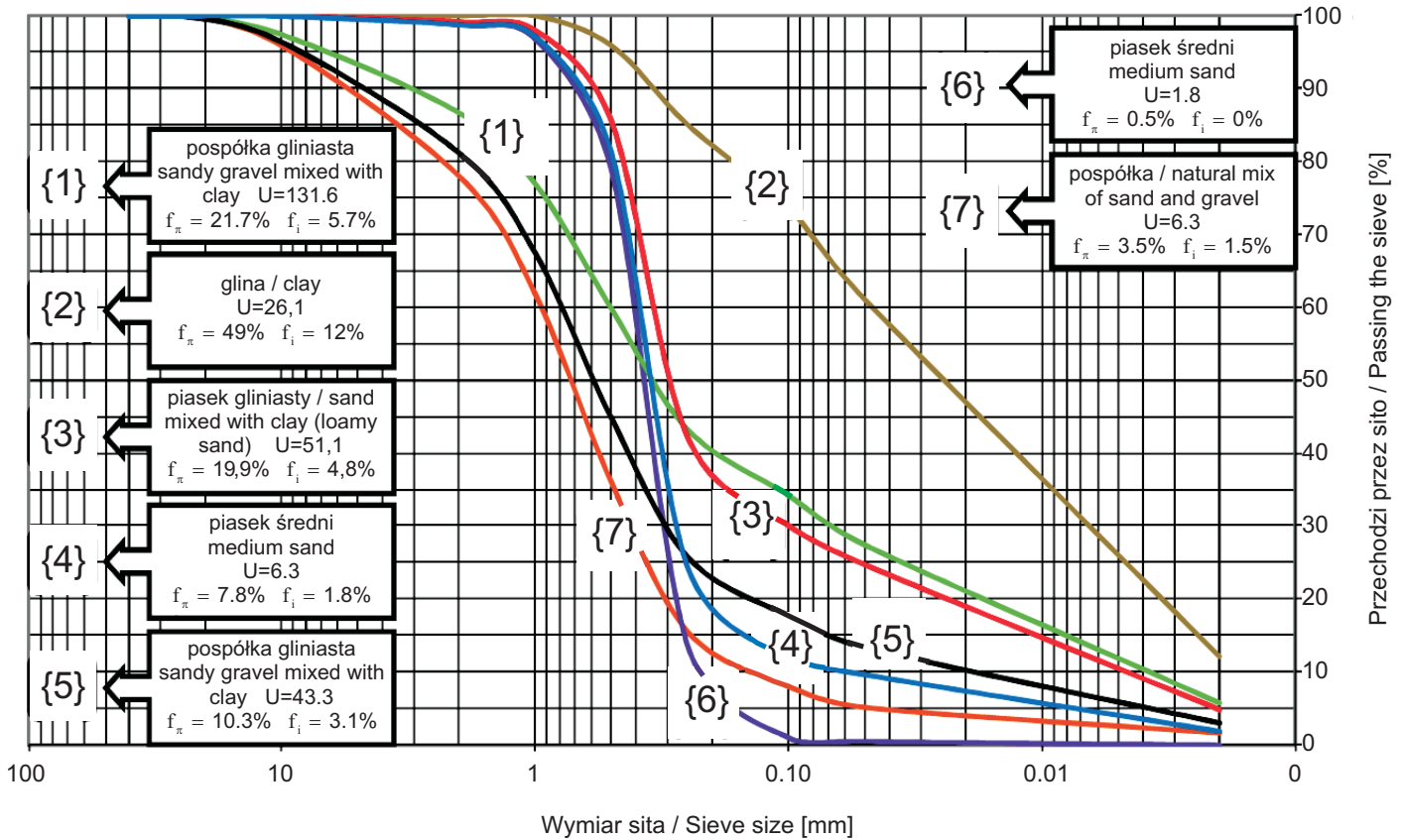
3. TESTING – ASSUMPTIONS AND METHODOLOGY

The tests were carried out on lignite fly ash obtained from Państwowy power plant, activated mechanically with the earlier mentioned innovative magnetic activator (Fig. 1). In this device ash particles are crushed by vibrating ferromagnetic fill to increase the specific surface and thus improve the reactive properties [10], [12]. This improvement has been confirmed by Blaine values determined after 10, 15 and 30 seconds of milling and before the start of the milling process. The respective values were: 3.120 cm²/g, 3.626 cm²/g, 3.969 cm²/g and 2.450 cm²/g as per [10]. The process results in a significant reduction of particle size, as compared to the raw material, ensuring high efficiency of grinding in a short time and at low input of energy.

The chemical composition of lignite fly ash varies and, as a result, this material has a limited use in soil stabilisation where stable compressive strength must be ensured. These limitations are related to a high content of SO₃ which causes swelling. Hence, it may be used only as an additive to cementing mixtures, subject to implementation of measures mitigating undesirable physical phenomena (swelling and shrinkage in hydraulic binder). This notwithstanding, in appropriately designed mixture fly ash should still be the main ingredient, both by volume and by weight. Therefore, it is the responsibility of the designer (or production engineer) to take into account and mitigate, by adjusting the proportions of ingredients, the undesired phenomena which occur in the process of hardening of hydraulic binder, such as shrinkage and swelling.

One type of hydraulic binders are low-strength road binders with compressive strength in the range between 3 MPa and 12 MPa. They are used primarily for improvement of soil properties in road building applications. Two types of hydraulic road binders (3 MPa and 9 MPa strength class) were used to test the efficiency of soil stabilisation, applied at proportions of 2% and 10% in relation to the dry soil weight. The tests were carried out on seven typical natural soils (Fig. 6). These were typical local (native) soil types having different uniformity coefficients and contents of gravel, silt and clay fractions. The types of soil used in the testing were: two types of medium sand, two types of sandy gravel mixed with clay, clay, sand mixed with clay (loamy sand) and natural mix of sand and gravel.

The primary parameters which are used to define the mechanical properties of hydraulic road binders are: compressive strength R_c [MPa] and bending strength R_f [MPa]



Rys. 6. Wykres uziarnienia gruntów naturalnych
Fig. 6. Natural soil's granulation diagram

zginanie R_f [MPa] związanej mieszanki. Składnikami badanych spoiw były aktywowane popioły lotne i cement portlandzki o następujących składach:

- spoiwo o klasie wytrzymałości 3 MPa – około 90% aktywowanego popiołu lotnego z węgla brunatnego Elektrowni Pątnów oraz 10% cementu CEM I 42,5R (rys. 7),
- spoiwo o klasie wytrzymałości 9 MPa – około 80% aktywowanego popiołu lotnego z węgla brunatnego Elektrowni Pątnów oraz 20% cementu CEM I 42,5R (rys. 7).

Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie R_c oraz wytrzymałości na zginanie R_f badanego spoiwa hydraulicznego w zależności od ilości zastosowanego cementu w tym spoiwie przedstawiono na Rys. 7 i 8. Badania przeprowadzono na próbkach $4 \times 4 \times 16$ cm zaprawy wzorcowej po 28 dniach twardnienia według PN-EN 196-1 [20].

tested upon hardening. The analysed binders included activated fly ash and Portland cement mixed at the following proportions:

- binder with 3 MPa strength class – ca. 90% of activated lignite fly ash from Pątnów Power Plant and 10% of Portland cement CEM I 42.5R (Fig. 7),
- binder with 9 MPa strength class – ca. 80% of activated lignite fly ash from Pątnów Power Plant and 20% of Portland cement CEM I 42.5R (Fig. 7).

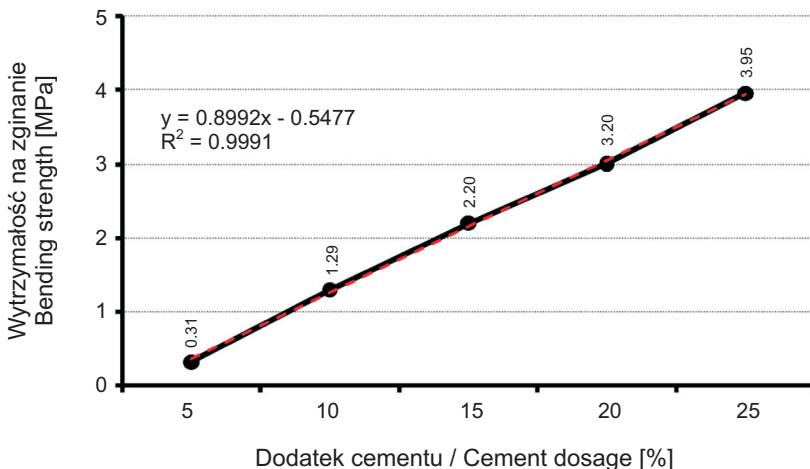
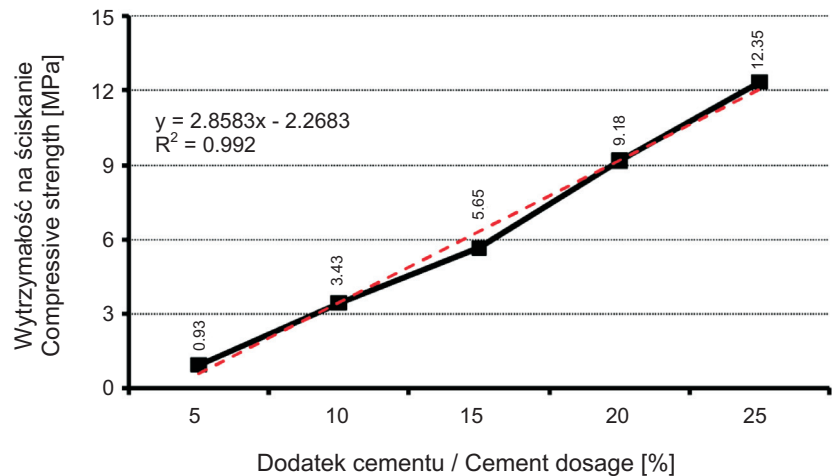
The values of compressive strength R_c and bending strength R_f of the tested hydraulic binder in relation to the proportion of cement added to the mix are given in Fig. 7 and Fig. 8. The tests were carried out on $4 \times 4 \times 16$ cm specimens prepared from reference mortar and cured for 28 days as per EN 196-1 [20].

Mieszanki gruntowo-spoiwowe zostały przebadane pod kątem wytrzymałości na ściskanie R_c . Wytrzymałość na ściskanie jest nie tylko zasadniczą właściwością mechaniczną mieszanek gruntowo-spoiwowych w drogownictwie, lecz stanowi również podstawowe kryterium oceny przydatności do zastosowania tych mieszanek w konstrukcjach nawierzchni drogowej. Badania mieszanek gruntowo-spoiwowych polegały na określeniu wytrzymałości na ściskanie po 42, 90 oraz 180 dniach twardnienia. Do wykonania mieszanek gruntowo-spoiwowych użyto 2, 4, 6, 8 i 10% dodatku spoiwa hydraulicznego (o dwóch różnych klasach wytrzymałościowych: 3 MPa i 9 MPa). Gotową mieszankę do badań wytrzymałości na ściskanie (o wilgotności optymalnej) wsypywano do formy walcowej (o wysokości i średnicy wynoszącej 8 cm) i zagęszczano dynamicznie energią normalną Proctora zgodnie z normą PN-B-04481 [21].

In the present research the soil mixtures were tested for compressive strength R_c . Compressive strength is not only the primary mechanical property of soil mixtures used in road building but also the primary criterion for evaluating their suitability for the respective pavement courses. The testing included determination of compressive strength and its further development after 42, 90 and 180 days of hardening. The mixtures included 2, 4, 6, 8 and 10% of hydraulic binders of 3 MPa and 9 MPa strength class. The mixture prepared for compressive strength testing (with optimum moisture content) was poured into a cylindrical form (8 cm dia. x 8 cm high) and compacted dynamically with normal Proctor compactive effort as per PN-B-04481 [21].

Rys. 7. Wytrzymałość na ściskanie spoiwa hydraulicznego z udziałem aktywowanych popiołów lotnych z węgla brunatnego Elektrowni Pątnów w zależności od ilości zastosowanego cementu

Fig. 7. Compressive strength of hydraulic binder based on the activated fly ash from brown coal from Pątnów Power Plant in relation to cement dosage



Rys. 8. Wytrzymałość na zginanie spoiwa hydraulicznego z udziałem aktywowanych popiołów lotnych z węgla brunatnego Elektrowni Pątnów w zależności od ilości zastosowanego cementu

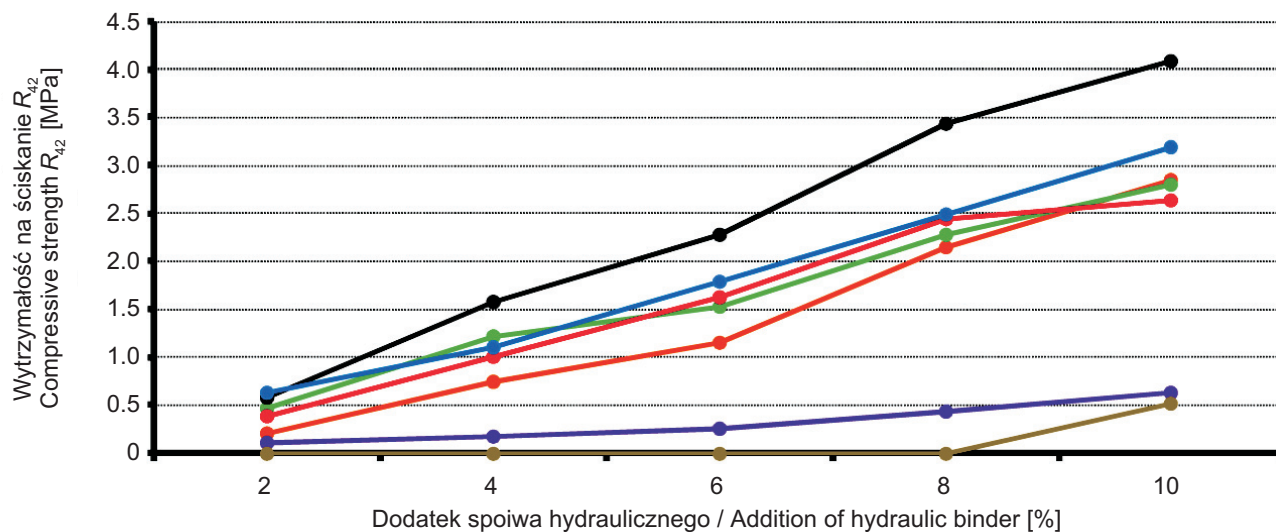
Fig. 8. Bending strength of hydraulic binder based on the activated fly ash from brown coal from Pątnów Power Plant in relation to cement dosage

4. WYNIKI BADAŃ

Wytrzymałość na ściskanie R_c jest podstawowym, a jednocześnie bardzo istotnym parametrem decydującym o cechach użytkowych konstrukcji drogowych, takich jak np. nośność i trwałość. Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie siedmiu rodzajów gruntów, ulepszonych różnymi dodatkami spoiw hydraulicznych (3 MPa i 9 MPa), po 42, 90 i 180 dniach dojrzewania, przedstawiono na wykresach (Rys. 9 - 14).

4. RESULTS OF TESTING

Compressive strength R_c is the primary and a most important parameter defining the performance parameters of pavement or constructions, including bearing capacity and service lifetime. The following charts (Fig. 9 - 14) present the values of compressive strength determined for the seven types of soil treated with binders containing different additives (3 MPa and 9 MPa strength class) after 42, 90 and 180 days of curing.

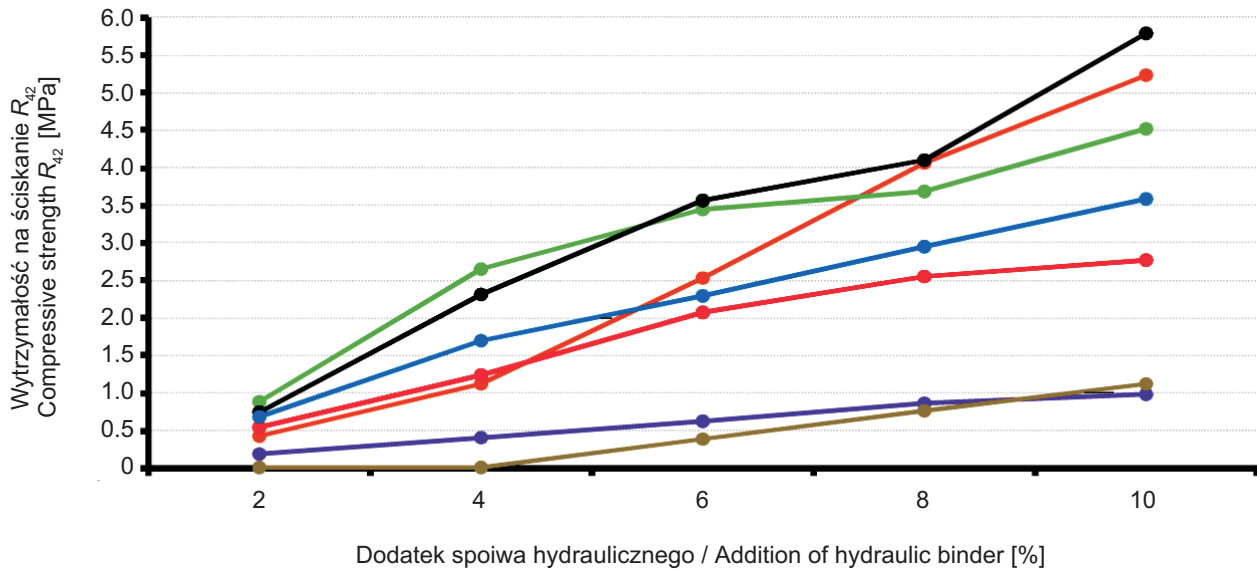


Legenda / Legend:

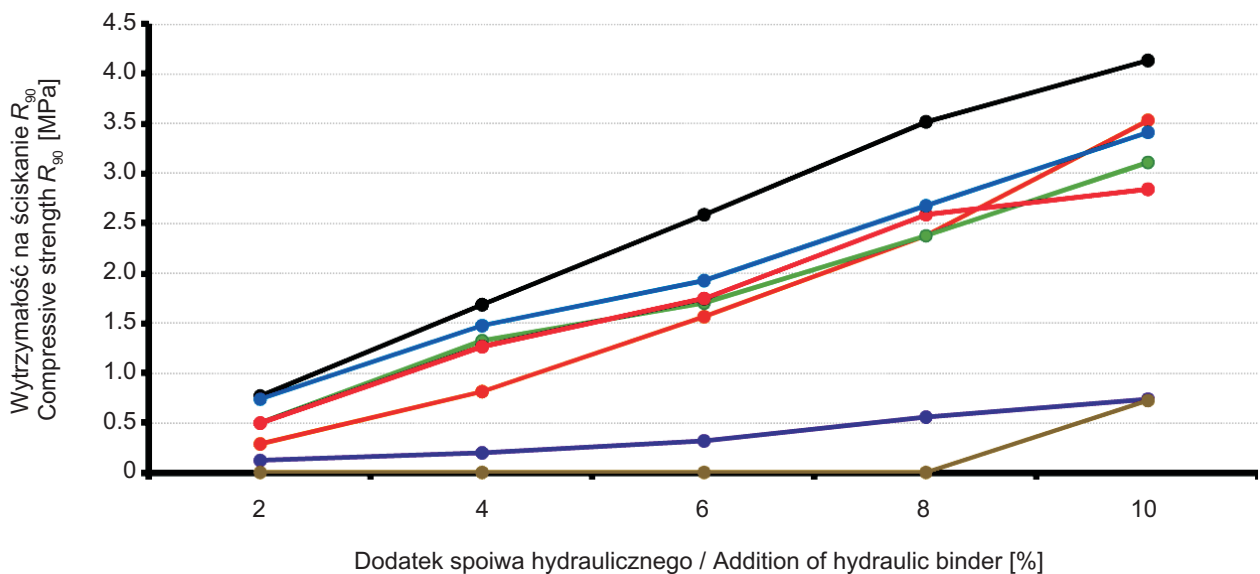
- pospółka gliniasta – zgodnie z {1} na Rys. 6 / sandy gravel mixed with clay – according to {1} in Fig. 6
- glina – zgodnie z {2} na Rys. 6 / clay – according to {2} in Fig. 6
- piasek gliniasty – zgodnie z {3} na Rys. 6 / sand mixed with clay (loamy sand) – according to {3} in Fig. 6
- piasek średni – zgodnie z {4} na Rys. 6 / medium sand – according to {4} in Fig. 6
- pospółka gliniasta – zgodnie z {5} na Rys. 6 / sandy gravel mixed with clay – according to {5} in Fig. 6
- piasek średni – zgodnie z {6} na Rys. 6 / medium sand – according to {6} in Fig. 6
- pospółka – zgodnie z {7} na Rys. 6 / natural mix of sand and gravel – according to {7} in Fig. 6

Rys. 9. Wpływ zawartości spoiwa hydraulicznego na wytrzymałość na ściskanie gruntów stabilizowanych dodatkiem hydraulicznego spoiwa drogowego o klasie wytrzymałości 3 MPa po upływie 42 dni twardnienia

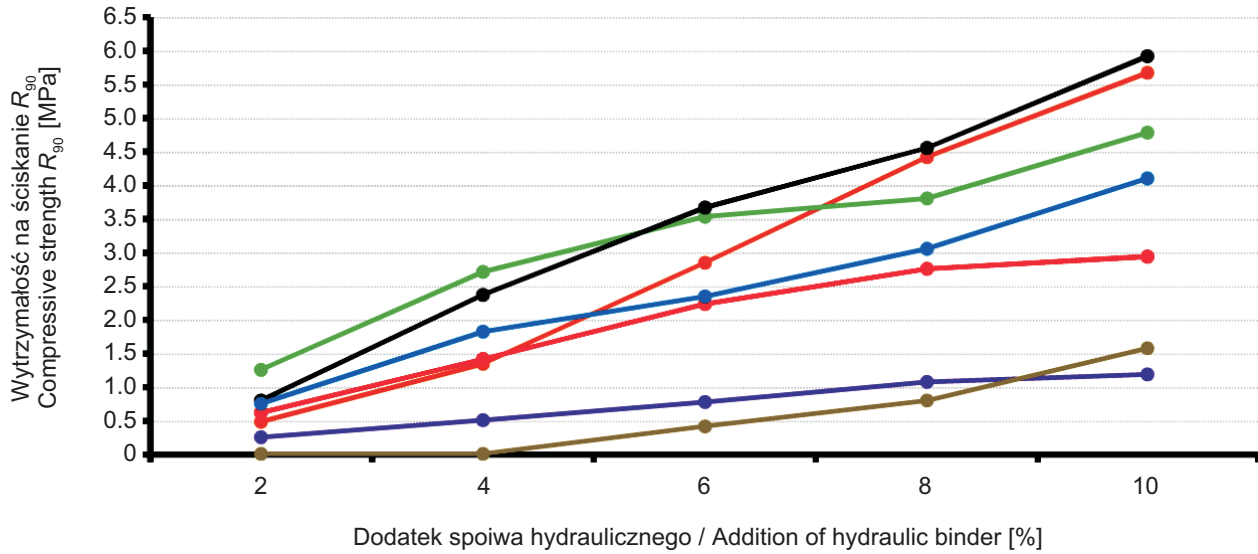
Fig. 9. Influence of hydraulic binder content on compressive strength after 42 days of hardening for the different soils stabilized with an addition of hydraulic binder of the strength class of 3 MPa



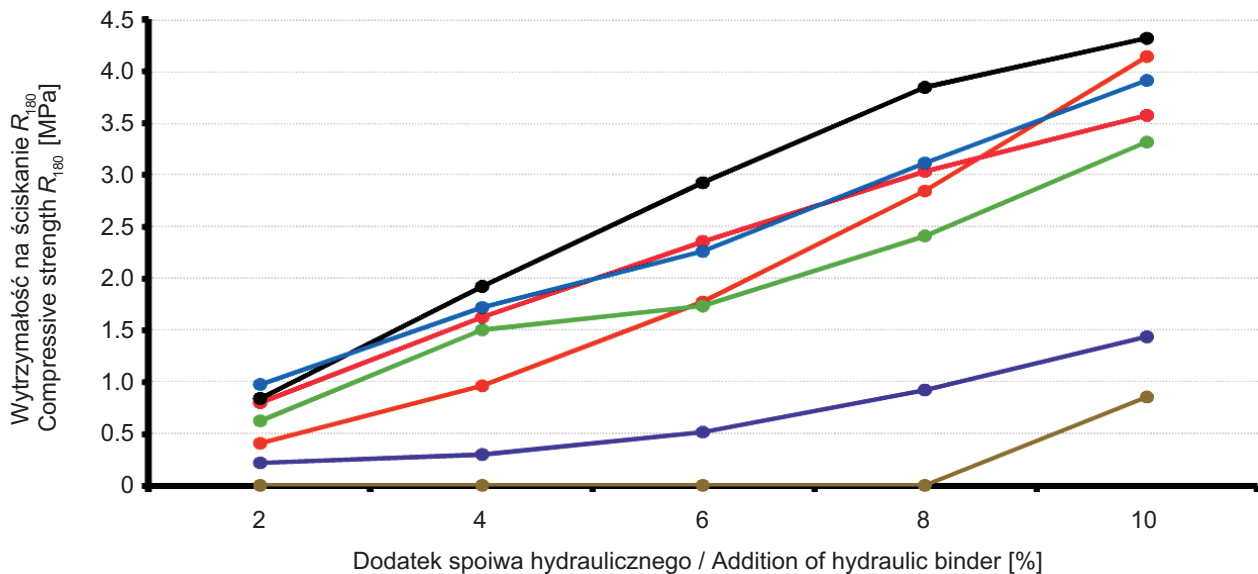
Rys. 10. Wpływ zawartości spoiwa hydraulicznego na wytrzymałość na ściskanie gruntów stabilizowanych dodatkiem hydraulicznego spoiwa drogowego o klasie wytrzymałości 9 MPa po upływie 42 dni twardnienia (legenda według Rys. 9)
 Fig. 10. Influence of hydraulic binder content on compressive strength after 42 days of hardening for the different soils stabilized with an addition of hydraulic binder of the strength class of 9 MPa (legend identical to Fig. 9)



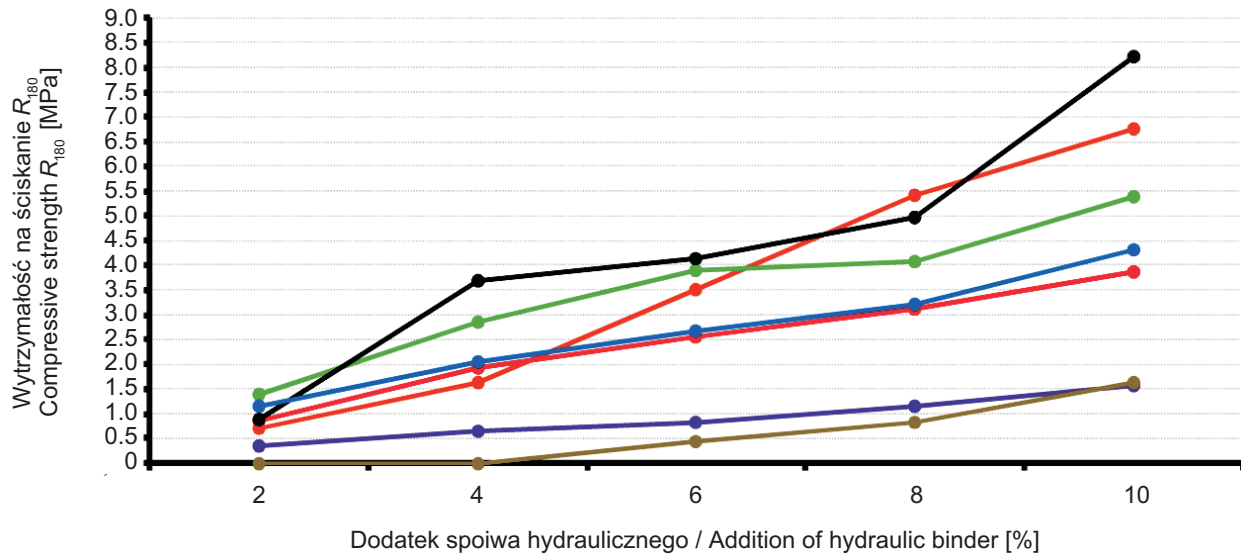
Rys. 11. Wpływ zawartości spoiwa hydraulicznego na wytrzymałość na ściskanie gruntów stabilizowanych dodatkiem hydraulicznego spoiwa drogowego o klasie wytrzymałości 3 MPa po upływie 90 dni twardnienia (legenda według Rys. 9)
 Fig. 11. Influence of hydraulic binder content on compressive strength after 90 days of hardening for the different soils stabilized with an addition of hydraulic binder of the strength class of 3 MPa (legend identical to Fig. 9)



Rys. 12. Wpływ zawartości spoiwa hydraulicznego na wytrzymałość na ściskanie gruntów stabilizowanych dodatkiem hydraulicznego spoiwa drogowego o klasie wytrzymałości 9 MPa po upływie 90 dni twardnienia (legenda według Rys. 9)
 Fig. 12. Influence of hydraulic binder content on compressive strength after 90 days of hardening for the different soils stabilized with an addition of hydraulic binder of the strength class of 9 MPa (legend identical to Fig. 9)



Rys. 13. Wpływ zawartości spoiwa hydraulicznego na wytrzymałość na ściskanie gruntów stabilizowanych dodatkiem hydraulicznego spoiwa drogowego o klasie wytrzymałości 3 MPa po upływie 180 dni twardnienia (legenda według Rys. 9)
 Fig. 13. Influence of hydraulic binder content on compressive strength after 180 days of hardening for the different soils stabilized with an addition of hydraulic binder of the strength class of 3 MPa (legend identical to Fig. 9)



Rys. 14. Wpływ zawartości spoiwa hydraulicznego na wytrzymałość na ściskanie gruntów stabilizowanych dodatkiem hydraulicznego spoiwa drogowego o klasie wytrzymałości 9 MPa po upływie 180 dni twardnienia (legenda według Rys. 9)

Fig. 14. Influence of hydraulic binder content on compressive strength after 180 days of hardening for the different soils stabilized with an addition of hydraulic binder of the strength class of 9 MPa (legend identical to Fig. 9)

Zbadane próbki mieszanek gruntowo-spoiwowych cechują się zróżnicowaną wytrzymałością na ściskanie $R_c = 0,0 \div 8,2$ MPa (Rys. 9 - 14), uzależnioną głównie od zastosowanej klasy spoiwa, procentowego dodatku spoiwa, rodzaju gruntu oraz czasu pielęgnacji. Pięć (1, 3, 4, 5, 7) spośród siedmiu gruntów uzyskało wyraźnie większe wytrzymałości osiągając $R_c = 2,5 \div 4,3$ MPa dla spoiwa marki 3 MPa i $R_c = 2,0 \div 8,2$ MPa dla spoiwa marki 9 MPa.

Dwa grunty (2 i 6) uzyskały mniejsze wytrzymałości $R_c = 0,0 \div 1,5$ MPa. Wytrzymałość zależy również od składu mineralnego gruntów (czego nie badano w niniejszej pracy), dlatego każdorazowe zastosowanie spoiwa do stabilizacji gruntów, podobnie jak cementu czy wapna, powinno być poprzedzone badaniami w laboratorium. Można w ten sposób wyjaśnić zróżnicowanie wyników.

Na rysunkach od 15 do 18 przedstawiono rozwój wytrzymałości w czasie od 42 do 180 dni dla mieszanek z dodatkiem 8% i 10% spoiw (3 i 9 MPa). Badania ograniczono do mieszanek z dużą zawartością spoiw 8 i 10% ze względu na możliwość wystąpienia destrukcyjnego zjawiska pęcznienia (duża zawartość SO_3).

Przedstawione na wykresach (Rys. 15 - 18) i w tablicach 1, 2, 3 wyniki badań wskazują, że występuje stały wzrost wytrzymałości na ściskanie w czasie twardnienia do 180 dni. Wzrost wytrzymałości w czasie jest wyraźny i wynosi

The tested specimens (Figs. 9 - 14) had compressive strength varying in the range $R_c = 0.0 \div 8.2$ MPa, depending primarily on the strength class of binder, its percentage, type of soil and curing time. Five (1, 3, 4, 5, 7) out of the total number of seven soil types had a clearly higher compressive strength, i.e. in the range $R_c = 2.5 \div 4.3$ MPa for 3 MPa binder and $R_c = 2.0 \div 8.2$ MPa for 9 MPa binder.

Two soil types (2 and 6) had smaller strength values, i.e. in the range $R_c = 0.0 \div 1.5$ MPa. The developed strength depends also on the mineral composition of soil (which is beyond the scope of this research), and for this reason laboratory testing is required before each specific application, the same as for cement or lime. This explains the variation of results.

Figures 15 - 18 present the development of strength in the period from day 42 to day 180 for mixtures with 8% and 10% of binders (3 MPa and 9 MPa). A higher content of SO_3 entails the risk of destructive expansion (swelling) and therefore, to investigate this phenomenon we have considered mixtures containing more, i.e. 8% and 10% of binder.

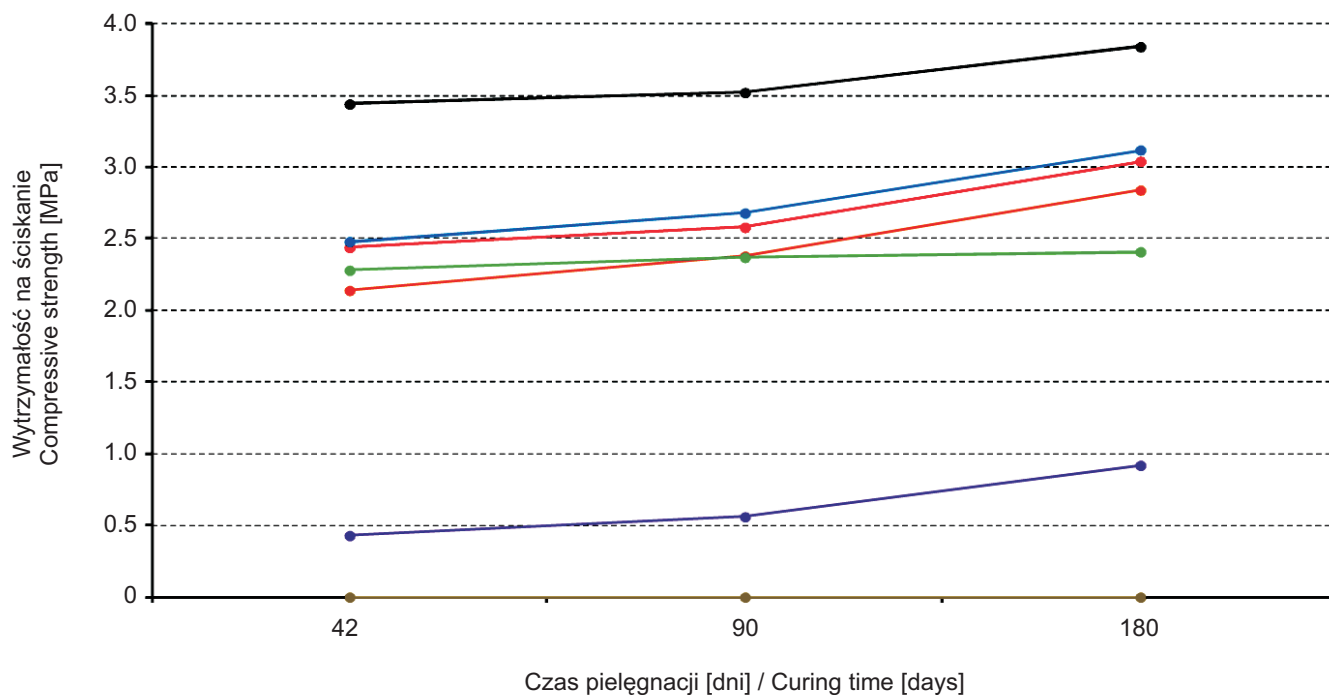
According to the test results presented in the following charts (Figs. 15 - 18) and in the Tables 1, 2, 3 compressive strength increases throughout the whole hardening time up to day 180. The increase of strength in time is evident,

średnio dla wszystkich mieszanek około 13% w okresie 42-90 dni, 22% w okresie 90-180 dni i ponad 40% w okresie 42-180 dni. Badania te dowodzą, że uzyskana wytrzymałość jest trwała, rośnie w czasie i nie występują szkodliwe zjawiska pęcznienia powodujące destrukcję próbek i spadek wytrzymałości. Szczególnie, że analizowano mieszanki o dużych zawartościach spoiw (8 - 10%). Potwierdza to, że stosowanie spoiw w ilościach do 10% skutecznie ulepsza grunty gwarantując trwałość uzyskanych parametrów.

Uzyskany stopień wzmocnienia (uzyskania wytrzymałości na ściskanie R_c) pozwala na ulepszanie gruntów do celów drogowych; uzyskiwanie nawet niewielkich wytrzymałości na ściskanie skutkuje znacznym wzrostem nośności (CBR, E2) podłoża gruntowego. Przeprowadzone badania wykazały, że badane spoiwo stabilizuje grunty mineralne spoiste, mało spoiste i niespoiste, a uzyskiwana wytrzymałość zależy od dodatku spoiwa i jego marki.

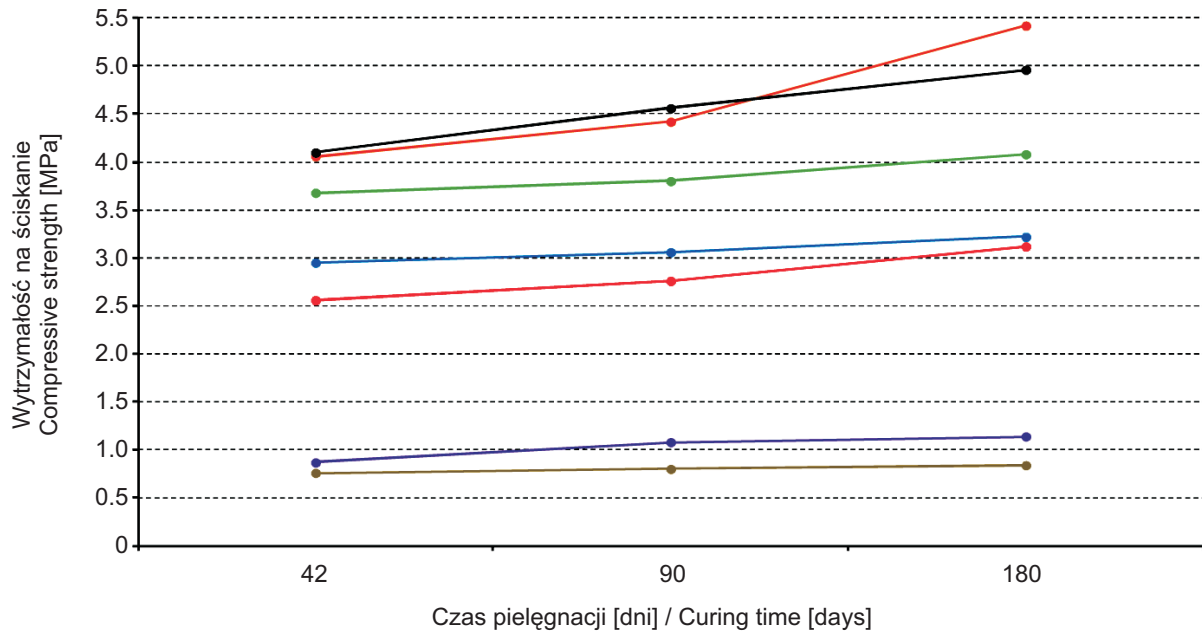
with the average rate for all the analysed mixtures of ca. 13% between day 42 and day 90, 22% between day 90 and day 180 and over 40% between day 42 and day 180. The test results show that the developed strength is permanent, it increases in time and expansion causing destruction of specimens and decrease of strength has not occurred. A high percentage of binder (8 - 10%) in the analysed specimens only adds significance to the obtained results. It confirms that binders applied at a rate of 10% permanently improve the parameters of the treated soils.

With the attained increase of strength (represented by compressive strength R_c) the treated soils becomes suitable for road construction, since even a small increase of the compressive strength results in a major increase of the bearing capacity of subgrade soil (CBR, E2). Thus we have demonstrated experimentally that the tested binder is suitable for stabilisation of cohesive, slightly cohesive and non-cohesive soils and that the developed strength depends on the percentage and strength class of binder.



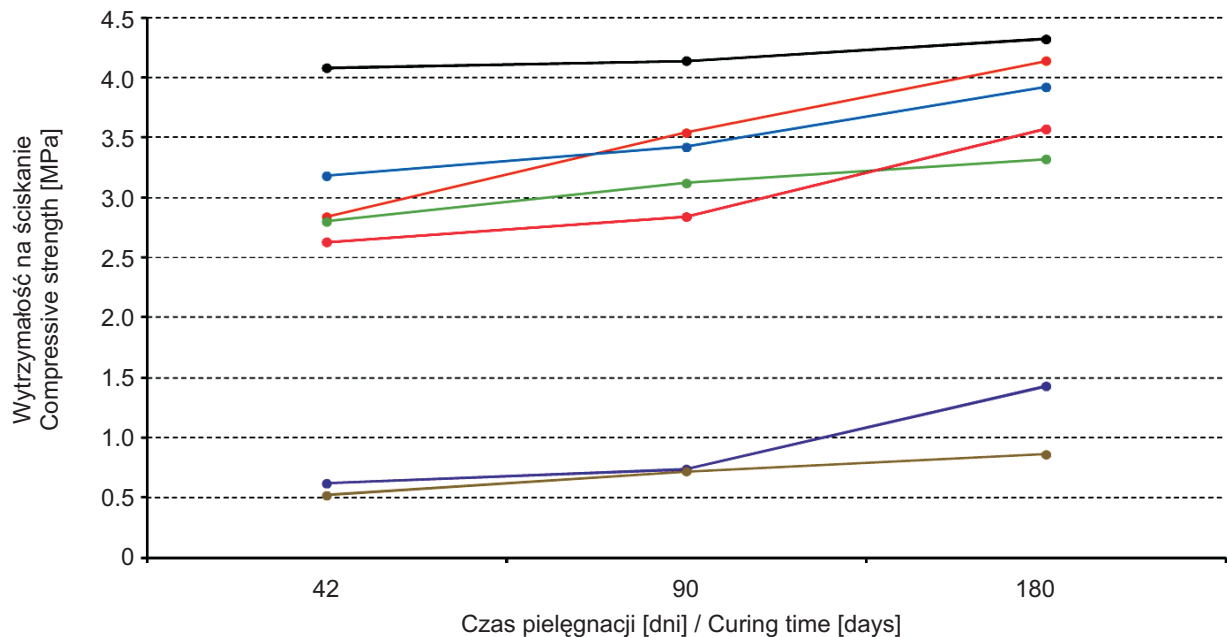
Rys. 15. Wytrzymałość na ściskanie gruntów stabilizowanych 8% dodatkiem hydraulicznego spoiwa drogowego o klasie wytrzymałości 3 MPa po upływie 42, 90, 180 dni twardnienia (legenda według Rys. 9)

Fig. 15. Compressive strength after 42, 90, 180 days of hardening for the different soils stabilized 8% of hydraulic binder addition in the class of 3 MPa (legend identical to Fig. 9)



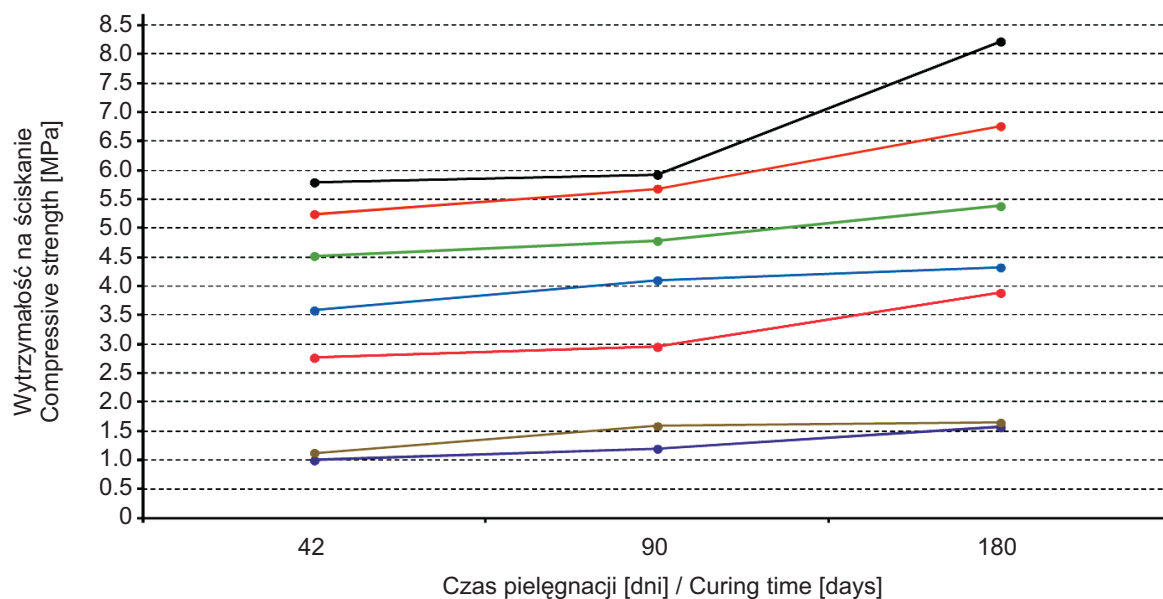
Rys. 16. Wytrzymałość na ściskanie gruntów stabilizowanych 8% dodatkiem hydraulicznego spoiwa drogowego o klasie wytrzymałości 9 MPa po upływie 42, 90, 180 dni twardnienia (legenda według Rys. 9)

Fig. 16. Compressive strength after 42, 90, 180 days of hardening for the different soils stabilized 8% of hydraulic binder addition in the class of 9 MPa (legend identical to Fig. 9)



Rys. 17. Wytrzymałość na ściskanie gruntów stabilizowanych 10% dodatkiem hydraulicznego spoiwa drogowego o klasie wytrzymałości 3 MPa po upływie 42, 90, 180 dni twardnienia (legenda według Rys. 9)

Fig. 17. Compressive strength after 42, 90, 180 days of hardening for the different soils stabilized 10% of hydraulic binder addition in the class of 3 MPa (legend identical to Fig. 9)



Rys. 18. Wytrzymałość na ściskanie gruntów stabilizowanych 10% dodatkiem hydraulicznego spoiwa drogowego o klasie wytrzymałości 9 MPa po upływie 42, 90, 180 dni twardnienia (legenda według rysunku 9)

Fig. 18. Compressive strength after 42, 90, 180 days of hardening for the different soils stabilized 10% of hydraulic binder addition in the class of 9 MPa (legend identical to Fig. 9)

Tablica 1. Procentowy wzrost wytrzymałości na ściskanie w okresie 42 - 90 dni
Table 1. Percentage increase of compressive strength in the period 42 - 90 days

Rodzaj gruntu Type of soil	Wzrost wytrzymałości na ściskanie mieszanek gruntowo-spoiwowych pomiędzy 42 a 90 dniem [%] Increase of compressive strength of cement-soil in the period between day 42 and day 90 [%]			
	Hydrauliczne spoiwo o klasie wytrzymałości 3 MPa Strength class of hydraulic binder 3 MPa		Hydrauliczne spoiwo o klasie wytrzymałości 9 MPa Strength class of hydraulic binder 9 MPa	
	Dodatek spoiwa / Per cent of binder [%]		Dodatek spoiwa / Per cent of binder [%]	
	8	10	8	10
Pospółka – {7} Natural mix of sand and gravel – {7}	11	25	9	8
Piasek średni – {6} Medium sand – {6}	30	19	24	20
Gлина – {2} Clay – {2}	0	38	5	41
Pospółka gliniasta – {1} Sandy gravel mixed with clay – {1}	4	11	3	6
Piasek gliniasty – {3} Sand mixed with clay (loamy sand) – {3}	6	8	8	7
Pospółka gliniasta – {5} Sandy gravel mixed with clay – {5}	2	1	11	2
Piasek średni – {4} Medium sand – {4}	8	8	4	15
Średnio Average	8.7	15.7	9.1	14.1

Tablica 2. Procentowy wzrost wytrzymałości na ściskanie w okresie 90 - 180 dni
Table 2. Percentage increase of compressive strength in the period 90 - 180 days

Rodzaj gruntu Type of soil	Wzrost wytrzymałości na ściskanie mieszanek gruntowo-spoiwowych pomiędzy 90 a 180 dniem [%] Increase of compressive strength of cement-soil in the period between day 90 and day 180 [%]			
	Hydrauliczne spoiwo o klasie wytrzymałości 3 MPa Strength class of hydraulic binder 3 MPa		Hydrauliczne spoiwo o klasie wytrzymałości 9 MPa Strength class of hydraulic binder 9 MPa	
	Dodatek spoiwa / Per cent of binder [%]		Dodatek spoiwa / Per cent of binder [%]	
	8	10	8	10
Pospółka – {7} Natural mix of sand and gravel – {7}	19	17	23	19
Piasek średni – {6} Medium sand – {6}	64	93	6	31
Gлина – {2} Clay – {2}	0	19	5	4
Pospółka glinista – {1} Sandy gravel mixed with clay – {1}	2	6	7	13
Piasek gliniasty – {3} Sand mixed with clay (loamy sand) – {3}	18	26	13	32
Pospółka glinista – {5} Sandy gravel mixed with clay – {5}	9	4	9	39
Piasek średni – {4} Medium sand – {4}	16	15	5	5
Średnio Average	18.3	25.7	9.7	20.4

Tablica 3. Procentowy wzrost wytrzymałości na ściskanie w okresie 42 - 180 dni
Table 3. Percentage increase of compressive strength in the period 42 - 180 days

Rodzaj gruntu Type of soil	Wzrost wytrzymałości na ściskanie mieszanek gruntowo-spoiwowych pomiędzy 42 a 180 dniem [%] Increase of compressive strength of cement-soil in the period between day 42 and day 180 [%]			
	Hydrauliczne spoiwo o klasie wytrzymałości 3 MPa Strength class of hydraulic binder 3 MPa		Hydrauliczne spoiwo o klasie wytrzymałości 9 MPa Strength class of hydraulic binder 9 MPa	
	Dodatek spoiwa / Per cent of binder [%]		Dodatek spoiwa / Per cent of binder [%]	
	8	10	8	10
Pospółka – {7} Natural mix of sand and gravel – {7}	33	46	33	29
Piasek średni – {6} Medium sand – {6}	114	131	31	58
Gлина – {2} Clay – {2}	0	65	11	46
Pospółka glinista – {1} Sandy gravel mixed with clay – {1}	6	19	11	19
Piasek gliniasty – {3} Sand mixed with clay (loamy sand) – {3}	25	36	22	41
Pospółka glinista – {5} Sandy gravel mixed with clay – {5}	12	6	21	42
Piasek średni – {4} Medium sand – {4}	26	23	9	21
Średnio Average	30.9	46.6	19.7	36.6

5. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań wytrzymałości na ściskanie R_c mieszanek gruntowo-spoiwowych na bazie aktywowanych popiołów lotnych z węgla brunatnego można sformułować następujące wnioski:

1. Przeprowadzone badania wykazały, że aktywowane popioły lotne z węgla brunatnego Elektrowni Pątnów mogą stanowić główny składnik hydraulicznego spoiwa drogowego.
2. Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie R_c mieszanek gruntowo-spoiwowych z udziałem aktywowanych popiołów lotnych potwierdzają ich przydatność do wzmocnienia (stabilizacji bądź ulepszenia) gruntów w budownictwie drogowym. Spoiwa niskich marek 3 - 9 MPa służyć będą raczej do zastosowań w dolnych warstwach drogowych, do zwiększenia nośności mało nośnego podłoża gruntowego.
3. Badania wytrzymałości na ściskanie R_c i rozwój wytrzymałości w czasie wykazały, że uzyskana wytrzymałość jest trwała. Obserwuje się powolny i stały wzrost tej wytrzymałości w czasie. Badania udowodniły, że stosowanie spoiwa w ilościach do 10% gwarantuje trwałą stabilizację gruntów.
4. Wykorzystanie aktywowanego popiołu lotnego z węgla brunatnego do wytwarzania hydraulicznych spoiw drogowych, może przyczynić się do zwiększenia przemysłowego zagospodarowania ubocznych produktów spalania (UPS) i zastosowania ich w budownictwie do stabilizacji gruntów.
5. Uboczne produkty spalania po przetworzeniu (modyfikacji) zwiększają możliwość spełnienia wymagań i mogą być pełnowartościowymi produktami do zastosowań w budownictwie drogowym.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] *Wiłun Z.*: Zarys geotechniki. WKiŁ, Warszawa, 2008
- [2] *Kraszewski C.*: Kruszywa i grunty związane hydraulicznie w konstrukcjach drogowych. *Drogownictwo*, **LXIV**, 3, 2009, 98 - 103
- [3] *Pachowski J.*: Popioły lotne i ich zastosowanie w budownictwie drogowym. WKiŁ, Warszawa, 1976
- [4] *Pachowski J.*: Rozwój technologii powstawania ubocznych produktów elektrowniowych oraz ich charakterystyka i możliwości zastosowań w technologiach budownictwa drogowego. *DROGI I MOSTY*, **1**, 1, 2002, 59 - 99

5. CONCLUSIONS

The results of compressive strength R_c testing of fly ash soil mixtures allow to draw the following conclusions:

1. It has been proven by the testing that activated lignite fly ash from the Pątnów power plant may be used as the main ingredient of hydraulic binders for road building applications.
2. The values of compressive strength R_c prove suitability of soil mixtures prepared with fly ash in strengthening (stabilisation or improvement of properties) of soils in road construction. Binders of lower strength class i.e. 3 - 9 MPa will be used mainly in lower courses of pavement, where it is required to increase the bearing capacity of low weak subgrade.
3. The developed strength remains stable in time, as demonstrated by the tests determining the initial compressive strength R_c and its development trends. A slow and continuous increase of this strength has been observed. According to the test results 10% content of binder in the mixture ensures permanent stabilisation of soil.
4. The use of activated lignite fly ash in production of hydraulic road binders may promote industrial use of coal combustion products (CCP) in production of soil stabilisation products.
5. Subject to improving the parameters by processing (modification) coal combustion products may be used in road building applications on equal terms with other products.

- [5] *Sybilski D., Kraszewski C.*: Ocena i badania wybranych odpadów przemysłowych do wykorzystania w konstrukcjach drogowych. Niepublikowane sprawozdanie IBDiM, Warszawa, 2004
- [6] *Rafalski L.*: Podbudowy drogowe. Seria „S”, 59, IBDiM, Warszawa, 2007
- [7] *Škvára F., Kopecký L., Šmilauer V., Bittnar Z.*: Material and structural characterization of alkali activated low-calcium brown coal fly ash. *Journal of Hazardous Materials*, **168**, 2-3, 2009, 711 - 720
- [8] *Widuch A., Ćwiakala M.*: Wykorzystanie popiołów lotnych z węgla brunatnego w budownictwie komunikacyjnym. *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Zielonogórskiego*, 137, Oficyna Wydawnicza UZ, Zielona Góra, 2010

- [9] *Kraszewski C., Dreger M.*: Wykorzystanie odpadów przemysłowych w budownictwie drogowym. Krajowa Konferencja Naukowo-Techniczna SITK „Estetyka i ochrona środowiska w drogownictwie”, Nałęczów, 2005
- [10] *Ćwiąkała M., Sosiński R., Nowak W., Szymańska J.*: Aktywowanie popiołów lotnych z węgla brunatnego elektrowni Pątnów w młynie elektromagnetycznym. *Inżynieria i Ochrona Środowiska*, **11**, 4, 2008, 491 - 502
- [11] *Kurdowski W.*: Chemia cementu i betonu. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2010
- [12] *Ćwiąkała M., Kmiotek B.*: Method for producing hydraulic binding agent in a form of activated fly ash, activated fly ash, hydraulic binding agent, sulphur or cement concrete, mineral-asphalt mixture and application of the activated fly ash, Zgłoszenie patentowe nr EP-08173125.9, Europejski Urząd Patentowy, Warszawa, 2008
- [13] *Widuch A., Ćwiąkała M., Korzeniowska J., Kraszewski C.*: Możliwości przemysłowego zagospodarowania popiołów lotnych z węgla brunatnego w drogownictwie. *Drogownictwo*, **LXVI**, 12, 2011, 390 - 394
- [14] Aprobata techniczna Nr AT/200903-2510: Hydrauliczne spoiwo drogowe Wapeco I. Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa, 2009
- [15] PN-S-02205:1998 Drogi samochodowe. Roboty ziemne. Wymagania i badania
- [16] Sprawozdanie nr 160/ZO-OU/2007: Ocena własności fizykochemicznych i możliwości gospodarczego wykorzystania popiołu lotnego z Elektrowni Pątnów. Zakłady Pomiarowo-Badawcze Energetyki „ENERGOPOMIAR” Sp. z o.o. w Gliwicach, 2007
- [17] Sprawozdanie nr 060/2008: Góraźdże Cement S.A. Laboratorium Materiałów Budowlanych w Strzelcach Opolskich, 2008
- [18] PN-S-96035:1997 Drogi samochodowe. Popioły lotne
- [19] PN-EN 14227-4:2005 Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym. Wymagania. Część 4: Popioły lotne do mieszanek (oryg.)
- [20] PN-EN 196-1:2006 Metody badania cementu. Oznaczenie wytrzymałości
- [21] PN-B-04481:1998 Grunty Budowlane. Badania próbek gruntu