



AYOUP M. GHRAIR¹⁾
NAWAL LOUZI²⁾

RECYCLING OF CEMENT KILN DUST FROM CEMENT PLANTS TO IMPROVE MECHANICAL PROPERTIES OF ROAD PAVEMENT BASE COURSES

WYKORZYSTANIE POWSTAJĄCYCH W CEMENTOWNIACH PYŁÓW Z PIECÓW CEMENTOWYCH DO POPRAWY WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNYCH PODBUDÓW DROGOWYCH

STRESZCZENIE. Przedmiotem badań była ocena możliwości wykorzystania pyłów z pieców cementowych (ang. *cement kiln dust*, CKD) do poprawy parametrów mechanicznych podbudów drogowych. Pył CKD został scharakteryzowany pod względem właściwości fizycznych i chemicznych. Wyniki badań pozwoliły stwierdzić znaczący pozytywny wpływ dodatku pyłu CKD na właściwości mechaniczne podbudowy. Dodatek pyłu CKD spowodował istotny wzrost wartości wskaźnika nośności CBR. Otrzymano odpowiednio wartości wskaźnika 334,4%, 362,7% oraz 384,6% w przypadku dodatku 5%, 15% i 25% pyłu CKD oraz 234,5% w przypadku mieszanki bez dodatku pyłu. Skład chemiczny pyłu CKD okazał się być zbliżony do składu cementu. Średnia wielkość cząstek, ustalona na podstawie analizy obrazów z mikroskopu elektronowego wynosiła około 0,5 μm . Ziarna miały w przeważającej większości kształt sferyczny z udziałem sześciennych kryształów soli sodu i potasu. Na podstawie badania wymywalności metali ciężkich zawartych w pyłach CKD stwierdzono stałość ich stężeń i nierozpuszczalność w wodzie.

SŁOWA KLUCZOWE: drogi, materiały z recyklingu odpadów stałych, nawierzchnia, podbudowa drogowa, pył z pieca cementowego.

ABSTRACT. In the study, the potential of reuse of cement kiln dust (CKD) to improve the stability properties of the base course of road pavements was investigated. CKD was characterized chemically and physically. The results revealed that addition of CKD improved the mechanical properties of the base course significantly. The results showed a significant increase in California Bearing Ratio, from 234.5% measured for untreated base to 334.4%, 362.7% and 384.6% for CKD content of 5%, 15% and 25%, respectively. In terms of chemical composition, CKD is similar to cement. Scanning electron microscope images showed that the average particle size is approximately 0.5 microns. The granules are mainly spherically shaped, with cubic crystals of sodium and potassium salts. The leachability study of CKD in the base course revealed that heavy metal concentrations in CKD are fixed and insoluble in water.

KEYWORDS: base course, cement kiln dust, highways, pavement, recycled solid waste.

DOI: 10.7409/rabdim.020.013

¹⁾ Al-Balqa Applied University, Water Resources and Environmental Management Department, Al-Salt 19117, Jordan, P.O. Box 206; Royal Scientific Society, Foundation Science Research Unit, Amman, Jordan; ayoup.ghrair@bau.edu.jo (✉)

²⁾ Al-Ahliyya Amman University, Engineering Faculty, Civil Engineering Department, Al-Salt, Amman, Jordan; n.louzi@ammanu.edu.jo

1. WSTĘP

Ogólnoświatowy wzrost zapotrzebowania na cement znacząco zwiększył ilości powstającego w cementowniach pyłu z pieców cementowych, zwanego pyłem CKD (ang. *cement kiln dust*, CKD). Jest to drobny pył wychwytywany w trakcie produkcji klinkieru cementowego przez pracujące w układzie odpylającym filtry elektrostatyczne [1]. Z wyglądu przypomina on cement [2]. Pył CKD traktowany jest jako produkt uboczny lub odpad stały, który powstaje w ilości średnio 25 kg na tonę wyprodukowanego klinkieru [3].

W zależności od miejsca powstawania może on mieć różne właściwości fizyczne i chemiczne, co wynika ze zróżnicowania materiału wsadowego, różnych technologii odpylania (filtry elektrostatyczne, cyklonowe, tkaninowe i mokre) oraz różnych paliw użytych podczas produkcji [4]. Pył CKD stanowi zasadniczo mieszaninę produktów otrzymanych w wyniku niepełnej kalcynacji (prażenia) materiałów wsadowych, pyłu klinkierowego, popiołu, siarczanów alkalicznych oraz halogenków jak również substancji lotnych [5]. W Stanach Zjednoczonych 64% powstającego jako produkt uboczny pyłu zawraca się do pieca cementowego. Rozwiązanie to, polegające na wykorzystaniu pyłów CKD w procesie produkcji klinkieru nie zawsze jest rozwiązaniem wskazanym ze względu na ograniczenia w zakresie dopuszczalnej zawartości alkaliów i chlorków w cemencie [6]. Zdaniem Seo i in. [7] możliwość wykorzystania pyłu CKD w cementowniach uwarunkowana jest wyeliminowaniem wysokich stężeń chloru (Cl) i potasu (K). Opierając się na wynikach własnych badań, stwierdzili oni skuteczność wymywania Cl i K w wyniku ługowania pyłu CKD kwasami organicznymi i wodą destylowaną. Potwierdzili również możliwość odzyskania Cl i K z roztworu po ługowaniu przy użyciu żywicy.

Przechowywanie i/lub utylizacja pyłów CKD powstających w tak dużych ilościach jako produkt uboczny procesu produkcyjnego stawia przed przemysłem cementowym poważne wyzwania. Nie bez znaczenia jest również zagrożenie dla środowiska naturalnego [8]. Z dostępnych opracowań wynika duży potencjał pyłu CKD jako materiału do stabilizacji różnorodnych gruntów. Wśród parametrów mających wpływ na efekt stabilizacji wymienić należy skład, rozkład wielkości cząstek oraz ilość dodanego pyłu a także rodzaj gruntu [9]. Jak podają Button [9] i Petry [10], pyły z pieca cementowego można wykorzystać do neutralizacji odpadów o charakterze kwaśnym oraz do stabilizacji gruntów. Badanie stabilizacji gruntu przy użyciu pyłu CKD przeprowadzili Kumar i Singh [11], dodając pył w ilości od 0% do 30% w stosunku do masy stabilizowanego gruntu. Stwierdzili oni wzrost wartości kalifornijskiego wskaźnika nośności (CBR) ze zwiększaniem zawartości pyłu CKD, zarówno dla gruntów w stanie nasyconym jak

1. INTRODUCTION

The growing global demand for cement results in significant accumulation of cement kiln dust (CKD) from cement plants. The CKD is a fine powder separated by electrostatic filters in the dust collection system during production of cement clinker[1]. It is similar in appearance to cement [2]. CKD is a by-product or solid waste that is produced at a mean rate of 25 kg per tone of clinker [3].

The physical and chemical properties of CKD vary from plant to plant based on the raw feed material, dust collection system (electrostatic precipitation, cyclone, baghouse or scrubber), and the fuel type employed[4]. Generally, CKD includes mixtures of incompletely calcined raw materials, clinker dust, ash, alkali sulfates and halides, as well as volatiles [5]. In the USA, 64% of CKD is reused in kiln. However, it is not always preferable to recycle CKD into the clinker-making process due to the restrictions on the alkali and chloride content in cement [6]. Seo et al. [7] reported that CKD has the potential to be recycled in cement plants if the high concentrations of chlorine (Cl) and potassium (K) are removed. They concluded that leaching of CKD by organic acids or distilled water were effective in removing Cl and K. Moreover, Cl and K could be recovered from the leachate using resin.

The amounts of CKD created as a by-product are enough to present the cement industry with serious storage and/or disposal problems. Moreover, CKD poses an environmental threat [8]. Previous reports concluded that CKD has considerable potential for stabilizing a wide range of soil types. The variable parameters that influence this stabilizing effect are the composition, particle size distribution and addition percentage of the CKD, as well as the type of the soil [9]. Button [9] and Petry [10] have reported that kiln dusts can be recycled in neutralization of acidic waste and soil stabilization. Kumar and Singh [11] carried out a study on soil stabilization, in which soil was stabilized by adding 0% to 30% CKD by weight of soil. The study reported that the California Bearing Ratio (CBR) value for soaked and unsoaked condition increases as a function of added CKD content. This resulted in a relative increase in CBR value of up to 156%. The CBR values of soil are a good indicator of subgrade soil bearing capacity and an important parameter inflexible pavement design. Moreover, addition of CKD has previously led to a significant increase in soil compressive strength of up to 204%. Furthermore, liquid limit decreases and plastic limit of soil increases as CKD content increases. The plasticity index of soil is reduced with an increase in CKD content.

i nienasyconym. W badaniach uzyskano względny wzrost wartości wskaźnika CBR nawet o 156%. Uzyskane dla gruntu wartości CBR są miarodajnym wskaźnikiem nośności podłoża gruntowego oraz ważnym parametrem wyjściowym w projektowaniu nawierzchni podatnych. Ponadto w poprzednich badaniach w wyniku dodatku pyłu CKD uzyskano znaczący, tj. do 204% wzrost wytrzymałości gruntu na ściskanie. W miarę wzrostu zawartości pyłu CKD następuje też zmniejszenie granicy płynności oraz wzrost granicy plastyczności gruntu. Wskaźnik plastyczności gruntu spada ze wzrostem zawartości pyłu CKD. Podobne badanie stabilizacji przy użyciu pyłu CKD przeprowadzili dla piasku wydumowego Baghdadadi i in. [12], stwierdzając, że w przypadku lekkich obciążeń wystarczy dodatek już w zakresie 12% do 30%, a w przypadku dużych obciążeń podłoża w celu uzyskania zadowalającego wzmocnienia podłoża ilość CKD należy zwiększyć do 50%. Na podstawie przeprowadzonej w Iraku analizy przypadku oraz analiz statystycznych stwierdzono poprawę właściwości podłoża słabonośnego w wyniku dodania pyłu CKD. W celu zbadania wpływu pyłu CKD na właściwości mechaniczne przeprowadzono szereg badań na próbkach kontrolnych oraz próbkach gruntu ulepszonych przez dodanie pyłu CKD w różnych proporcjach (od 0 do 30% suchej masy gruntu) przy różnych okresach twardnienia stabilizacji (od 0 do 28 dni). Na podstawie uzyskanych wyników jako optymalne warunki stabilizacji przy użyciu pyłu CKD przyjęto zawartość pyłu na poziomie 20% i dwutygodniowy czas twardnienia. W takich warunkach wskaźnik CBR wzrósł od 3,4% w przypadku gruntu bez stabilizacji do 48% w przypadku gruntu stabilizowanego dodatkiem pyłu CKD, przy jednoczesnym ograniczeniu pęcznienia stabilizowanego materiału. Stabilizacja podłoża dodatkiem pyłów CKD w ilości 20% przy dwutygodniowym okresie twardnienia stabilizacji przyniosła oszczędności w postaci mniejszego o 25,875 USD kosztu budowy 1 m² nawierzchni dzięki zmniejszeniu zaprojektowanych grubości warstw konstrukcyjnych [13]. Owsiak i in. [14] podają, że pył z instalacji by-passu pieca cementowego (ang. *cement by-pass dust*, CBPD) zawiera spoiwa: sylwin i uwodniony chloroglinian wapnia. Wyniki badań mieszanek związanych hydraulicznie, które wyprodukowano przy wykorzystaniu cementu portlandzkiego, wapna gaszonego oraz mieszanki pyłów CKD/CBPD wykazały również, że największy wpływ na wodożądność oraz ciepło hydratacji zaczynu ma ostatnie z wymienionych powyżej spoiw.

Autorzy mają świadomość dużej liczby przeprowadzonych do tej pory badań dotyczących wykorzystania pyłów CKD do stabilizacji gruntu (podłoża drogowego). Jak do tej pory nie opublikowano jednak wyników badań dotyczących wykorzystania pyłów CKD do stabilizacji warstwy podbudowy

Baghdadi et al. [12] conducted a similar study on stabilized dune sand, in which they reported that addition of CKD between 12% and 30% was satisfactory for light loads and 50% of CKD content was sufficient for stabilization in the case of heavily loaded subgrade. Based on a case study and statistical analysis from Iraq, it was reported that the use of CKD improves the properties of weak subgrade soils. A series of CBR tests was performed on untreated soil samples as well as soil treated with various quantities of CKD (from 0% to 30% by dry weight of soil) at different curing times (from 0 to 28 days) to examine their effect on mechanical properties. The results revealed that the addition of 20% of CKD at curing time of 14 days represents the optimum conditions at which the CBR value significantly increased from 3.4% for untreated soil to 48% for treated soil. In addition, there was a significant decrease in the swelling ratio. Moreover, addition of 20% of CKD to the subgrade soil at curing time of 14 days led to reduction in the cost of the pavements by \$25.875 per square meter as a direct result of decrease in the designed thicknesses of pavement layers [13]. Owsiak et al. [14] reported that the CBPD (cement by-pass dust) contained binders sylvite and calcium chloro-aluminate hydrate. The results of the hydraulically bound mixes using Portland cement, hydrated lime and CKD/CBPD mixture also show that the latter has the highest effect on the increased water demand and hydration heat of the binder paste.

To the best of the authors' knowledge, there are many studies on using CKD for soil (subgrade) stabilization. However, there is a lack of published reports on the effect of CKD addition on base course stabilization. Therefore, it is a rational action to investigate the potential of the pavement base course stabilization using CKD (Fig. 1).

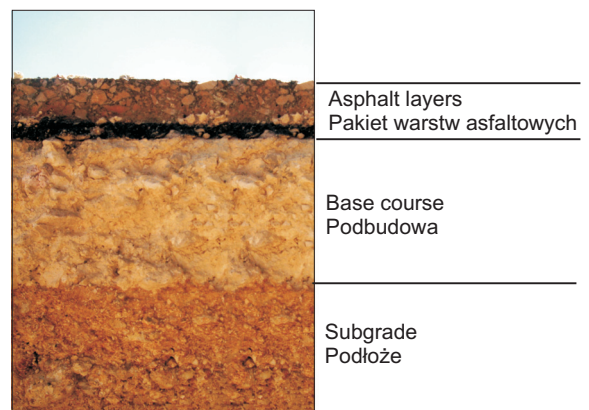


Fig. 1. Layers of a flexible pavement
Rys. 1. Przekrój nawierzchni podatnej

drogowej. Uzasadnia to potrzebę przeprowadzenia badań nad możliwościami wykorzystania pyłów CKD do stabilizacji tej warstwy nawierzchni (Rys. 1).

Na nawierzchniach asfaltowych często widoczne są spękania (Rys. 2). Przyczyn ich powstawania szukać należy w niewystarczającej wytrzymałości pakietu warstw asfaltowych, podbudowy lub podłoża gruntowego, niedostatecznej szepności międzywarstwowej, nieodpowiedniej grubości nawierzchni, niewystarczającego zagęszczenia warstw asfaltowych, niskiej wytrzymałości mieszanek a także przedostawaniu się wilgoci w głąb nawierzchni [15]. Przedwczesne zużycie nawierzchni może być też spowodowane nieprawidłowym uwzględnieniem w projekcie obciążeń pojazdów ciężarowych lub przekroczeniem w okresie eksploatacji nawierzchni przyjętej w projekcie liczby przejazdów takich pojazdów.

Celem niniejszego opracowania jest zbadanie fizykochemicznych właściwości pochodzącego z Jordanii pyłu CKD w celu uzyskania rozeznania co do możliwości wykorzystania pyłów CKD w stabilizacji warstw podbudowy nawierzchni drogowych oraz przedstawienie oceny środowiskowych aspektów zastosowania pyłów CKD w budowie dróg. Wyniki niniejszych badań powinny ułatwić wykorzystanie pyłów CKD oraz odpowiednią modyfikację wymagań normatywnych.

2. MATERIAŁY I METODY

2.1. POBRANIE PRÓBEK I CHARAKTERYSTYKA MATERIAŁÓW

Aby umożliwić pełne wykorzystanie potencjału pyłu CKD, pobrano reprezentatywną próbkę tego materiału z pieca cementowego eksploatowanego na terenie Jordanii. Badania właściwości pyłów z pieca cementowego dotyczyły dwóch głównych aspektów:

- właściwości fizycznych (m.in. granulacji),
- właściwości chemicznych (zawartości tlenków głównych i pierwiastków śladowych).

Zastosowane techniki analityczne obejmowały dyfraktometrię rentgenowską (XRD), fluorescencję rentgenowską (XRF), elektronową mikroskopię skaningową (SEM) oraz fluorescencyjną spektrofotometrię rentgenowską z dyspersją energii (EDS-XRF).

2.2. BADANIA MECHANICZNE

W celu zbadania wpływu dodatku pyłu CKD na stabilizację podbudowy sporządzono mieszanki zawierające różne ilości pyłu CKD (0%, 5%, 10%, 15%, 25% w stosunku do suchej masy podbudowy). Wyniki analizy sitowej próbek kontrolnych warstwy podbudowy oraz wszystkich sporządzonych mieszanek przedstawiono w Tabl. 1.

Cracks may be often observed on the surface of asphalt pavements (Fig. 2). This problem is produced by weaknesses of the asphalt layers, base course or subgrade, deficiency of bonding between layers, inadequate pavement thickness, insufficient compaction of the asphalt, weak asphalt mixes or moisture infiltration [15]. Moreover, deficiencies in road service life could be a result of improper design of the pavement for the truck loads or the probability of heavy vehicle traffic exceeding the assumed values during the life-span of the road.

The purpose of this study is to investigate the physicochemical properties of Jordanian CKD, to provide a clear vision for the potential application of CKD in stabilization of base course layers in highway pavements, and to provide an environmental assessment of the application of CKD in highway construction. The outcome of this research should facilitate reuse of CKD and modification of related standard specifications.



Fig. 2. Cracks visible on the surface of asphalt pavement
Rys. 2. Spękania widoczne na nawierzchni asfaltowej

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. MATERIALS COLLECTION AND CHARACTERIZATION

In order to use cement kiln dust to its full potential, a representative sample of CKD was collected from a Jordanian cement plant. The characterization testing of kiln dusts involved two main aspects:

- physical properties (e.g. particle size distribution),
- chemical properties (major oxides and trace elements, loss on ignition).

The analytical techniques used included X-ray diffraction (XRD), X-ray fluorescence (XRF), scanning electron microscope (SEM) as well as EDS-XRF.

Zbadano wpływ dodatku pyłu CKD na właściwości fizyczne i chemiczne wyprodukowanych mieszanek. Próbkę zagęszczono zgodnie ze standardową metodą Proctora wg norm ASTM D1557/12 [16] i ASTM D2216/10 [17]. Cylindryczne próbki owinięto i poddano pielęgnacji wilgotnościowej do czasu przeprowadzenia badań. Przeprowadzono pomiar wskaźnika CBR oraz gęstości. Wszystkie próbki przygotowano i zbadano zgodnie z obowiązującymi normami krajowymi i międzynarodowymi (m.in. ASTM D2216/10 [17] i ASTM D1883/16 [18]).

2.2. MECHANICAL TESTS

In order to study the effect of addition of CKD on base course stabilization, mixtures of base course with CKD at various ratios (0%, 5%, 10%, 15%, 25% of CKD, by dry weight of base course) were prepared. The sieve analyses for the reference base course sample and all mixtures are presented in Table 1.

The influence of the addition of CKD on the physical and chemical properties of the produced mixtures was investigated. Samples were compacted following the standard Proctor test ASTM D1557/12 [16] and ASTM D2216/10 [17]. The cylindrical specimens were wrapped and moist cured until testing was performed. CBR and density were measured. All specimens were prepared and tested according to their respective national and international standards (e.g. ASTM D2216/10 [17] and ASTM D1883/16 [18]).

Table 1. Sieve analysis for CKD mixtures ([%] passing)
Tablica 1. Analiza sitowa mieszanek zawierających pył CKD ([%] przechodzi przez sito)

Sieve size & no. Wielkość i nr sita	Sieve size [mm] Rozmiar oczka sita	Final grading of mix / Uziarnienie sporządzonej mieszanki					Standard grading limits Normowe granice uziarnienia	
		0% CKD	5% CKD	10% CKD	15% CKD	25% CKD	Lower Dolna	Upper Górna
1.5"	37.5	100	100	100	100	100		100
1"	25	85.5	86.2	87.0	87.7	89.1	75	100
3/4"	19	71.8	73.2	74.6	76.0	78.9	60	90
1/2"	12.5	53.7	56.0	58.3	60.6	65.3	45	80
3/8"	9.5	42.6	45.5	48.3	51.2	57.0	40	70
No. 4	4.75	30.9	34.4	37.8	41.3	48.2	30	65
No. 10	2	16.0	20.2	24.4	28.6	37.0	20	40
No. 40	0.425	11.9	16.3	20.7	25.1	33.9	8	20
No. 200	0.075	8.9	12.9	16.9	20.9	28.9	5	10

2.3. ANALIZA PLASTYCZNOŚCI

W celu sprawdzenia, jaki wpływ na parametry plastyczności (granice płynności i granice plastyczności) będzie miało zastąpienie części drobnego kruszywa (przechodzącego przez sito nr 40) przez pył CKD, wykonano próbki mieszanki zawierające 0% (mieszanka bazowa bez dodatku pyłu), 5%, 10%, 15% i 60% pyłu CKD w stosunku do suchej masy cząstek mieszanki drobniejszych niż 0,425 mm i poddano je badaniom zgodnie z normami Amerykańskiego Stowarzyszenia Badań i Materiałoznawstwa (ASTM D 4318/00 [19]).

2.4. POZIOMY WYMYWALNOŚCI

Przeprowadzono ocenę oddziaływania na środowisko w celu ustalenia, czy pył CKD dotyczyć będą zasady postępowania obowiązujące dla odpadów niebezpiecznych. Badanie charakterystyki toksyczności pyłu CKD jest istotne z punktu widzenia oceny możliwości wymywania toksycznych metali

2.3 PLASTICITY ANALYSIS

In order to investigate the effect of replacing of the fine aggregates in base course (< mesh no. 40) by addition of CKD at 0% (untreated base course), 5%, 10%, 15% and 60% (by dry weight of base course particles finer than 0.425 mm) on the plasticity properties (liquid limit and plastic limit), tests were conducted in accordance with the standards of the American Society for Testing and Materials (ASTM D 4318/00 [19]).

2.4. LEACHABLE CONCENTRATIONS

An environmental impact assessment was carried out to determine whether CKD should be managed as hazardous waste. Examining the characteristic of toxicity of CKD is important in order to evaluate the potential for toxic trace metals to leach and migrate from CKD itself and CKD-stabilized base course mixtures. The total heavy

śladowych i ich migracji zarówno z czystego pyłu CKD jak i z podbudowy drogowej, w której został on wykorzystany jako dodatek stabilizacyjny. Do określenia całkowitej ilości metali ciężkich zawartych w pyłe zastosowano ługowanie wodą królewską ($\text{HCl} + \text{HNO}_3$) i pomiar metodą spektrometrii z indukcyjnie sprzężoną plazmą (ICP).

2.5. ANALIZA DANYCH

Wszystkie dane poddano analizie statystycznej przy użyciu programu IBM SPSS Statistics (wersja 19.0). Każdy punkt danych zmierzono trzykrotnie. Wszystkie parametry miały wartość stałą, a jedyną zmienną była zawartość dodatku pyłu CKD wyrażona w procentach względem suchej masy mieszanki na wykonanie podbudowy. Statystyczną istotność oceniono za pomocą wielowymiarowego testu podzbiorów jednorodnych Tukeya (dla $p \leq 0,05$).

3. WYNIKI I DISKUSJA

3.1. UWAGI OGÓLNE

Na podstawie przeprowadzonych analiz chemicznych stwierdzono, że pył CKD ma budowę chemiczną analogiczną do zwykłego cementu portlandzkiego (Tabl. 2). Jednocześnie pył CKD charakteryzuje się wysoką zawartością Cl (8,6%) oraz wysokimi stratami przy prażeniu (13,25%). Zawartość Cl oraz straty przy prażeniu przekraczają maksymalną wartość określoną dla cementu w obowiązującej w Jordanii normie technicznej. Wynik ten jest w zgodzie z ustaleniami poprzednich badań [20]. Podstawowymi źródłami Cl i strat przy prażeniu są niespalone surowce, lotne związki organiczne oraz popiół lotny. Cl może powodować silną korozję zbrojenia. Wyklucza to możliwość wykorzystania badanego pyłu CKD jako surowca wtórnego w produkcji klinkieru.

3.2. ANALIZA WYMYWALNOŚCI PYŁU CKD

Wykorzystanie w piecu cementowym materiałów odpadowych lub paliw alternatywnych prowadzi do akumulacji metali ciężkich w powstającym pyłe CKD [21]. Całkowite i wymyte ilości metali zawartych w pyłe CKD i cementach podano w Tabl. 3. Z analiz chemicznych wynika, że stężenia metali ciężkich wymywalnych wodą przypadają poniżej poziomu detekcji aparatu ICP. Jednocześnie, całkowite zawartości kadmu (Cd), ołowiu (Pb) i niklu wyniosły odpowiednio 10 mg/l, 25 mg/l i 15 mg/l. Jedną z możliwych przyczyn tego stanu rzeczy może być nierozpuszczalność tych metali przy wysokim odczynie pH (12,5), jakim charakteryzował się badany popiół CKD. Button w [9] podaje, że metale lotne (rtęć, tal, selen, ołów i kadm) mają tendencję do kumulowania się w pyłe CKD w chłodniejszych strefach instalacji pieca cementowego. Ponadto metale bardzo trudnotopliwe, takie jak

metals concentration was tested using aqua regia ($\text{HCl} + \text{HNO}_3$) and measured using the inductively coupled plasma (ICP) spectroscopy.

2.5. DATA ANALYSIS

All data were statistically analyzed using IBM SPSS Statistic Data Editor (Version 19.0). Each data point was measured in triplicate. All parameters were fixed and only the CKD addition percentage by dry weight of base course was changed. Statistical significance was evaluated by multivariate Tukey homogeneous subsets test (at $p \leq 0.05$).

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. GENERAL REMARKS

The chemical analyses of CKD show the same chemical content as for ordinary Portland cement (Table 2). However, CKD has a high content of Cl (8.6%) and loss on ignition (*LOI*) (13.25%). The Cl content and *LOI* are higher than the maximum limit allowed by the Jordanian standard specification for cement. The result is in harmony with previous studies [20]. The main sources of Cl and *LOI* are unburned raw materials, organic volatile compounds and fuel ash. Cl can cause strong corrosion of steel reinforcement. Therefore, this type of CKD should not be recycled in clinker production.

Table 2. The chemical composition [%] of CKD and cement from a cement plant in Jordan
Tablica 2. Skład chemiczny [%] pyłu CKD oraz cementu z cementowni w Jordanii

Parameter Parametr	CKD	Cement	Specification Wymaganie
Al_2O_3	3.88	5.45	
Fe_2O_3	2.83	3.64	
CaO	46.35	61.53	
LSF ^{*)}	0.87	0.92	
SR ^{**)}	2.50	2.27	
MgO	0.77	2.38	
Cl	8.62	0.06	≤ 0.1
SO_3	2.40	2.90	≤ 4.5
LOI ^{***)}	13.25	1.98	≤ 5.0
^{*)} LSF represents lime saturation factor / oznacza moduł nasycenia wapnem, $\text{LSF} = [\text{CaO}/(2.8 \text{SiO}_2 + 1.18 \text{Al}_2\text{O}_3 + 0.65 \text{Fe}_2\text{O}_3)]$			
^{**)} SR represents silica saturation / oznacza moduł krzemowy, $\text{SR} = [\text{SiO}_2/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)]$.			
^{***)} LOI (loss on ignition) / strata prażenia			

chrom, bar, beryl, arsen, nikiel i srebro mają tendencję do pozostawania w cemencie.

Table 3. Average leachable concentrations for CKD and CKD mixed with base course aggregates at 15% as well as the total metals in CKD dissolved by aqua regia (HCl + HNO₃). Each data point represents the average of three samples measured using ICP

Tablica 3. Średnie stężenia metali wymywalnych z popiołu CKD oraz mieszanki na podbudowę stabilizowanej dodatkiem 15% popiołu CKD wraz z całkowitymi ilościami metali zawartych w popiele CKD uzyskanymi przez ekstrakcję wodą królewską (HCl + HNO₃). Każdy punkt danych przedstawia średnią z pomiarów na trzech próbkach za pomocą aparatu ICP

Metals Metale	Leachable metals / Poziom wymywalności metali		Total metals Aqua regia (HCl + HNO ₃) Całkowita zawartość metali Ekstrakcja wodą królewską (HCl + HNO ₃)
	CKD [mg/L] z popiołu CKD	CKD mixed with base course [mg/L] z mieszanki na podbudowę stabilizowaną popiołem CKD	CKD [mg/L] popiół CKD
Mercury / Rtęć	0.1	< 0.1	< 0.1
Selenium / Selen	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Cadmium / Kadm	< 0.1	< 0.1	10
Lead / Ołów	< 0.1	< 0.1	25
Silver / Srebro	< 1	< 1	< 1
Arsenic / Arsen	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Nickel / Nikiel	< 0.1	< 0.1	15
Beryllium / Beryl	< 1	< 1	< 1

3.2. CKD LEACHABILITY ANALYSIS

The use of waste or alternative materials in cement kiln operation as fuel leads to accumulation of heavy metals in CKD [21]. Table 3 demonstrates the average leachable and total content of metals in CKD and cements. The chemical analyses show that the water-leachable concentrations of heavy metals are below the detection limit of the ICP. However, the total contents of cadmium (Cd), lead (Pb) and nickel equaled 10 mg/L, 25 mg/L and 15 mg/L, respectively. One possible explanation is that these metals are insoluble at high pH (12.5) noted in the CKD. Button [9] reported that volatile metals (mercury, thallium, selenium, lead and cadmium) tend to accumulate in the CKD in cooler regions of the kiln system. Moreover, the refractory metals (chromium, barium, beryllium, arsenic, nickel and silver) tend to remain in the cement.

3.3. WIELKOŚĆ I KSZTAŁT ZIAREN

Na podstawie analizy rozkładu uziarnienia przy użyciu dyfraktometru laserowego stwierdzono, że pył CKD zawiera 50% ziaren drobniejszych niż 15 µm (Rys. 3). Średnia wielkość ziarna, wyznaczona na podstawie analizy obrazu z mikroskopu elektronowego (Rys. 4) wyniosła około 0,5 µm. Oprócz stanowiących większość ziaren sferycznych wyróżniono ziarna o kształcie sześciennych kryształów oraz ziarna płaskie. Ziarna poddano analizie chemicznej metodą fluorescencyjnej spektrofotometrii rentgenowskiej z dyspersją energii (EDS-XRF). Stwierdzono, że kształt sferyczny mają ziarna zbudowane z wapnia i węgla wapnia, kształt sześciennych kryształów mają ziarna Na i K, zaś ziarna płaskie to minerały ilaste.

3.3 PARTICLE SIZE AND SHAPE

The particle size analysis of CKD using a laser diffractometer instrument shows that 50% of the CKD aggregates are finer than 15 micrometers (Fig. 3). However, the SEM image (Fig. 4) shows that the average particle size of CKD is about 0.5 micrometer. Moreover, while most particles have spherical shape, some particles have cubic crystalline shape and others are shaped like sheets. The particles were chemically analyzed using EDS-XRF; the results revealed that the spherical shape represents the lime and calcium carbonate particles, the cubic crystals represent Na and K salts, and the sheet particles represent the clay minerals.

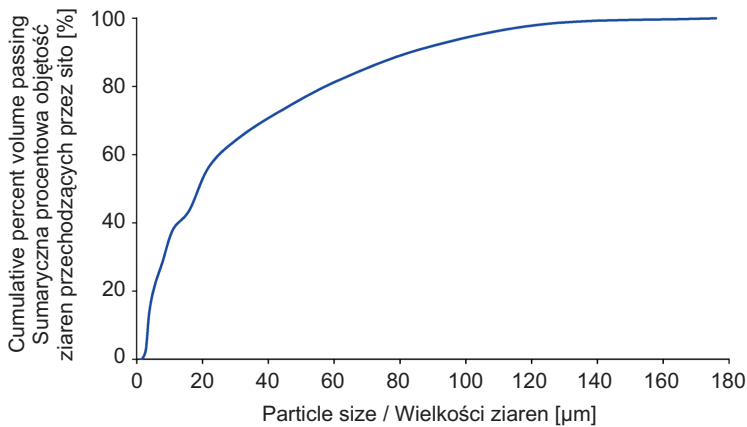


Fig. 3. CKD accumulative percent particle size distribution using laser diffractometer analyzer

Rys. 3. Sumaryczny procentowy rozkład wielkości ziaren popiołu CKD na podstawie wyników badania dyfraktometrem laserowym

3.4. BADANIA WSKAŹNIKA CBR

Analizując wykresy zależności obciążenie/przemieszczenie tłoka w badaniu wskaźnika CBR przeprowadzonym na zagęszczonej mieszance na podbudowę bez stabilizacji (0% CKD) oraz mieszankach stabilizowanych dodatkiem 5%, 15% i 25% pyłu CKD (w stosunku do suchej masy mieszanki) po 96 godz. pielęgnacji można zauważyć znaczący wzrost nośności podbudowy oraz poprawę jej właściwości mechanicznych (Rys. 5). Ponadto, jak wynika z wykresu przedstawionego na Rys. 6, dodatek pyłu CKD w ilości 5%, 15% lub 25% znacząco zwiększył wartość wskaźnika CBR zarówno przy głębokościach penetracji 2,5 mm jak i 5 mm. Przy głębokości penetracji 2,5 mm odnotowano istotny wzrost wskaźnika CBR: od 234,5% w przypadku podbudowy niestabilizowanej do 334,4%, 362,7% i 384,6% w przypadku mieszank zawierających odpowiednio 5%, 15% i 25% pyłu CKD. Duży wzrost wskaźnika CBR uzyskano również przy głębokości penetracji 5 mm: od 224,7% w przypadku podbudowy niestabilizowanej do 291,0%, 307,7% i 339,4% w przypadku mieszank zawierających odpowiednio 5%, 15% i 25% pyłu CKD. Powyższe wyniki są zgodne z wynikami badań Mahdiego i in. [22], w których częściowe zastąpienie ziaren frakcji drobnoziarnistej naturalnie występujących w pospółce (materiał podbudowy pomocniczej) pyłem CKD dodanym w ilości nie przekraczającej 20% suchej masy gruntu pozwoliło uzyskać znaczące zwiększenie wartości CBR. Widać tu wyraźnie potencjał pyłu CKD jako dodatku poprawiającego właściwości mechaniczne podbudów w nawierzchniach asfaltowych.

3.5. WYNIKI BADANIA PROCTORA

Badania Proctora i wskaźnika CBR służą określeniu optymalnej wilgotności, maksymalnej gęstości oraz nośności, jaką

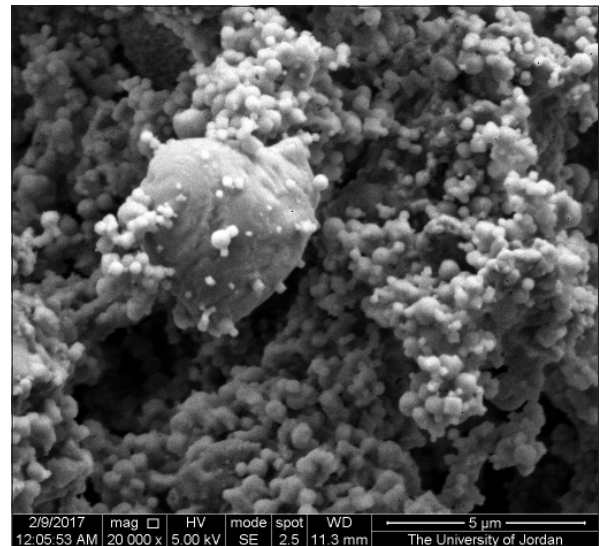


Fig. 4. SEM image of CKD at 20000× magnification

Rys. 4. Obraz popiołu CKD pod mikroskopem elektronowym przy 20000-krotnym powiększeniu

3.4. CBR TESTING

The force penetration curves from the CBR test of compacted untreated base course (0% CKD) and mixtures of base course with 5%, 15% and 25% of CKD (by dry weight of base course) after 96 hours curing time revealed a significant increase in bearing capacity of the base course and an improvement of the mechanical properties of the base course (Fig. 5). Moreover, Fig. 6 shows that addition of CKD by 5%, 15% or 25% led to a significant increase in CBR at depths of penetration of 2.5 mm and 5mm. At penetration of 2.5 mm, CBR increased significantly from 234.5% for the untreated base course to 334.4%, 362.7% and 384.6% following addition of 5%, 15% and 25% of CKD, respectively. At penetration of 5 mm, CBR increased significantly from 224.7% for untreated base course to 291.0%, 307.7% and 339.4% after the addition of 5%, 15% and 25% of CKD, respectively. These results are in agreement with Mahdi et al. [22]. The study reported that partial replacement of the natural fine particles of sand-gravel mix (subbase) by CKD (up to 20% by dry weight of soil) led to a significant increase in the CBR values. It is clear that application of CKD has high potential to enhance the mechanical properties of the base course in asphalt pavements.

3.5. PROCTOR TEST RESULTS

Proctor and CBR tests are used to determine the optimal moisture content, maximum density and bearing capacity to be applied in the design of the base and the subbase material for pavement.

przyjąć należy w projekcie dla materiału podbudowy oraz podbudowy pomocniczej nawierzchni.

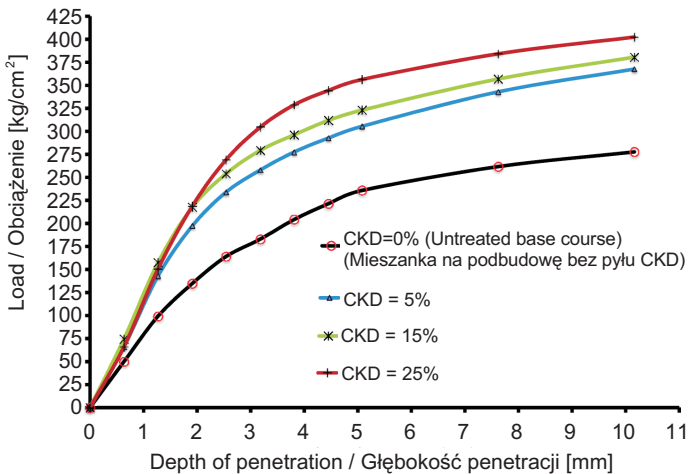


Fig. 5. Force penetration curves from California Bearing Ratio test (CBR) of compacted untreated base course (0% CKD) and mixtures of base course with 5%, 15% and 25% of CKD (by dry weight of base course)

Rys. 5. Wykresy zależności obciążenie/penetracja tłka w badaniu wskaźnika CBR przeprowadzonym na zagęszczonej mieszance na podbudowę bez dodatku pyłu (0% CKD) oraz mieszankach stabilizowanych dodatkiem pyłu CKD w ilości 5%, 15% i 25% (w stosunku do suchej masy mieszanki)

Wyniki badań Proctora wykazały spadek maksymalnej gęstości objętościowej mieszanki w stanie wilgotnym i gęstości objętościowej szkieletu gruntowego oraz wzrost wilgotności optymalnej wraz ze wzrostem proporcji dodanego pyłu CKD (Tabl. 4). Wytłumaczyć to można większym wchłanianiem wody przez pył CKD skutkującym zmniejszeniem gęstości objętościowej. Na podstawie przeglądu literatury stwierdzono zgodność uzyskanych wyników z wynikami poprzednio przeprowadzonych badań dotyczących stabilizacji gruntów piaszczystych przy wykorzystaniu popiołu CKD. W badaniach przedstawionych w literaturze uzyskano spadek gęstości szkieletu gruntowego mieszanki od $1,920 \text{ g/cm}^3$ do $1,716 \text{ g/cm}^3$ oraz wzrost wilgotności optymalnej od 9,58% do 14,52% wraz ze wzrostem zawartości pyłu CKD od 0% do 50% masy gruntu [6].

3.6. GRANICE KONSYSTENCJI ATTERBERGA ORAZ WSKAŹNIK PLASTYCZNOŚCI

Jak widać z uzyskanych wyników, zastąpienie drobnych frakcji kruszywa (przechodzących przez sito nr 40) pyłem CKD (w ilości 0%, 5%, 10%, 15% i 60%) spowodowało istotną zmianę wartości granic Atterberga (Tabl. 5). Zmniejszenie wartości wskaźnika plastyczności *PI* oraz zwiększenie granicy

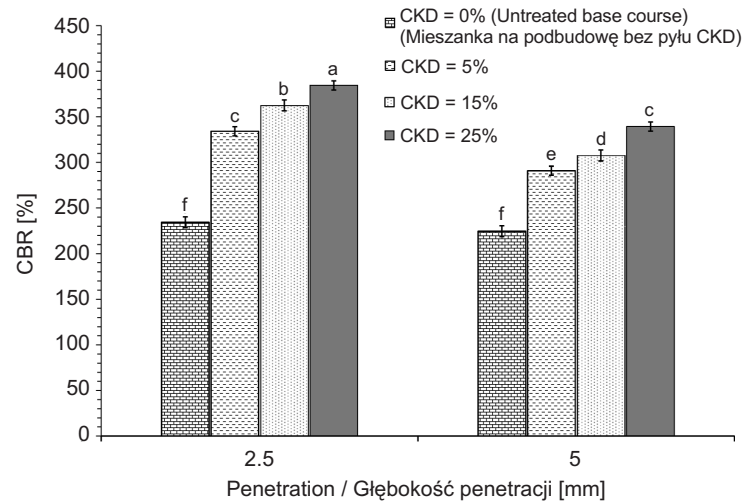


Fig. 6. California Bearing Ratio (CBR, laboratory) of compacted untreated base course (0% CKD) and a mixture of base course with 5%, 15%, and 25% of CKD (by dry weight of base course) at depth of penetration 2.5 mm and 5 mm. Columns represent mean values, bars depict standard deviations ($n=3$). Letters indicate significant differences at $p \leq 0.05$ according to Tukey's homogeneous subsets test

Rys. 6. Kalifornijski wskaźnik nośności CBR (w warunkach laboratoryjnych) oznaczony na zagęszczonej mieszance na podbudowę bez dodatku pyłu (0% CKD) oraz mieszankach stabilizowanych dodatkiem pyłu CKD w ilości 5%, 15% i 25% (w stosunku do suchej masy mieszanki) przy głębokości penetracji 2,5 mm i 5 mm. Słupki przedstawiają wartości średnie, a odcinki - odchylenia standardowe ($n=3$). Litery oznaczają istotne różnice przy $p \leq 0,05$ zgodnie z testem Tukeya (statystycznie jednorodnych podzbiorów)

The results of Proctor tests demonstrated that the maximum wet and dry density decrease, while the optimum moisture content (OMC) increases with an increase in CKD addition percentage (Table 4). One possible explanation is that the added CKD absorbed more water, which led to a decrease in density. Based on literature review, these results are in harmony with previous studies of sandy soil stabilization using CKD. The study revealed that the dry density decreased from 1.920 g/cm^3 to 1.716 g/cm^3 and the OMC increased from 9.58% to 14.52% with an increase in the CKD content from 0% to 50% by weight of soil [6].

3.6. ATTERBERG LIMITS AND PLASTICITY INDEX

The results show that replacing of fine aggregates (< mesh no. 40) by CKD (0%, 5%, 10%, 15% and 60%) led to significant change in Atterberg limits (Table 5). The plasticity of the fine aggregates was improved, since the plasticity index *PI* decreased and the plastic limit increased. Replacing

plastyczności oznacza poprawę w zakresie charakterystyki plastyczności drobnych kruszyw. Zastąpienie drobnych ziaren pyłem CKD dodanym w ilości 10% spowodowało zmniejszenie wartości wskaźnika plastyczności z 5% do 0%. Powyższe wyniki badań są spójne z wynikami poprzednich badań, m.in. przeprowadzonych przez Mahdiego i in. [22], którzy jako możliwą przyczynę spadku plastyczności wskazali cementację drobnych ziaren kruszywa przez tlenki zawarte w popiele CKD. Wynikiem tego jest zmniejszenie wilgoci pochłanianej przez te ziarna. Ponadto, wzrost zawartości pyłu z pieca cementowego powoduje zmniejszenie zawartości gliny. Innym możliwym wytłumaczeniem wyższej granicy plastyczności może być wyższa wodozgodność mieszanki wynikająca z powiększenia ilości wody potrzebnej do zmiany konsystencji mieszanki o ilość wody potrzebną do hydratacji pyłu CKD.

of fine aggregates by 10% of CKD led to reduction in the *PI* from 5% to 0%. These results are in harmony with previous studies such as Mahdi et al.[22], who reported that reduction in plasticity may be attributed to cementation effect that the oxide content of CKD has on the fine aggregates. Consequently, the amount of moisture attracted to those particles decreased. Moreover, due to the increase in cement kiln dust content, the clay content was decreased. Another possible explanation for the increase in plastic limit is that there is a greater demand for water: sufficient quantity of water is needed to satisfy hydration requirements of the CKD, plus the normal quantity of water to make the mixture change the state of consistency.

Table 4. The optimum moisture content and the maximum wet and dry density for compacted base course (0% CKD) and a mixture of base course material with 5%, 10%, 15% and 25% of CKD by weight

Tablica 4. Optymalna wilgotność oraz maksymalna gęstość objętościowa mieszanki w stanie wilgotnym oraz szkieletu gruntowego wyznaczona dla mieszanki bez dodatku pyłu (0% CKD) oraz mieszanek stabilizowanych dodatkiem pyłu CKD w ilości 5%, 10%, 15% i 25% wagowo

Parameter Parametr	Untreated base course CKD 0% Mieszanka bez dodatku pyłu CKD	Base course mixed with CKD Mieszanka stabilizowana dodatkiem pyłu			
		CKD 5%	CKD 10%	CKD 15%	CKD 25%
Wet density [g/cm ³] Gęstość objętościowa mieszanki w stanie wilgotnym	2.233	2.206	2.200	2.130	2.120
Dry Density [g/cm ³] Gęstość objętościowa szkieletu gruntowego	2.03	2.03	1.995	1.974	1.929
Optimum moisture content [%] Wilgotność optymalna	8.6	8.9	9.8	10.1	10.3

Table 5. Plastic properties of fine aggregates (< mesh no. 40) with increasing CKD percentage

Tablica 5. Zmiana parametrów plastyczności frakcji drobnych przechodzących przez sito nr 40 na skutek wzrostu zawartości procentowej pyłu CKD

CKD [%]	Fine aggregates (< mesh no. 40) [%] Ziarna drobne (przechodzące przez sito nr 40)	LL [%]	PL [%]	PI [%]
0	100	22	17	5
5	95	22	19.5	2.5
10	90	22	22	0
15	85	22	22	0
60	40	22	22	0

LL – liquid limit / granica płynności, PL – plastic limit / granica plastyczności, PI – plasticity index / wskaźnik plastyczności

4. WNIOSKI

Poniżej podano wybrane wnioski końcowe z przeprowadzonych badań.

4. CONCLUSIONS

Some concluding observations from the investigation are given below.

1. Pył CKD ma skład chemiczny analogiczny do cementu, lecz charakteryzuje się wyższą zawartością Cl i wyższą wartością strat prażenia. Na podstawie analizy obrazów z mikroskopu elektronowego ustalono, że średnia wielość cząstek pyłu CKD wynosi 0,5 μ m.
2. Zawarte w pyłe CKD metale ciężkie są rozpuszczalne. Stężenia metali ciężkich wymywanych wodą przypadają poniżej poziomu detekcji aparatu ICP. Jedną z możliwych przyczyn tego stanu rzeczy może być nierozpuszczalność tych metali w przypadku wysokiej wartości odczynu pH (12,5).
3. Pył CKD ma duży potencjał jako dodatek poprawiający właściwości mechaniczne podbudów drogowych. Wyniki badań wykazały znaczący wzrost nośności warstwy podbudowy. Odnotowano znaczący wzrost wartości wskaźnika CBR, który przy głębokości penetracji 2,5 mm wzrósł od wyjściowej wartości 234,5% do 384,6% po dodaniu pyłu CKD w ilości 25% suchej masy mieszanki na podbudowę. Wskaźnik CBR wzrósł również znacząco przy głębokości penetracji 5 mm – od 224,7% do 339,4% po dodaniu pyłu CKD w ilości 25% suchej masy mieszanki na podbudowę. Ponadto ze wzrostem zawartości pyłu CKD zmniejsza się wartość wskaźnika plastyczności.
4. Wykorzystanie pyłu CKD do stabilizacji warstw nawierzchni bardzo ułatwi cementowniom zagospodarowanie tego materiału odpadowego w bezpieczny sposób.

Reasumując, pył CKD ma duży potencjał jako dodatek poprawiający właściwości mechaniczne nawierzchni drogowych. Wykorzystanie pyłu CKD w tym zastosowaniu przyniesie wymierne korzyści ekonomiczne, a także pozwoli ograniczyć tereny przeznaczone na składowiska odpadów.

INFORMACJE DODATKOWE

Autorzy dziękują fundacji Abdul Hameed Shoman Foundation za przyznaną dotację z funduszu na rozpoczęcie badań. Bardzo doceniamy wsparcie techniczne oraz cenne merytoryczne rozmowy z pracownikami ośrodka badawczego Jordan Technical Engineering Laboratories. Podziękowania należą się także Pani Ban Ghrair z żeńskiej szkoły im. Al-Husseina \ UNRWA w Ammanie za jej udział i pomoc w przeprowadzeniu badań laboratoryjnych. Autorzy dziękują również Royal Scientific Society (RSS) oraz Al-Balqa Applied University za wsparcie w całym okresie realizacji projektu oraz Panu Kyle'owi Cordovie za edycję tekstu i udoskonalenie treści artykułu.

1. The chemical composition of CKD is similar to cement with high content of Cl and LOI. SEM images showed that the average particle size is about 0.5 microns.
2. The heavy metals in CKD are soluble. The water-leachable concentrations are below the detection limit of the ICP. One possible explanation is that these metals are insoluble at high pH (12.5).
3. CKD has high potential to enhance the mechanical properties of base course. The results showed a significant increase in the base course bearing capacity. The CBR increased significantly from 234.5% for untreated base course to 384.6% due to addition of 25% of CKD by dry weight of base course material at penetration depth of 2.5mm. The CBR also increased significantly from 224.7% for untreated base course to 339.4% after addition of 25% of CKD by dry weight of base course at penetration depth of 5mm. Moreover, the plasticity index *PI* decreased with an increase in the CKD content.
4. Introducing CKD in stabilized pavement layers will greatly help cement factories to dispose of CKD in a safe manner.

In conclusion, CKD has a good potential to enhance the mechanical properties of road pavements, as well as to provide more economical solutions and save more space in landfill disposal.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to express their gratitude to Abdul Hameed Shoman Foundation for a seed grant. The technical support and valuable discussion from Jordan Technical Engineering Laboratories is highly appreciated. Many thanks go to Ban Ghrair from Al-Husseina School for Girls \ UNRWA – Amman, for her participation and fruitful help in the laboratory experiments. The authors would also like to thank the Royal Scientific Society (RSS) and Al-Balqa Applied University for their assistance and support throughout the project as well as Mr. Kyle Cordova for text editing and improving.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] *Khudhair M.H., Elharfi A.*: Formulation of the cement kiln dust (CKD) in concrete: Studies of the physical chemical and mechanical properties. *International Journal of ChemTech Research*, **9**, 12, 2016, 695-704
- [2] Federal Highway Administration Research and Technology: User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction. Report No. FHWA-RD-97-148, 2016, <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/97148/kd1.cfm>, retrieved: 08.09.2018

- [3] *Naqi A., Jang J.G.*: Recent Progress in Green Cement Technology Utilizing Low-Carbon Emission Fuels and Raw Materials: A Review. *Sustainability*, **11**, 2, 2019, 537
- [4] *Pavia S., Regan D.*: Influence of cement kiln dust on the physical properties of calcium lime mortars. *Materials and Structures*, **43**, 2010, 381-391, DOI: 10.1617/s11527-009-9496-9
- [5] *Bhatty J.I., Bhattacharja S., Todres H.A.*: Use of Cement Kiln Dust in Stabilizing Clay Soils. RP 343, PCA Serial No. 2035, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, 1996, <https://trid.trb.org/view/572800>, retrieved 08.09.2018
- [6] *Rahman M.K., Rehman S., Al-Amoudi O.S.B.*: Literature review on cement kiln dust usage in soil and waste stabilization and experimental investigation. *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences*, **7**, 1, 2011, 77-87, www.arpapress.com/Volumes/Vol7Issue1/IJRRAS_7_1_12.pdf
- [7] *Seo M., Lee S.Y., Lee C., Cho S.S.*: Recycling of Cement Kiln Dust as a Raw Material for Cement. *Environments*, **6**, 10, 2019, 113, DOI:10.3390/environments6100113
- [8] *Miller C.T., Bensch D.G., Colony D.C.*: Use of cement-kiln dust and fly ash in pozzolanic concrete base courses, in emulsion mix design, stabilization, and compaction. *Transportation Research Record*. No. 754, 1980, 36-41, <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1980/754/754-007.pdf>
- [9] *Button J.W.*: Kiln Dust for Stabilization of Pavement Base and Subgrade Materials. Texas A&M University System College Station, Texas Transportation Institute, 2003, <https://pdfs.semanticscholar.org/9443/890115bef10aa08aa3f4d9f8e402b1d1fb7c.pdf>, retrieved: 12.10.2018
- [10] *Petry T.M.*: Investigation of agents of practical use to stabilize slopes and erosion along the I-55 corridor south of Sikeston, Missouri. Report No. RI-99-030. Missouri Department of Transportation, Jefferson City, 2001, <https://library.modot.mo.gov/RDT/reports/Ri99030/RDT01006.pdf>, retrieved: 10.10.2018
- [11] *Kumar A., Singh A.K.*: Stabilization of Soil using Cement Kiln Dust. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, **6**, 6, 2017, 11631-11637, http://www.ijirset.com/upload/2017/june/80_19_Stabilization.PDF
- [12] *Baghdadi Z.A., Fatani M.N., Sabban N.A.*: Soil Modification by Cement Kiln Dust. *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, **7**, 4, 1995, 218-222
- [13] *Mosaa A.M., Taherb A.H., Al-Jaberib L.A.*: Improvement of poor subgrade soils using cement kiln dust. *Case Studies in Construction Materials*, **7**, 2017, 138-143, DOI: 10.1016/j.cscm.2017.06.005
- [14] *Owsiak Z., Czapiak P., Zapala-Slaweta J.*: Testing the cement, hydrated lime and cement by-pass dust mixtures hydration. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **19**, 2, 2020, 135-147, DOI: 10.7409/rabdim.020.009
- [15] *Adlinge S.S., Gupta A.K.*: Pavement Deterioration and its Causes. Second International Conference on Emerging Trends in Engineering (SICETE), *IOSR Journal of Mechanical & Civil Engineering (IOSR-JMCE)*. 2009, 9-15, [http://iosrjournals.org/iosr-jmce/papers/sicete\(civil\)-volume6/60.pdf](http://iosrjournals.org/iosr-jmce/papers/sicete(civil)-volume6/60.pdf)
- [16] ASTM D1557-12 Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil. (Withdrawn 2018)
- [17] ASTM D2216-10 Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass. (Withdrawn 2017)
- [18] ASTM D1883-16 Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils. (Withdrawn 2018)
- [19] ASTM D4318-00 Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. (Withdrawn 2018)
- [20] *Adaska W.S., Taubert D.H.*: Beneficial uses of cement kiln dust. IEEE/PCA 50th Cement Industry Technical Conference, IEEE, Miami, 2008, 210-228, <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.465.2054&rep=rep1&type=pdf>
- [21] *Al karagooly Y.H.J.*: Effect of Cement Kiln Dust on Some Properties of Soil. *Journal of Babylon University/Engineering Sciences*, **20**, 4, 2012, 1150-1156, <https://www.iasj.net/iasj?func=fulltext&aId=77523>
- [22] *Mahdi Z.A., Hasan M.A., Jasim H.A.*: Assessment of Using Cement Kiln Dust Stabilized Roads Subbase Material. *International Journal of Engineering & Technology*, **7**, 4, 2018, 162-165, DOI: 10.14419/ijet.v7i4.20.25919