

# Stabilizacja pęczniejącej ziemi w celu wykonywania budowli z ziemi

## Stabilization of the swelling soil for earth construction

Hanaa Youssef Ghorab<sup>1,2\*</sup>, Ahmed Hassan Eid Hassan<sup>1</sup>, Hosam El Din Hassan Ahmed<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Science, Helwan University, Cairo, Egypt

<sup>2</sup> G&W Science and Engineering, Cairo, Egypt

<sup>3</sup> Faculty of Engineering, Shoubra - Banha University, Cairo, Egypt

\*Corresponding author: H.Y. Ghorab, e-mail: hanaa.ghorab@gmail.com

### Streszczenie

Przeprowadzone badania dotyczą metod odlewania budowli z ziemi, jako część programu badawczego poświęconego budowlom ziemnym. Badano wpływ dwóch inhibitorów pęcznienia ziemi zawierającej glinę: poli(tlenku etylenu) [PTE] i karboksymetylocelulozę [KMC], aby była możliwa jej stabilizacja cementem CEM I 42,5N. Ziemię zawierającą 14% gliny, kwarc i kalcyt, stabilizowano 10% dodatkiem cementu. Dodawano równocześnie 3% plastyfikatora polikarboksydanowego w stosunku do masy cementu, aby ziemia uzyskała zdolność do płynięcia. Uzyskane wyniki wykazały, że PTE i KMC – inhibitory pęcznienia gliny, zmniejszyły to pęcznienie o około 30% i 40%, przy czym maksymalne pęcznienie odpowiadało po 90 dniach odpowiednio 24% i 46% wytrzymałości na ściskanie. Omówiono interakcję gliny z cementem i inhibitorami pęcznienia. Znalezione zależności pozwoliły na korzystne zastosowanie tych materiałów do wytwarzania elementów budowlanych, zastosowanych we wznoszeniu budynków na obszarach pustynnych.

**Słowa kluczowe:** konstrukcje ziemne, ziemia, glina, stabilizacja cementem, inhibitory pęcznienia

### Summary

This study is concerned with the method of cast earth as part of an investigation series on earth construction. The effect of two clay swelling inhibitors; polyethylene glycol [PEG] and of carboxymethyl cellulose [CMC] on the swelling of a clay-bearing soil are studied to enable the stabilization of the soil with CEM I 42.5 N. The soil composed of 14% clay, quartz, and calcite, is stabilized with 10% cement. 3% polycarboxylate superplasticizer is added relative to the mass of the cement, to gain the soil pourable properties. The results show that the PEG and CMC clay-swelling inhibitors reduce the expansion of the soil by ~30 and ~40% and lead to a maximum increase of 24 and 46% in the 90-day compressive strength respectively. The interactions between clay, cement, and swelling inhibitors are discussed. The findings allow advantageous applications for producing building units for construction purposes in desert areas.

**Keywords:** earth construction, soil, clay, cement stabilization, swelling inhibitors

## 1. Wprowadzenie

Konstrukcje z ziemi są znane od dziesięcioleci. Około trzydzieści procent populacji na ziemi, szczególnie zamieszkanej w obszarach podmiejskich w rozwijających się krajach, mieszka w domach z ziemi. W tym celu, ziemia z różnych obszarów skorupy ziemskiej, musi podlegać stabilizacji. Ta pochodząca na przykład z obszarów, w których występuje masowo błoto, jest stabilizowana miejscowymi materiałami, na przykład słomą, w celu zmniejszenia rozszerzalności. Równocześnie jest chroniona przed wodą. Natomiast

## 1. Introduction

Earth construction is known for decades. Around thirty percent of the world population, especially those in suburban areas of the developing countries, live in earth buildings. For this purpose, the soils provided from different locations of the earth's crust need to be stabilized. Those found in mud-rich regions, for example, are conventionally stabilized by natural materials such as straw to reduce expansion while avoiding its exposure to water. Treatment of the sandy soils in desert areas which often contain clay is different.

przygotowanie ziemi piaszczystej na terenach pustynnych, które często zawierają glinę, jest inne.

Obszary pustynne dominujące na terytorium egipskim należą do interesujących obszarów z punktu widzenia zwiększania budownictwa domów. Sprężane bloki z ziemi (1-3) i ubijana ziemia (4-6) są powszechnie stosowanymi technikami w budownictwie z ziemi. Metody odlewanych konstrukcji ziemnych są stosunkowo mniej znane, jednak były popularne dawniej, w szeregu realizacji (7-14).

W związku z tym wprowadzono w 2016 roku Egipski Kod „Budownictwo z prasowanej ziemi” (15). Kod dotyczy stabilizacji piaszczystej ziemi cementem portlandzkim i innymi spoiwami hydraulicznymi. Kod ogranicza maksymalną zawartość gliny w ziemi do 5%, gdyż uważa się, że większa ilość uniemożliwiła proces stabilizacji.

W oparciu o te dane podjęto badania metod zapobiegających pęcznieniu gliny zawartej w ziemi i umożliwiającej zastosowanie ilastej ziemi w takim budownictwie. W pracy skupiono się na technice odlewania, której poświęcono kilka wcześniejszych badań (10,12,13).

## 2. Materiały i metody

Stosowano cement CEM I 42,5N, otrzymany z Suez Cement Company w Egipcie. Analizę chemiczną tego cementu wykonano metodą fluorescencji rentgenowskiej, a skład fazowy obliczono metodą Bogue'a (16).

Ziemia pochodziła z Mersa Matrouh, położonej w zachodniej części Egiptu. Jej skład mineralny oznaczono rentgenograficznie.

Skład ziarnowy i zawartość gliny w ziemi oznaczono za pomocą hydrometru. Jej zawartość wody, plastyczność i wskaźnik plastyczności, oznaczono zgodnie z normami ASTM D 2487 i AASHTO M 145. Zawartość siarczanów i chlorków oznaczono mokrą analizą chemiczną.

Zdolność ziemi do wymiany kationów zbadano stosując papierek lakmusowy i błękit metylenowy, zgodnie z normą ASTM C 837 - 09 (17): Przygotowano szlam odważając 10 g ziemi w 600 ml zlewce i wlewając 300 ml wody destylowanej. pH szlamu ustawiono na poziomie 2,5 do 3,8 za pomocą kwasu solnego. Następnie dodano 5 ml błękitu metylenowego, z kalibrowanej biurety. Kroplę szlamu umieszczono na papierku lakmusowym i stwierdzono jaki kolor powstał wokół tej kropli. Ten proces powtórzono w przypadku 1 ml roztworu błękitu metylenowego, powtarzając tę czynność aż do utworzenia jasno błękitnego „halo”, wyznaczającego koniec pomiaru.

Z firmy Sigma Aldrich Company otrzymano dwa inhibitory pęcznienia: jednym był poli(tlenek etylenu) [PTE] o masie cząsteczkowej 6000 g/mol, drugi solą sodową karboksymetylocelulozy [KMC], o czystości 97% i 9,7% zawartości wilgoci. Jego pH było 7,4, a stopień podstawienia 1,2%.

Desert areas dominate the Egyptian territories and represent an interesting issue for extending the housing projects in the country. Compressed earth blocks (1-3) and rammed earth (4-6) are common techniques for erecting buildings with soil in earth construction. The methods of cast earth are relatively less known but were explored lately in a number of works (7-14).

Within this context, an Egyptian code for “construction with compressed stabilized soil” was issued in 2016 (15). The code deals with the stabilization of sandy soil with Portland cement and latent hydraulic materials. The code limits the maximum clay content in the soil by 5%, higher amounts are believed to limit the stabilization process and hinder the construction projects.

Based on these data a study is carried out to find ways of inhibiting the swelling effect of the clay in the soil and enable the use of the clay-bearing soils in earth construction. The work focuses on the technique of casting within a series of investigations reported earlier (10, 12, 13).

## 2. Materials and methods

CEM I 42.5 N was obtained from the Suez Cement Company in Egypt. The oxide composition was determined by X-ray fluorescence and the respective phases were calculated according to Bogue's equation (16).

A soil was provided from Mersa Matrouh, at the western side of Egypt. Its mineralogical composition was identified by X-ray diffraction analysis.

The particle size distribution and the clay content of the soil were determined with the help of a hydrometer. Its liquid limit, plastic limit, and plasticity index were measured according to ASTM D 2487 & AASHTO M 145. The amount of sulfate and chloride was estimated wet chemically.

The cation exchange capacity of the soil was measured using methylene blue method according to ASTM C 837 - 09 (17) as follows: A slurry was prepared by weighing 10 g of the soil in a 600 ml beaker, followed by 300 ml distilled water. The pH-value of the slurry was adjusted to 2.5 - 3.8 with sulfuric acid. 5 ml methylene blue indicator was then added from a burette with stirring. A drop of the slurry was placed on the edge of a filter paper and the color formed around the drop was examined. This procedure was repeated with 1.0 ml of the methylene blue solution until a light blue halo was formed around the drop, indicating the endpoint.

Two clay swelling inhibitor reagents were supplied from Sigma Aldrich Company: 1) a polyethylene glycol [PEG] of molecular mass 6000 g/mole, 2) the sodium salt of carboxymethyl cellulose [CMC] of 97% purity, and 7.1% moisture content. Its pH-value was 7.4 and had a degree of substitution of 1.2%.

The as-received soil was treated with the swelling inhibitors as follows: 0.5-1.5% by mass, of the glycol, and 0.5-3% by mass of the cellulose reagents were separately weighed relative to the weight

Ziemię w stanie dostawy zadano inhibitorami pęcznienia w takiej kolejności: 0,5 -1,5% mas. poli(tlenku etylenu) [PTE] i 0,5 – 3% mas. karboksymetylocelulozy w stosunku do ziemi, przy czym zostały zważone oddzielnie. Każdy inhibitor rozpuszczono w wodzie w ilości odpowiadającej stosunkowi woda/ziemia wynoszącej 1:4. Dodawano je w formie roztworów do ziemi w mechanicznym mieszalniku i mieszano 30 minut. Otrzymane mieszaniny suszono w 100°C i mieszano w porcelanowym moździerzu.

Optymalne stężenie reagentów, które powinny zapobiegać procesowi pęcznienia gliny w ziemi, oznaczano dwoma metodami: 1) przeprowadzając analizę rentgenowską, za pomocą której ustalano wpływ inhibitora na strukturę gliny w ziemi, 2) mierząc wskaźnik swobodnego pęcznienia ziemi zgodnie z normą indyjską (IS: 2720, Part XL, 1977) następująco (18): 10 g ziemi w stanie dostawy o wymiarach cząstek mniejszych od 0,42 mm umieszczano w 100 ml szklanym cylindrze z podziałką, wypełnionym destylowaną wodą, a taką samą masowo ilość wlewano równocześnie do drugiego cylindra, wypełnionego benzyną. Zawiesiny mieszano szklanym prętem w celu usunięcia więzione powietrze, pozostawiano na 24 godziny w celu osiągnięcia stanu równowagi i mierzono objętość ziemi w każdym cylindrze. Czynności te powtarzano z ziemią, do której dodano różne ilości inhibitorów pęcznienia. Oceniano procent wskaźnika swobodnego pęcznienia, stosując podane równanie. Najbardziej korzystne stężenie stosowanych reagentów odpowiadało najmniejszej wielkości swobodnego wskaźnika pęcznienia.

$$\text{Wskaźnik swobodnego pęcznienia (\%)} = \left( \frac{V_d - V_k}{V_k} \right) \cdot 100 = \quad (1)$$

gdzie:

$V_d$  - objętość ziemi oznaczona w cylindrze z podziałką, zawierającego destylowaną wodę,

$V_k$  - objętość ziemi oznaczona w cylindrze zawierającym benzynę.

10% mas. cementu dodano do ziemi w stanie dostawy, a inne dwie próbki przygotowano w ten sposób, że oprócz tej samej ilości cementu dodano dwa inhibitory pęcznienia, w oznaczonej, optymalnej ilości.

Płynność ziemi z cementem, bez dodatków i z inhibitorami, zbadano stosując stolik rozplływowy (19). Ponadto dodawano rynkowy superplastyfikator polikarboksyłanowy [SP], Master Glenium ACE 457. Jego pH wynosiło 7,5; gęstość 1,1 g/cm<sup>3</sup>, a lepkość 135 cpuazów.

Bez dodatku SP trzeba było dodawać wodę w celu osiągnięcia średnicy rozplwyu wynoszącą 16 cm, jako wartość minimalną, warunkującą odlanie mieszanki. Zastosowano więc stosunek woda/ziemia równy 0,21 w przypadku mieszanek z ziemi nie poddanej obróbce i 0,175 oraz 0,169 dla mieszanek ziemi z dodanymi odpowiednio reagentami PTE i KMC.

Dodatek superplastyfikatora SP, w ilości odpowiedniej dla odlewania i wlewania mieszanki ziemi powodował średnicę rozlewu ~20 cm (20). Optymalne stężenie domieszki oszacowano mierząc

of the soil, and each concentration was dissolved in an amount of water, equivalent to a water/soil ratio of 1:4. The individual reagent solutions were gradually added to the soil in a mechanical mixer while stirring for 30 minutes. The resulting mixes were dried one day at 100°C and ground in a porcelain mortar.

The optimum concentrations of the reagents, needed to inhibit the swelling properties of the clay in the soil, were determined by two ways: 1) using the X-ray diffraction analysis technique to identify the effect of the inhibitor on the structure of the clay in the soil, 2) by measuring the free swelling index of the soil according to the Indian standard IS: 2720, Part XL, 1977, as follows (18): 10 g of the as-received soil with particle size less than < 0.42 mm were added to a 100 ml graduate glass cylinder filled with distilled water and an equal mass was parallel poured to a second cylinder, filled with kerosene. The suspensions were stirred gently with a glass rod to remove the entrapped air, left 24 hours to attain the state of equilibrium and the volume of the soil in each cylinder was recorded. The procedure was repeated with the soil treated with different concentrations of the swelling inhibitor reagents. The percent of the free swell index was evaluated according to the given equation. The optimum concentration effective from the reagent used, was the lowest value for the free swell index.

$$\text{Free swell index (\%)} = \left( \frac{V_d - V_k}{V_k} \right) \cdot 100 \quad (1)$$

where:

$V_d$  - the volume of soil read from the graduated cylinder containing distilled water,

$V_k$  - the volume of soil read from the graduated cylinder containing kerosene.

10% by mass of the cement stabilizer was added to the soil as-received and another two samples were prepared with 10% of cement and the soil treated with the two swelling inhibitors in optimum concentrations, as determined.

The fluidity of the non-treated and treated soil/cement mixes was performed without and with superplasticizer by the Mortar Flow Table Apparatus [MFTA] (19). The admixture used was a commercial polycarboxylate superplasticizer [SP], Master Glenium ACE 457, provided from the local market. Its pH-value was 7.5, had a density of 1.1 g/cm<sup>3</sup>. and a viscosity of 134 cps.

In the absence of superplasticizer, the addition of water was necessary to reach a flow diameter of 16 cm, as a minimum value capable to cast the mixes. A water/solid ratio of 0.21 was therefore used for the mixes prepared from the non-treated soil mix, and of 0.175, 0.169 for the mixes of soils treated with the PEG and the CMC reagents respectively.

In the presence of superplasticizer, a dosage suitable for casting and pouring the soil mixes was that of realizing a flow diameter of ~20 cm (20). The optimum concentration of the admixture was estimated by measuring the flow diameter with the addition of SP equal to 1, 2, and 3% by mass of cement.

średnicę rozplywu z dodatkiem SP, wynoszącym 1,2 i 3% mas. cementu.

Proces mieszania przebiegał następująco: 2/3 wody zarobowej dodawano do składników stałych i mieszano ciężkim mieszadłem mechanicznym kilka minut, następnie dodawano pozostałą 1/3 wody z SP i mieszano następne 2 minuty. Pozostawiano mieszaninę na krótko w bezruchu, zmieszano i wylewano do stożka na stoliku rozplywowym. Gwałtownie opróżniano stożek i obliczano średnią ze średnic rozplywowych. Następnie mieszaninę pozostawiano w bezruchu, kolejno na 30, 60 i 90 minut. W oznaczonym czasie mieszano ją przez 2 minuty umieszczano ponownie w stożku i mierzono średnicę rozplywu.

Zmiany długości próbek o wymiarach 4 cm x 4 cm x 16 cm, wykonanych z poddawanych i nie poddawanych obróbce mieszanek, złożonych z ziemi, cementu i SP, mierzono po 3, 7, 14, 28 i 90 dniach, zgodnie z normą ASTM C490-93a (21). Próbki wyjmowano z form po 2 dniach i umieszczano w wodzie w okresie wszystkich pomiarów.

Próbki w formie kostek o wymiarach 5x5x5 cm przygotowano z tych samych mieszanek do pomiarów wytrzymałości na ściskanie po 7, 28 i 90 dniach, zgodnie z normą ASTM C109 / C109M-13 (22). Próbki dojrzewały w wilgotnym środowisku i były cały czas przykryte, aż do przeprowadzenia pomiarów.

### 3. Wyniki

Tablica 1a / Table 1a

ANALIZA CHEMICZNA CEM I 42,5 N

CHEMICAL ANALYSIS OF CEM I 42.5 N

Cement	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Cl <sup>-</sup>	F.L.*	L.O.I
CEM I 42.5 N	20.42	4.70	3.42	61.51	2.28	0.27	0.31	3.35	0.04	1.32	3.7

\*wolne wapno / free lime

Skład chemiczny cementu oznaczony za pomocą fluorescencji rentgenowskiej podano w tablicy 1a, natomiast obliczony na jej podstawie skład fazowy z zastosowaniem wzorów Bogue'a podano w tablicy 1b.

Na rys. 1 pokazano rentgenogram ziemi w stanie dostawy. Widoczny jest refleks montmorillonitu, M przy 12,3 Å. Kalcyt (CC) i kwarc (Q) były głównymi krystalicznymi składnikami ziemi. Oznaczono zdolność wymiany jonowej, która wynosiła 23 mg/100 g gliny, a jej zawartość soli była równa 1,32% SO<sub>3</sub> i 1% Cl.

Zmierzony skład ziarnowy ziemi zamieszczono na rysunku 2. Wynik ten pokazuje, że wymiar około 20% ziaren w ziemi jest mniejszy od 0,1 mikrona i, że zawartość gliny wynosi 14%. Glinę zaliczono do „gliny ubogiej w piasek”, zgodnie z normą ASTM D 2487 i jako „A-6 gliniasta ziemia” zgodnie z AASHTO M 145. Jej granica ciecicy [L L], granica plastyczności [GP] i wskaźnik plastyczności wynosiły odpowiednio: 27,11%, 1607% i 11,04%.

The mixing process was as follows: 2/3 of the mixing water was added to the solid components and was mixed with a heavy-duty mechanical agitator for few minutes, the remaining one-third of water with superplasticizer, was added and mixed for another 2 minutes. The mixes were allowed to stand shortly, remixed then poured into the cone of the flow table. The cone was quickly emptied and the average of the flow diameters of the poured samples was recorded. The mixes were left to stand for 30, 60, and 90 minutes. At the determined time, they were remixed for 2 minutes, poured again into the cone, and the flow diameters were registered.

The length change of 4x4x16 cm prisms samples, prepared from the non-treated and treated soil/cement/superplasticizer mixes was recorded after 3, 7, 14, 28, and 90 days according to ASTM C490-93a (21). The prisms were demolded after 2 days, and were immersed in water throughout the measurements.

The 5 cm x 5 cm x 5 cm cubic molds were prepared from the same mixes to measure the compressive strength, after 7, 28, and 90 days according to ASTM C109 / C109M-13 (22). The samples were cured humid and kept covered up to the measurements.

### 3. Results

The chemical analysis of the cement as determined by means of X-ray fluorescence is given in Table 1a, the respective phases calculated according to Bogue's equations are further shown in Table 1b.

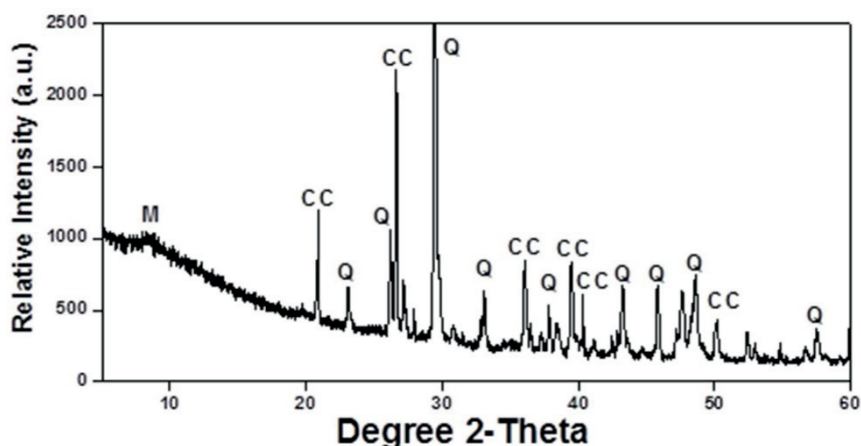
Tablica 1b / Table 1b

SKŁAD FAZOWY CEMENTU

PHASE COMPOSITION OF CEMENT

C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
48	25	7	10

In Fig. 1 the XRD pattern of soil as-received is shown, where the mild content of montmorillonite [M] was found as a pick at 12.3 Å. Calcite [CC] and quartz [Q] were the main crystalline constituents of the soil. The cation exchange capacity of the soil was found to be equal to 23 mg/ 100 g of clay and its salt content was 1.32% SO<sub>3</sub> and 1% Cl.

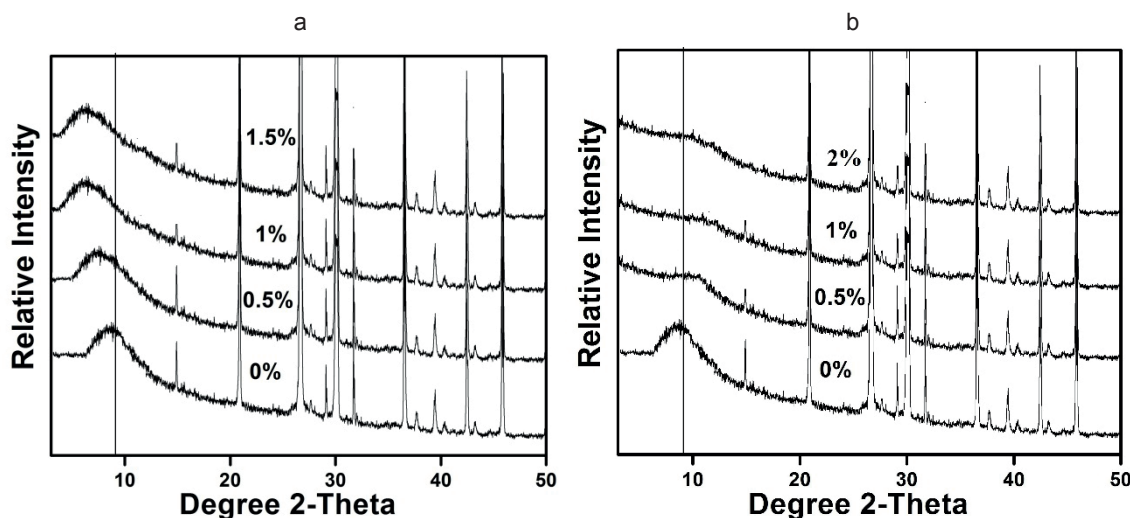


Rys. 1. Rentgenogram ziemi w stanie dostawy. M = montorillonit, Q = kwarc, CC = Kalcyt

Fig. 1. The XRD pattern of the soil as-received. M = Montmorillonite, Q = Quartz, CC = Calcite

Na rysunku 3 pokazano zmiany rentgenogramu ziemi w stanie dostawy, umieszczając obok niego rentgenogram ziemi poddanej działaniu inhibitorów pęcznienia. Rentgenogramy pokazano w większej skali na osi rzędnych, pokazującej względną intensywność refleksów, w celu uwypuklenia głównych pików montmorillonitu.

Na rentgenogramach ziemi, do której dodano 0,5% i 1% poli(tlenku etylenu), refleks montmorillonitu został przesunięty z 12,3 Å do 16 i 17,7 Å i nie zmienił już położenia przy większym stężeniu tej domieszki, aż do 1,5% mas. [rysunek 3a]. Dodanie do ziemi 1% poli(tlenku etylenu) przyjęto w związku z tym jako dodatek optymalny w dalszych doświadczeniach. Trzeba podkreślić, że główny refleks montmorillonitu przypadający przy 12.3 Å, zajmował mniejsze położenie w miarę zwiększania dodatku karboksymetylocelulozy, w zakresie do 2%. Przy tym dodatku refleks ten przesunął się nieznacznie do większej wartości 2θ, wynoszącej ~10° i przyjmował formę słabego przegięcia – rysunek 3b. Ten dodatek domieszki przyjęto jako optymalny, w dalszych doświadczeniach.

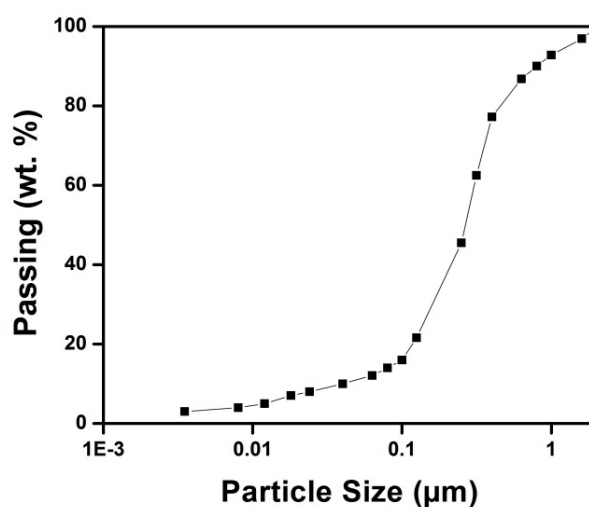


Rys. 3. Wpływ dodatku: a) poli(tlenku etylenu), b) karboksymetylocelulozy na rentgenogramy ziemi w stanie dostawy

Fig. 3. The effect of a) polyethylene glycol [PEG], b) carboxymethyl cellulose [CMC] on the X-ray diffraction pattern for as-received soil

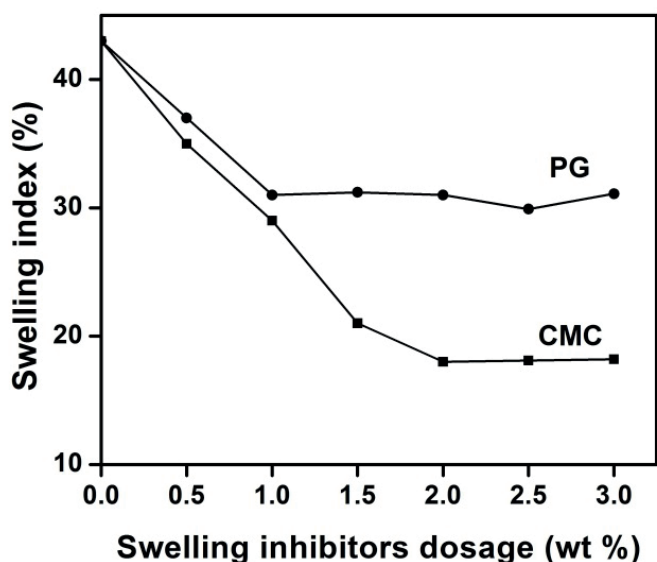
The measured particle size distribution of the soil is depicted in Fig.2. The results are showing that the size of around 20% of the soil grains is lower than 0.1 mm and that the clay portion represents 14%. The soil was classified as “the sandy lean clay”, according to ASTM D 2487 and as “A-6 clayey soils” according to AASHTO M 145. Its Liquid Limit [L.L.], Plastic Limit (P.L.), and Plasticity index were equal to 27.11, 16.07, and 11.04% respectively.

In Fig 3 the change of the XRD patterns of the as-received soil plotted beside those of the soil treated with the inhibitor reagents. The plots are designed at a wider scale of the y-axis representing the relative intensity, to clarify the shift in the main d-value line of the montmorillonite phase.



Rys. 2. Krzywa rozkładu ziarnowego ziemi w stanie dostawy

Fig. 2. The particle size distribution of the soil as-received



Rys. 4. Wpływ inhibitorów na wskaźnik skurczu ziemi w stanie dostawy; PG – poli(tlenek etylenu), CMC – karboksymetyloceluloza

Fig. 4. The effect of the swelling inhibitors on the swelling index of as-received soil (PG – Polyethylene glycol, CMC – Carboxymethyl cellulose)

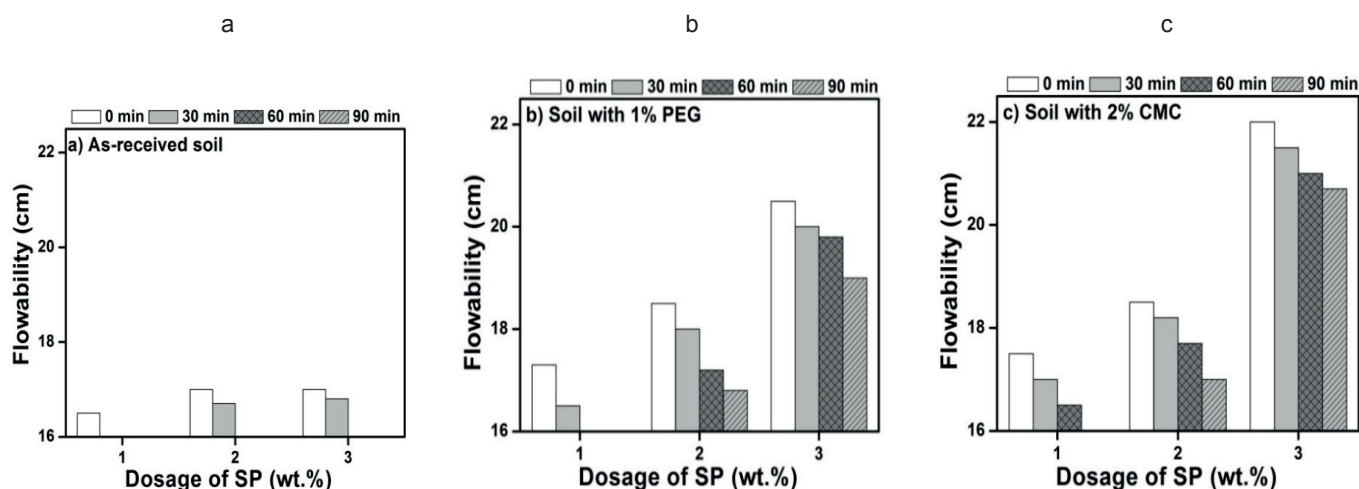
Na rysunku 4 pokazano wpływ dwóch inhibitorów na wolny wskaźnik pęcznienia ziemi w stanie dostawy. Wyniki wskazują na słabszy zmniejszający wpływ na ten wskaźnik poli(tlenku etylenu), w porównaniu do karboksymetylocelulozy. Najmniejsze stwierdzone wielkości pokazują spadek ~30%, i 60% przy dodatku 1 i 2% odpowiednio tych dwóch domieszek. Te dodatki zgadzały się dobrze z rentgenogramami i uznano je jako optymalne, w celu zapobiegania pęcznieniu gliny, zawartej w ziemi.

W przypadku płynności ziemi superplastyfikator nie wykazał dużej poprawy dla mieszaniny ziemi z cementem, bez dodatku inhibitorów – rysunek 5a. Ten rysunek pokazuje jasno, że początkowa średnica rozplwyu pozostaje w zakresie 16 do 17 cm ze wzrostem SP do 3% i ten rozplwy pozostaje niezmienny przez maksymalnie

In the XRD of soil treated with 0.5 and 1% by mass of polyethylene glycol, the pick of the montmorillonite was shifted from 12.3 Å to 16 and 17.7 Å. and remains unchanged at a higher concentration than 1.5% by mass [Fig. 3a]. Treatment of the soil with 1% polyethylene glycol was therefore taken as the optimum value for the planned investigations. On the other hand, the main pick of montmorillonite in the non-treated soil identified at 12.3 Å is replacing to lower values with increasing addition of carboxymethyl cellulose [CMC] to 2%. At this concentration, the peak shifts slightly to a higher 2 theta value of ~10° and appears as a weak hump [Fig. 3b]. This dosage was considered as optimum for the next measurements.

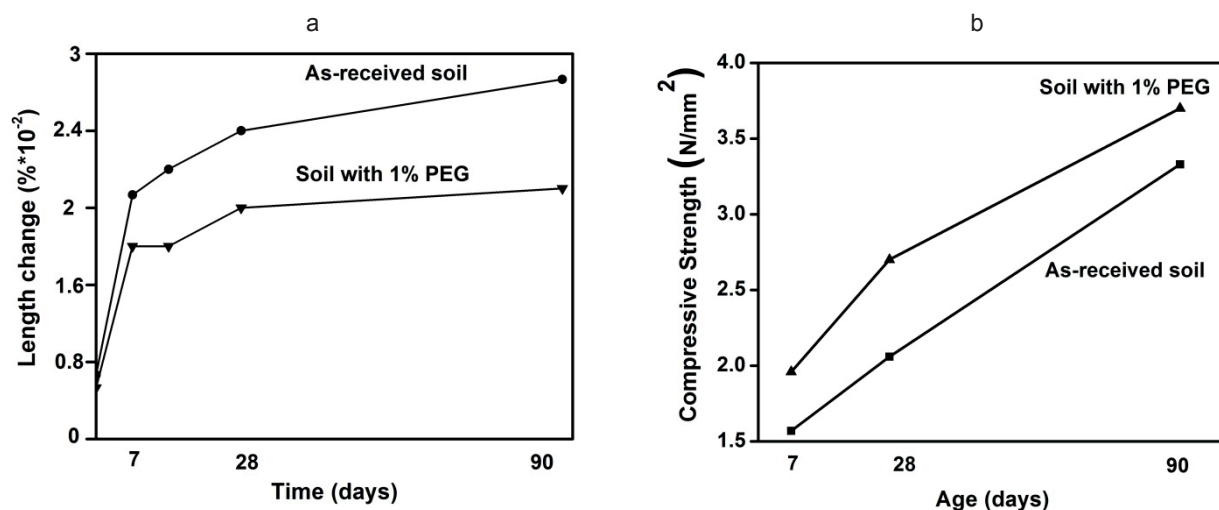
Fig. 4 illustrates the effect of the two inhibitor reagents on the free swelling index of the as-received soil. The results show a weaker inhibiting effect of the PEG, compared to that of the CMC. The minimum values recorded represent a decrease of ~30%, and 60% upon treatment with 1 and 2% PEG and CMC respectively and remain constant at higher dosages. These dosages were in accordance with the findings of the XRD patterns and were considered as optimum values for inhibiting the swelling of the clay in the soil.

With respect to the fluidity of the soil, the superplasticizer showed no significant improvement of the non-treated soil/cement mix [Fig. 5a]. It is clear from the figure that the initial flow diameter remains within 16 to 17 cm with increasing the superplasticizer dosage to 3%, and this value is retained for a maximum of 30 minutes. On the other hand, the fluidity of the soil treated with 1% PEG and stabilized with cement mix improves with increasing superplasticizer dosage [Fig. 5b]. At a dosage of 3% SP, the initial flow diameter increases by 18%, and the highest value of 20 cm is recorded. The fluidity is retained over 90 minutes and undergoes a small drop of 7%. A better effect is, however, detected on the fluidity of the soil treated with 2% CMC and stabilized with cement. An increase of 26% is observed in the initial flow diameter at a dosage of 3% with a value of 22 cm [Fig. 5c]; this value decreases to 20 cm over a retention time of 90 minutes.



Rys. 5. Wpływ SP na: a) ziemi w stanie dostawy z dodatkiem cementu, b) ziemi z cementem i z 1% dodatkiem poli(tlenku etylenu), c) ziemi z cementem z 2% dodatkiem karboksymetylocelulozy.

Fig. 5. The effect of polycarboxylate superplasticizer [SP] on a) the as-received soil/cement mix, b) the soil treated with 1% PEG / cement mix, c) soil treated with 2% CMC / cement mix.



Rys. 6. Wpływ poli(tlenku etylenu) na: zmianę długości i b) na wytrzymałość na ściskanie mieszanki ziemi z cementem z dodatkiem SP w funkcji czasu  
 Fig. 6. Effect of polyethylene glycol [PEG] on a) the length change and b) the compressive strength of the soil/ cement mix/ SP as a function of time

30 minut. Natomiast płynność ziemi z dodatkiem poli(tlenku etylenu) i cementu ulega poprawie z rosnącym dodatkiem SP – rysunek 5b. Dodatek 3% SP początkowa średnica rozplywu wzrasta o 18% i największa zmierzona średnica wyniosła 20 cm, a taka płynność utrzymywała się przez 90 minut, po czym wystąpił mały spadek wynoszący 7%. Natomiast lepszy wynik dotyczący płynności ziemi uzyskano w przypadku 2% dodatku karboksymetylocelulozy, przy równoczesnej stabilizacji cementem. Stwierdzono wzrost wynoszący 26% w przypadku początkowej średnicy rozplywu i dodatku wynoszącym 3%, który wyniósł 22 cm – rysunek 5c. Ten rozplyw zmalał do 20 cm, po 90 minutach.

Stwierdzono korzystny wpływ dodatku 1% poli(tlenku etylenu) na zmianę długości ziemi w stanie dostawy, który spowodował 30% spadek ekspansji po 90 dniach – rysunek 6a. Wytrzymałość na ściskanie kostek była większa od niezawierającej dodatków ziemi maksymalnie o ~ 24% i jej wytrzymałość po 90 dniach wyniosła ~3.5 N/mm<sup>2</sup> – rysunek 6b. Szybkość wzrostu wytrzymałości nieznacznie spadła po 28 dniach.

Wpływ 2% dodatku karboksymetylocelulozy na zmiany długości i wytrzymałość na ściskanie ziemi pokazano na rysunku 7. Silniejszy wpływ KMC na skurcz ziemi w porównaniu do poli(tlenku etylenu) zaznaczył się większym zmniejszeniem długości, osiągającym ~40% po 90 dniach – rysunek 7a. Wytrzymałość na ściskanie próbek z dodatkiem karbometylocelulozy wykazała maksymalny wzrost ~ 46% i wytrzymałość 3,9 N/mm<sup>2</sup> po 90 dniach. Podobnie jak w przypadku poli(tlenku etylenu) szybkość wzrostu wytrzymałości zmniejszyła się nieznacznie po 28 dniach.

#### 4. Dyskusja

Przeprowadzone doświadczenia obejmowały wieloskładnikowe układy, w których glina odgrywała wiodącą rolę. W dyskusji krótko przedstawimy różne interakcje gliny z wodą, cementem, z inhibitorami skurczu i superplastyfikatorem, w celu zrozumienia dorobku naukowego tej pracy.

The length change of the as-received soil is seen to be positively affected by 1% PEG and shows a decrease of the expansion values by 30% after 90 days [Fig. 6a]. The compressive strength of the cubic samples exceeds those of the untreated soil by a maximum of ~ 24% and shows a 90-day value of ~3.5N/mm<sup>2</sup> [Fig. 6b]. The rate of increase in strength is seen to decline slightly after 28 days.

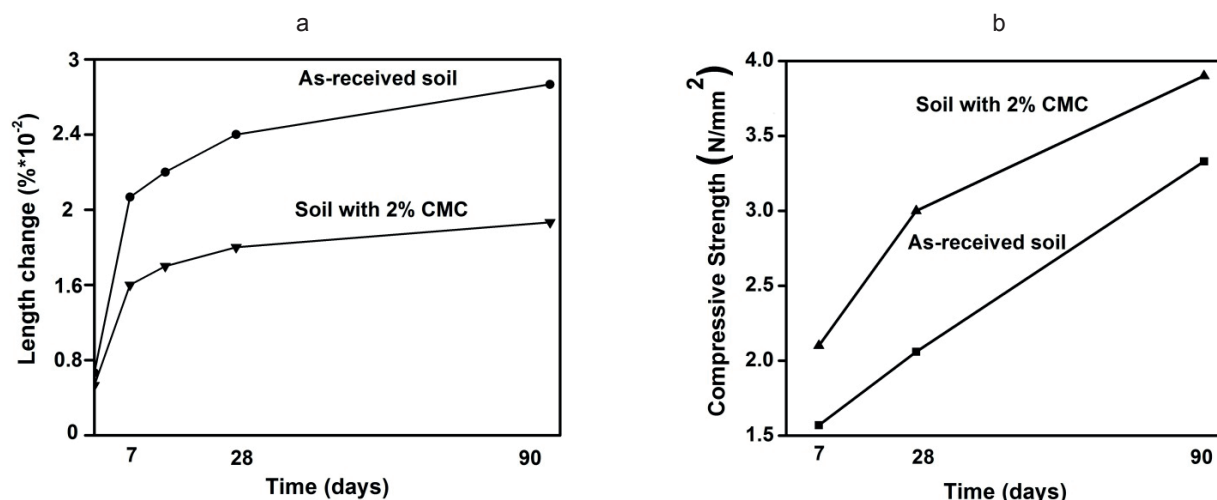
The effect of 2% carboxymethyl cellulose on the length change and compressive strength of the soil is depicted in Fig. 7. The stronger effect of the CMC reagent on the swelling property of the soil compared to that of the PEG is manifested by the higher reduction of the length change reaching a value of ~40% after 90 days [Fig. 7a]. The compressive strength of the CMC- treated samples shows a maximum increase of ~ 46% and a value of 3.9 N/mm<sup>2</sup> after 90 days. As with PEG, the rate of increase in strength of the CMC-treated samples declines slightly after 28 days.

#### 4. Discussion

The present work deals with a multi-component system in which the clay plays a dominant role. The discussion shall describe briefly the different interactions of clay with water, cement, swelling inhibitors, and superplasticizer to help to understand the findings of this work.

##### 4.1. The swelling property of clay in water

The clay property of concern is its swelling capacity in water. This property is mainly exhibited by montmorillonite, the clay mineral of the smectites type (23-36), with general formula  $x(\text{Mg, Al, Fe})_2(\text{OH})_2[\text{Si}_4\text{O}_{10}] \cdot n\text{H}_2\text{O}$ . Partial substitution of Si by Al generates an overall negative charge of the basal surfaces. This charge is balanced by the intercalation of cations (hydrated or non-hydrated) in between the aluminosilicate layers. Its interlayer is large and can host variable amounts of water molecules and different kinds of ions. The most common montmorillonite salt is the sodium type which has a large specific surface area. It transforms



Rys. 7. Wpływ karboksymetylocelulozy na: a) zmiany długości i b) wytrzymałość na ściskanie mieszaniny ziemi z cementem oraz dodatkiem SP w funkcji czasu

Fig. 7. Effect of carboxymethyl cellulose [CMC] on a) the length change and b) the compressive strength of the soil/ cement/ SP mix as a function of time

#### 4.1. Pęcznienie gliny w wodzie

Badano ważną właściwość gliny w wodzie, którą jest pęcznienie. Tę właściwość wykazuje głównie montmorillonit, minerał z grupy smektytów zawarty w glinie, o ogólnym wzorze  $x(\text{Mg}, \text{Al}, \text{Fe})_2(\text{OH})_2[\text{Si}_4\text{O}_{10}] \cdot n\text{H}_2\text{O}$  (23-36). Częściowe zastąpienie Si przez Al powoduje powstanie ujemnych ładunków na podstawowych płaszczyznach. Te ładunki są zrównoważone przez interkalację kationów – uwodnionych lub niewodnionych, pomiędzy glino-krzemianowymi warstwami. Odległości pomiędzy warstwami są znaczne w związku z czym mogą zawierać znaczne ilości cząsteczek wody i różnych jonów. Najczęściej spotykanymi jonami jest sód, którego sole mają duże powierzchnie właściwe. W korzystnych warunkach mogą być to także jony wapnia. Gлина montmorillonitowa kurczy się i pęcznieje, przy rosnącej wilgotności. Mechanizm pęcznienia montmorillonitu z jonami sodu różni się od tego z jonami wapniowymi. W przypadku sodu występuje pęcznienie makroskopowe. Jego cząstki ulegają flokulacji w wyniku ich dużej zdolności do łączenia się w zawiesinie i ich właściwości zbliżonej do żelu (26). Natomiast montmorillonit zawierający jony wapniowe, ulega krystalicznemu pęcznieniu i wykazuje tendencję do zwiększenia wymiarów cząstek poprzez włączanie cząsteczek wody do przestrzeni międzywarstwowych, w jego strukturze. Krystaliczne pęcznienie ma większy wpływ niż makroskopowe. Inne rodzaje glin: kaolinowe, illitowe i chlorytowe nie pęcznieją.

Wynikowy ładunek dodatni, określony jako zdolność do wymiany kationów sodowego i wapniowego w przypadku montmorillonitu jest zbliżony i wynosi  $\sim 76$  meq./100 g, jednak ruchliwość tych jonów różni się, w związku z różnicą ich wymiarów. Nie ulegający pęcznieniu kaolinit i illit wykazują mniejszą zdolność do wymiany jonów, odpowiednio 2 meq i 15 meq/100 g i nie odgrywają większej roli w procesie pęcznienia.

#### 4.2. Interakcja gliny w układach z cementem

Podczas hydratacji cementu uwolniony wodorotlenek wapnia dyfunduje w glinie, wymienia położenia z innymi kationami i ulega

to the calcium form under suitable conditions. Montmorillonite clay shrinks and swells with increasing humidity.

The swelling mechanism of the sodium montmorillonite differs from that of calcium. The sodium type suffers macroscopic swelling: Its particles flocculate due to their large connectivity in suspension and their gel-like properties (26). Calcium montmorillonite, however, undergoes crystalline swelling and tends to increase the size of the particles due to the incorporation of water molecules in between the layers in its structure. The crystalline swelling has a higher impact than the macroscopic one. The other types of clay, with kaolinite, illite and chlorite minerals, do not swell

The net negative charge expressed as the cation exchange capacity of the sodium- and calcium montmorillonite is similar and amounts to  $\sim 76$  mg/100 g, their mobility, however, differ because of the difference in particle size. The non-swelling kaolin and illite possess low cation exchange capacity of 2 and 15 meq/100g and do not play a significant role in the process.

#### 4.2. The interaction of clay with cement systems

During the hydration of cement, the calcium hydroxide evolved is introduced in the clay structure by cation exchange mechanism and is adsorbed on the clay surface (27, 28). There is a possible encapsulation of cement grains by the clays and the hydration products.

Under these conditions, sodium montmorillonite is transformed into calcium clay. Sedimentation of sodium montmorillonite in calcium hydroxide solution is due to the replacement of two sodium ions located in the interlayer of the clay by one calcium ion; in this system, the calcium montmorillonite is the one which behaves.

In the case of mortars with clay-bearing aggregates, the amount of clay that enters the mixing water depends on the detachment ability of the clay from the aggregate which varies with the type of clay. Sodium montmorillonite is the most difficult to detach whilst calcium montmorillonite and kaolinite are easier (26). The loss of



adsorpcji na jej powierzchni (27,28). Możliwe jest także otoczenie ziaren cementu i produktów hydratacji cząstkami gliny.

W tych warunkach montmorillonit „sodowy” ulega przemianie na glinę „wapniową”. Sedymentacja montmorillonitu „sodowego” w roztworze wodorotlenku wapnia zachodzi dzięki zastąpieniu dwóch jonów sodowych, znajdujących się w przestrzeni międzywarstwowej, przez jeden jon wapnia i w tych warunkach pozostającym minerałem jest montmorillonit „wapniowy”.

W przypadku zapraw z kruszywem złożonym z gliny, ilość gliny, która miesza się z wodą zarobową zależy od zdolności gliny do oderwania się od ziaren kruszywa, co zmienia się z rodzajem gliny. Montmorillonit „sodowy” trudniej się odszczepia, natomiast montmorillonit „wapniowy” i kaolinit łatwiej (26). Utrata wytrzymałości przez zaprawy w takich układach, jest spowodowana przez absorpcję części wody zarobowej przez glinę i utworzenie nieprzepuszczalnych otoczek, wokół ziaren cementu (29). Ten proces spowalnia hydratację cementu i zaburza adhezję z ziarnami kruszywa.

Glina z dużą zdolnością absorpcji wody, otaczająca powierzchnię ziaren kruszywa zwiększa porowatość strefy przejściowej kruszywa z cementem i ma wpływ na trwałość tego układu. Ponieważ słaba strefa pomiędzy ziarnami kruszywa i zaczynem cementowym wzrasta, dostęp wody i niepożądanych jonów jest możliwy (30). Większa zdolność absorpcji wody przez glinę wpływa na opad zaprawy, a także powoduje sztywność mieszanki. Różna zdolność do wymiany kationów, oznacza różną wielkość absorpcji wody zarobowej i pochłanianie jej dużej ilości i zaburza normalną hydratację cementu.

Jednak równocześnie zachodzi korzystna interakcja gliny z cementem w wyniku reakcji pucolanowej. Duże pH spowodowane przez hydratację cementu zwiększa rozpuszczalność krzemionki i glinu zawartych w glinie, które łączą się z kolei z powstającym wodorotlenkiem wapnia (27). Jeżeli glina jest zawarta w małej ilości w kruszywie, może ona przereagować znikając w interakcji z hydratami cementowymi. Na przykład rozpuszczenie jednego mola montmorillonitu zużywa 4,68 moli jonów hydroksylowych (31,32).

Pomimo niekorzystnego wpływu gliny w zaprawie i rzadziej w betonie, stabilizacja miękkiej ziemi za pomocą około 5–15% cementu jest powszechna i pożądana w zastosowaniach geotechnicznych (33). Cement zmniejsza wskaźnik plastyczności ziemi i zwiększa w nieograniczonym stopniu wytrzymałość na ścinanie. Poprawia to nośność podłoża i zmniejsza grubość podstawowej warstwy ruchu w autostradach. Jest to praktyczna alternatywa inżynierska w celu spełnienia wymagań zrównoważonej infrastruktury. W tych zastosowaniach ważne znaczenie ma zagęszczenie mieszanki gliny z cementem i uregulowanie zawartości cementu oraz wilgotności, a także procesu mieszania.

### **4.3. Glina w konstrukcjach z ziemi**

W przypadku konstrukcji z ziemi pęczniająca właściwość gliny jest szkodliwa dla ziemi utwalanej cementem, analogicznie zaprawa-

strength of the mortars in this system is caused by the absorption of part of the mixing water by clay and the formation of impermeable envelopes around the cement grains (29). This effect slows the cement hydration and disrupts its adhesion with the aggregate.

The clay with high water absorption capacity, retained on the surface of the aggregates, increases the porosity of the interface between the aggregates and the cement paste and influences the durability. As the weak zone between the aggregate and the cement paste increases, the access of water and the intrusion of harmful ions is facilitated (30). The high water absorption capacity of the clay affects the slump of the mortar as well and causes stiffness in the mix. Different cation exchange capacity means different water absorption capacity, capturing a large amount of the mixing water and disrupting the normal hydration of cement.

On the other hand, positive interaction between the clay and the cement occurs through a pozzolanic reaction. The high pH of the cement hydration increases the solubility of silica and alumina of the clay which combine in turn with the lime produced (27). If the clay is present in minor amounts in the aggregates, it may disappear with the evolution of the hydration product. The dissolution of one mole of montmorillonite for example consumes 4.68 moles of hydroxyl ions (31, 32).

In spite of the negative impact of clay in mortar and concrete systems while present in minor amounts, the stabilization of soft soil with ~ 5-15% cement is common and desired in the geotechnical applications (33). The cement decreases the plasticity index of the soil and increases the unconfined shear strength. It improves the bearing capacity of the subgrade and reduces the thickness of the base course layer in highways. It is a reliable engineering alternative to satisfy the requirement of sustainable infrastructure. In this application, it is important to compact the clay cement mix and adjust the cement and moisture contents, as well as the mixing procedure.

### **4.3. The clay in earth construction**

Concerning the field of earth construction, the swelling property of the clay is harmful to the cement-stabilized soil as in the case of mortars and concrete. The difference between the two systems lays in the clay content of the respective systems. The clay content in the soil exceeds that present as fines in the aggregates of mortars or concrete and is probably less than the soft soil of the geotechnical applications. Pure clay is not recommended to use in cement-stabilized earth construction, but variable amounts are expected to be well dispersed in the siliceous soil with a probable presence of calcium carbonate according to the location. The swelling capacity of the soil should be therefore inhibited to decrease the volume change of the building units in this area of application.

### **4.4. The clay swelling inhibitor reagents**

Several reagents promote the aggregation of the clay particles and reduce their swelling capacity, among which polyethylene glycol [PEG] and sodium carboxymethyl cellulose [CMC] are well known

mi, lub betonem. Różnice, jakie mogą powstawać pomiędzy tymi materiałami są związane głównie z różną zawartością gliny w ziemi. Zawartość gliny w ziemi przekracza zwykle tę ilość, która należy do drobnej frakcji kruszywa w zaprawach lub betonach i jest także przypuszczalnie mniejsza w miękkiej ziemi, w zastosowaniach geotechnicznych. Stosowanie samej gliny nie jest zalecane w przypadku stabilizowanych cementem konstrukcji z ziemi, natomiast jej zmienne ilości powinny być dobrze zmieszane w piaszczystej ziemi, prawdopodobnie z wapniem, w zależności od położenia geograficznego budowli. Zdolność pęczniająca ziemi powinna być sprowadzona do ograniczenia zmian objętości budowlanych elementów, w takich obszarach.

#### 4.4. Inhibitory pęcznienia gliny

Szereg reagentów zwiększa agregację cząstek gliny i zmniejsza zdolność do pęcznienia, pośród których poli(tlenek etylenu) [PTE] i karboksymetyloceluloza z jonami sodu [KMC] są dobrze znane (34,35). W tych doświadczeniach stosowano obróbkę ziemi, zawierającej ~14% gliny, dodatkiem 1% PTE oraz 2% KMC zmniejszały pęcznienie odpowiednio o około 30% i 40%. Równocześnie zwiększały wytrzymałość na ściskanie maksymalnie odpowiednio o około 24% i 46%. Właściwości tych inhibitorów podane są w punktach 4.4.1 i 4.4.2.

##### 4.4.1. Poli(tlenek etylenu)

PTE ma wzór  $H-(O-CH_2-CH_2)_n-OH$ . Jest on alifatycznym eterem o masie cząsteczkowej mniejszej od 30000 g/mol (36). Strukturę jego cząsteczki pokazano na rysunku 8. Zawiera on spolaryzowane wiązania C-O-C, a odległość tlenów jest podobna do H w wodzie, więc zdolne do wiązania wodorowego. Zapewnia to dużą rozpuszczalność w wodzie temu polimerowi, w porównaniu z rozpuszczalnością z innymi polieterami alifatycznymi i pod tym względem przypomina alkohol. Jego interakcja z innymi związkami polarnymi jest z tego powodu termodynamicznie uprzywilejowana.

PTE jest powszechnie stosowany jako środek w dojrzewaniu betonu. Jest on rozproszony w matrycy cementowej, zmniejsza jej porowatość i adsorpcję wody, zapewniając ciągłą hydratację, w wyniku dostępności wody. Ten efekt zmniejsza porowatość i zawartość pustek, a tym samym zapewnia silniejsze wiązanie kruszywa z matrycą cementową.

Jest on także stosowany w celu zwiększenia agregacji cząstek gliny i zmniejsza jej zdolność do pęcznienia. Ulega on interkalacji między warstwami glino-krzemianowymi dzięki wiązaniom wodorowym między spolaryzowanymi atomami tlenu, występującymi w ich łańcuchach i cząsteczkami wody powiązanych z grupami silanolowymi na powierzchniach warstw glino-krzemianowych (37,38). Obszary hydrofilowe sprzyjają wiązaniu na powierzchni gliny zhydratowanych kationów sodu i zapobiegają dalszemu jej uwodnieniu. Mogą także obejmować obszary hydrofobowe, co utrudnia dalsze wnikiwanie wody do gliny

W pracy odległość  $d$  pomiędzy warstwami glino-krzemianowymi uwodnionego montmorillonitu wyniosła 12.3 Å, w wyniku dostania

(34, 35). In the present work, treatment of the soil composed of ~14% clays with 1% PEG as well as with 2% CMC could inhibit the expansion by ~30 and 40% respectively and to improve the compressive strength by a maximum of ~24 and 46% respectively. The characteristics of the two inhibitor reagents are briefly discussed below.

##### 4.4.1. Polyethylene glycol [PEG]

The PEG has a general formula  $H-(O-CH_2-CH_2)_n-OH$ . It is an aliphatic polyether with a molecular mass of less than 30000 g/mole (36). Its structure is shown in Fig. 8. It's charged polarized C-O-C bond with an oxygen distance in the polymer compatible with that of H in water, is capable of hydrogen bonding. It gives the polymer a high aqueous solubility compared to other aliphatic polyether and resembles that of alcohol. Its interaction with other polar substances is therefore thermodynamically favored.

PEG is commonly used as an internal curing agent in self-curing concrete. It is inter-dispersed in cement, decreases its porosity and its water absorption while offering a continuous hydration because of the availability of water. This effect lessens the number of pores and voids and allows a stronger bond between the aggregate and the cement paste.

It is also used to promote the aggregation of the clay particles and reduces their swelling capacity. It is intercalated between the aluminosilicate layers via H-bonding of the partially polarized oxygen atoms present in its chains and the water molecules anchored by the silanol groups on the surfaces of the aluminosilicate layers (37, 38). The hydrophilic regions enhance the binding of highly hydratable sodium cations to the clay and prevent their hydration. It may also include hydrophobic regions that hinder further ingress of water into the clay.

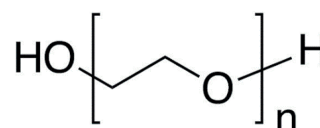


Fig. 8. The structure of polyethylene glycol [PEG]

Rys. 8. Struktura poli(tlenku etylenu)

In the present work, a  $d$ -spacing between the aluminosilicate layers of hydrated montmorillonite appears at 12.3 Å due to the water uptake between the negatively charged layers. The  $d$ -value for montmorillonite with intercalated polyglycols is shifted to 17.7 Å in accordance with the literature (39).

##### 4.4.2 Carboxymethyl cellulose [CMC]

The carboxymethyl cellulose is a cellulose ether composed of sodium cellulose glycolate, also known as cellulose gum [40-45]. Its general formula is  $C_6H_7(OH)_x(OCH_2COONa)_y$ . It has an average number of  $-CH_2COONa$  gr / monomer equal to 0-3. Its structure is shown in Fig. 9. Its solubility in water depends on the degree of substitution of OH by  $-CH_2COONa$ . The less substitution with

się wody pomiędzy warstwy posiadające ujemnie ładunki. Wielkość d montmorillonitu w wyniku interkalacji poli(tlenku etylenu) została przesunięta do 17,7 Å, zgodnie z danymi literaturowymi (39).

#### 4.4.2. Karboksymetyloceluloza [KMC]

Karboksymetyloceluloza [KMC] jest eterem celulozy zwanym żywicą celulozową (40-45). Jej ogólny wzór jest następujący:  $C_6H_7(OH)_x(OCH_2COONa)_y$ . Ma on średnią ilość grup  $CH_2COONa$  na jeden monomer wynoszącą od 0 do 3. Jego strukturę pokazano na rysunku 9. Jego rozpuszczalność w wodzie zależy od stopnia podstawienia grup OH przez  $CH_2COONa$ . Jego właściwości hydrofobowe zależą od stopnia zastępowania przez sód – mniej sodu większa hydrofobowość. Stopień zastępowania SZ ma wpływ na rozpuszczalność –  $SZ \geq 1,2$  zapewnia rozpuszczalność w wodzie.

KMC stosuje się jako modyfikator lepkości oraz środek zagęszczający i zatrzymujący wodę. Uwalnia on jony sodowe w roztworze wodnym i przechodzi w anion hydratowany. W wodzie jest rozproszonym koloidem i składa się z hydratowanych makromolekuł. Ze wzrostem polimeryzacji jego lepkość zwiększa się na skutek interakcji wiązania wodorowego i/lub wpływu działania hydrofobowego. Podczas hydratacji zaadsorbowane cząsteczki nadają polimerowi wydłużoną konfigurację i zwiększają lepkość układu.

KMC jest inhibitorem pęcznienia w wyniku interakcji z anionami karboksylowymi i ładunkami występującymi w glinie, tworząc słabe wiązanie i sprzyjając hydratacji łańcuchów polimeru. Może tworzyć warstwę solwatacyjną między ujemnymi ładunkami polimeru i dodatnimi ładunkami, wzdłuż krawędzi cząstek gliny. Tworzy bardzo cienką warstewkę zdolną do blokowania przepływu cieczy w porach, zwiększając lepkość plastyczną. Ułatwia neutralizację niektórych cząstek gliny z ładunkiem dodatnim, zwiększając odległość pomiędzy nimi i tworzy słabo przepuszczalny film. Cząstki gliny absorbują polimer, zwiększając gęstość aż do powstania skorupy, zmniejszającej przepuszczalność. Innymi słowy, wzrost lepkości wyjaśnia się albo zakładając adsorpcję, albo blokowanie porów, lub oba te mechanizmy.

W przypadku dodatku cementu KMC wykazuje efekt uszczelniający, w związku z powstawaniem cienkiego filmu z wody związanej, pomiędzy produktami hydratacji. Zapobiega to odwodnieniu cementu, obejmującą retencję wody. Tworzy mikrożel lub formę koloidu hydrofilowego z wodą zarobową i zapobiega jej przesączaniu. Anionowy polimer ulega także adsorpcji na fazach hydratów cementu, wypełnia pory, zmniejsza porowatość i przepuszczalność, a także może migrować na powierzchnię, nie ulegając adsorpcji. Opóźnia hydratację cementu, hamuje wzrost kryształów, zmienia ich morfologię, łączy się z alkaliem i metalami ziem alkalicznych oraz zmniejsza ruchliwość jonów.

#### 4.4. Dodatek superplastyfikatora

Superplastyfikator polikarboksyłanowy dodany do układu z cementem stabilizującym ziemię i z inhibitorami pęcznienia, reaguje przede wszystkim z gliną, albo za pośrednictwem interkalacji lub

sodium the more hydrophobic character. The degree of substitution (D.S.) affects the solubility and at  $DS \geq 1.2$  it is water-soluble.

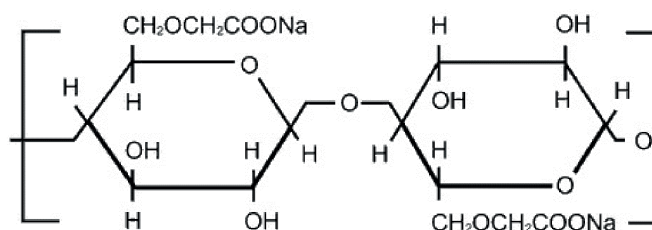


Fig. 9. The structure of sodium salt of carboxymethyl cellulose (CMC)

Rys. 9. Struktura soli sodowej karboksymetylocelulozy

CMC is used as a viscosity modifier, thickening- and water retention agent. It liberates the sodium ions in aqueous solution and becomes anionic and hydratable. It is a polydispersed colloid in water and contains hydrated macromolecule. With increased polymerization, the viscosity increase through an interaction of hydrogen bond, and/or through the hydrophobic action. During the hydration, the adsorbed molecules give the polymer an elongated configuration and increase the viscosity of the system.

CMC is a clay swelling inhibitor; due to physical interaction between the carboxylate anions and the charges present in the clays forming a weak bond and favoring the hydration of the polymer chain. It may form a solvation layer between the negative charge of the polymer and the positive charge along the edge of the clay particles. It produces a very thin layer capable of blocking the flow of the fluid through the pores and increases the plastic viscosity. It promotes the neutralization of some of the clay particles positively charged, increases the distance between them, and form a low permeable film. The clay particles absorb the polymer and increase the consistency to the shell formed making it less permeable. In other words, the increase in the viscosity is explained either by adsorption mechanism or pore blockage or both.

With cement, the CMC has a sealing effect due to the formation of a very thin water film embedded between the hydration products. It prevents the dry out of cement with its water retention capability. It forms a microgel or hydrocolloid form in the mixing water and prevents its filtration. The anionic polymer is adsorbed also on the hydrated phases of cement, goes to the pores, decreases the porosity or reduces the permeability and can migrate to the surface, without adsorption. It retards the cement hydration, inhibits the crystal growth, changes the morphology of portlandite, combines with alkalis and alkaline earth metals, and decrease the ionic mobility.

#### 4.4. The addition of superplasticizer

In the present system of cement stabilized soil using the polycarboxylate superplasticizer, both swelling inhibitor reagents used interact preferentially with the clay either through intercalation or physical adsorption giving space to the superplasticizer to increase the fluidity of the mixes.

fizycznej adsorpcji, stwarzając miejsce dla superplastyfikatora zwiększającego płynność mieszaniny.

Osiągnięta w tej pracy wytrzymałość jest umiarkowana, ze względu na właściwości ziemi. Można było osiągnąć lepsze wyniki stosując częściowe zastąpienie ziemi piaskiem, lub ziemią bardziej krzemianową, z natury.

## 5. Wnioski

Z wyników tych doświadczeń można wyciągnąć taki wniosek, że zawartość gliny w ziemi nie jest przeszkodą do użycia lanej ziemi w konstrukcjach, w przypadku jej stabilizacji cementem, jeżeli zastosuje się odpowiednie reagenty do zapobiegania efektowi pęcznienia.

Nowe perspektywy stwarza wznoszenie budynków na obszarach pustynnych, stosując te techniki. Trzeba wykonać dalsze badania w celu określenia stężenia inhibitorów pęcznienia i regulowania efektów tego procesu w przypadku ziemi z większą zawartością gliny oraz znalezienia innych reagentów, odpowiednich do tego zastosowania.

## Literatura / References

1. K. A. Heathcote, Durability of Earthwall buildings, *Constr. Build. Mater.* **9** (3), 185–189 (1995).
2. G. Minke, *Earth Construction Handbook*. WIT Press, Southampton, 2000, 206–214.
3. L. Keefe. *Earth Building*. Taylor & Francis Group, New York. 2005.
4. M. C. Betts and T. A. H. Miller, "Farmers' Bulletin No. 1500: Rammed Earth Walls for Buildings", Washington, D.C.: U.S. Department of Agriculture, 1937.
5. A. F. Merrill, *The Rammed-Earth House*, New York: Harper & Brothers Publishers, 1947.
6. P. Walker, R. Keable, J. Martin, V. Maniatidis, *Rammed Earth: design and construction guidelines*, Bracknell, United Kingdom: BRE Bookshop, 2005.
7. B. Isik, Experimental study with the gypsum stabilized earthen wall material: Alker, for sustainable habitat, Science Conference: Sana'a: Yemeni Scientific Research Foundation; 2001.
8. H. Lowenhaupt, A revolutionary innovation in traditional earth construction. [http://www.greenhomebuilding.com/cast\\_earth.htm](http://www.greenhomebuilding.com/cast_earth.htm).
9. R. Vroomen, Gypsum stabilized earth – Research on the properties of cast gypsum stabilized earth and its suitability for low cost housing construction in developing countries". Netherlands: Eindhoven University of Technology, 2007.
10. G&W Science and Engineering, "Cast Earth". [www.gw-egy.com](http://www.gw-egy.com) Report presented to GIZ. Cairo. 2012.
11. A. H. E. Hassan, Studies on some factories affecting the soil stabilization using the methodology of cast earth" M.Sc. Thesis, Faculty of Science, Helwan University, 2016.
12. H. Y. Ghorab, A. S. Meawad, A. H. Hassan, Effect of cement kiln bypass dust on the performance of cast earth, *Cem. Int.*, **5**, 52-57 (2016).

The absolute value of strength is moderate in this work due to the nature of the soil. Better results can be realized by partial replacement of the soil with sand or in the soil more siliceous in nature.

## 5. Conclusions

It is to be concluded from this study that the presence of clay in the soil does not represent a hindrance for the application of cast earth in earth construction projects with cement stabilized soil when using proper reagent to inhibit the swelling effect.

New horizons are seen for erecting building units in desert areas using these techniques. Further work is needed to define the concentrations of the swelling inhibitors to control the swelling effect of soil with a higher amount of clay, and to find out other reagents suitable for this application.

13. H. Y. Ghorab, A.S. Meawad, M. Yildirim, A. H. E. Hassan, Progress research in earth construction: Pourable earth with burned clays and solid wastes. *African J. Sci. Techn. Innov. Develop.* 6/1/2018 <https://doi.org/10.1080/20421338.2018.1479141>
14. A. H. E. Hassan, Studies on the properties and behavior of cast earth. Ph. D. Thesis, Faculty of Science, Helwan University, ongoing.
15. The Egyptian code for building with stabilized earth-1st Part: Building with compressed stabilized earth blocks. 2016 Housing and Building Research Center, Cairo Egypt <http://www.hbrc.edu.eg>
16. R. H. Bogue, Calculation of the compounds in Portland cement. *Industrial and Engineering Chemistry Analytical Edition*, 1 (4), 192-197 (1929).
17. ASTM C 837 – 09: Standard test method for methylene blue index of clay, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.
18. IS 2720 – 40(1977): Methods of test for soils, part 40: determination of free swell index of soils. CED 43: Soil and foundation engineering.
19. ASTM C230 / C230M-14: Standard specification for flow table for use in tests of hydraulic cement, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
20. ASTM C1437 – 15: Standard test method for flow of hydraulic cement mortar, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.
21. ASTM C 490-93a: Standard test method for use of apparatus for determination of length change of hardened cement paste, mortar, and concrete, 2000.
22. ASTM C109 / C109M-13: Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
23. G. Brown, The X-ray Identification and Crystal Structures of Clay Minerals, Mineralogical Society, London, 1961.
24. B. Velde, Origin and Mineralogy of Clays: Clay and the Environment, in: B. Velde (Ed.), Springer, 1995.
25. D. Manning, Handbook of Clay Science (Developments in Clay Science, 1, in: F. Bergaya, B.K.G. Theng, G. Lagaly (Eds.), Elsevier's Science & Technology, 2007.
26. J. F. Muñoz, M. I. Tejedor, M. A. Anderson, S. M. Cramer, Expanded study on the effects of aggregate coating and films on concrete performance. Wisconsin Highway Research Program # 0092-04-12. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Wisconsin-Madison. 2007.
27. M. A. Fam, J. C. Santamarina, Study of clay-cement slurries with mechanical and electromagnetic waves," *Journal of Geotechnical Engineering-Asce*, 122 (5), 365-373 (1996).
28. D. F. Noble, Reactions and strength development in Portland cement-clay mixtures," National Research Council -- Highway Research Board - Research Record, 198, 39-56 (1967).
29. D. C. Pike, Methodologies for Assessing the Variability of Fines in Sands Used for Concretes and Mortars," PhD Thesis. University of Reading, 1992.
30. S. Caliskan, B. L. Karihaloo, B. I. G. Barr, Study of rock-mortar interfaces. Part 1: surface roughness of rock aggregates and microstructural characteristics of interface, *Mag. Concr. Res.* 54 (6), 449-461 (2002).
31. E. C. Gaucher, P. Blanc, Cement/clay interactions - A review: Experiments, natural analogues, and modeling. *Waste Manag.* 26, 776-788 (2006).
32. H. Takase: Discussion on PA model development for bentonite barriers affected by chemical interaction with concrete: Do we have enough evidence to support bentonite stability? Proceedings of International Workshop on Bentonite-Cement Interaction in Repository Environments - Tokyo - Japan - 14-16/04/2004.
33. R. Saadeldin, S. Siddiqua, Geotechnical characterization of a clay-cement mix, *Bull. Eng. Geol. Environ.* 72, 601-608 (2013).
34. S. Liu, X. Mo, C. Zhang, D. Sun, H. Mu, Swelling Inhibition by Polyglycols in Montmorillonite Dispersions, *J. Dispersion Sci. Techn.* 25 (1), 63-66 (2006).
35. L.M. Zhang, Inhibitive properties of amphoteric, water-soluble cellulosic polymers on bentonite swelling. *Colloid Polym. Sci.* 277, 282-284 (1999).
36. J. Herzberger, K. Niederer, H. Pohlit, J. Seiwert, M. Worm, F. R. Wurm, and H. Frey: Polymerization of Ethylene Oxide, Propylene Oxide, and Other Alkylene Oxides: Synthesis, Novel Polymer Architectures, and Bioconjugation, *Chem. Rev.* 116, 2170-2243 (2016).
37. J. Plank, Influence of clay minerals on the action of PCE superplasticizers – description of the phenomenon and possible Solutions, *Cem. Int.* 5 (14), 58 – 61 (2016).
38. R. A. Akbour, P. Boustingorry, F. Leroux, F. Leising. and C. T. Guého: Adsorption of PolyCarboxylate Poly(ethylene glycol) (PCP) esters (Na<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup> and Ca<sup>2+</sup>) and PCP molecular structure on Montmorillonite (Mmt): Effect of exchangeable cations, *J. Colloid Interf. Sci.* 437, 227-234 (2015).
39. S. Ng, J. Plank, Interaction mechanisms between Na montmorillonite clay and MPEG-based polycarboxylate superplasticizers, *Cem. Concr. Res.* 42, 847-854 (2012).
40. B. M. A. Brito<sup>1</sup>, P. M. Bastos, A. J. A. Gama, J. M. Cartaxo, G. A. Neves, H. C. Ferreira, Effect of carboxymethyl cellulose on the rheological and filtration properties of bentonite clay samples determined by experimental planning and statistical analysis, *Cerâmica*, 64, 254-265 (2018).
41. D. Bülichen, Wirkmechanismus verschiedener Celluloseether als Wasserretentionsmittel in der Tiefbohrzementierung und in Trockenmörtelsystemen. Doktors der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.). Faculty of chemistry Technical University Munich 2013.
42. K. N. Farooque, Z. Yeasmin, M. E. Halim, A. J. Mahmood, and M. Y. A. Mollah, Effect of Carboxymethyl Cellulose on the Properties of Ordinary Portland Cement, *Bangladesh J. Sci. Ind. Res.* 45 (1), 1-8 (2010).
43. P.C. Mishra, V.K. Singh, K.K. Narang, N.K. Singh, Effect of carboxymethyl-cellulose on the properties of cement, *Materials and Engineering A357*, 13-19 (2003).
44. L. Lei, and J. Plank, A concept for a polycarboxylate superplasticizer possessing enhanced clay tolerance, *Cem. Concr. Res.* 42, 1299-1306 (2012).
45. X. Liu, J. Guan, G. Lai, Y. Zheng, Z. Wang, S. Cuia, M. Lana, and H. Lia, Novel designs of polycarboxylate superplasticizers for improving resistance in clay-contaminated concrete *J. Ind. Eng. Chem.* 55, 80-90 (2017).