

STRUCTURE AND ENVIRONMENT

ARCHITECTURE, CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENTAL ENGINEERING AND ENERGY

No. 4/2010 vol. 2 PL ISSN 2081-1500 www.sae.tu.kielce.pl KIELCE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



Contents

structure

THE INFLUENCE OF THE BASIC PROPERTIES OF MINERAL DUST ON THE PAVEMENT PROPERTIES IN THE RECYCLING TECHNOLOGY WITH FOAMED BITUMEN	5
PRZEMYSŁAW BUCZYŃSKI	
OLD BRIDGES IN NEW TIMES. Searching for hidden quality	10
JOOST WALRAVEN	
MICROMECHANICAL MODELS OF DUCTILE FRACTURE OF METALS	16
WIKTOR WCIŚLIK	

environment

ELEMENTAL ANALYSIS OF SEDIMENTS FROM THE URBAN STORM WATER DRAINAGE DEPENDING ON GRANULOMETRIC FRACTIONS	25
ALEKSANDRA SAŁATA, LIDIA DĄBEK	
WASTE MANAGEMENT PLANTS WITH PROCESS LINES FOR PRODUCTION OF SUBSTITUTE FUELS FOR CEMENT INDUSTRY AS A SOLUTION TO WASTE PROBLEM IN THE ŚWIĘTOKRZYSKIE REGION	29
GRZEGORZ SPUREK	
THE INFLUENCE OF SAMPLE PREPARATION BY THE LASER DIFFRACTION METHOD ON THE PARTICLE SIZE DISTRIBUTION OF BENTONITE	41
EDYTA GROBELSKA, AGATA LUDYNIA	
HOW TO PREPARE THE MANUSCRIPT	49
THE REVIEW PROCESS	50

EDITORIAL BOARD

Main Editor Jerzy Z. Piotrowski

Editor Ludwik Śliwa

Secretary of the Editorial Board Radosław Zaborek

Sectional Editor STRUCTURE Zdzisława Owsiak

Sectional Editor ENVIRONMENT Lidia Dąbek

SCIENTIFIC BOARD

Chairmanship Tomasz Kozłowski

STRUCTURE

Tomasz Arciszewski (USA), Lesław Brunarski, Go Iwahana (Japan), Marek Iwański, Zbigniew Kowal, Jozef Melcer (Slovakia), Michail V. Nemchinov (Russia), Victor Proskuriakow, Zbigniew Rusin, Bohdan Rymaszewski, Wacław Seruga, Małgorzata Wilczkiewicz (USA)

ENVIRONMENT

Satoshi Akagawa (Japan), Elżbieta Bezak-Mazur, Dorota Chwieduk, Graham Herbertson (Scotland), Andrzej Kapłon, Andrzej Kuliczkowski, Janusz Łomotowski, Paweł Purgał, Leszek Radziszewski, Anatol Stroy (Ukraine), Maria Żygadło

www.sae.tu.kielce.pl

sae@tu.kielce.pl

The quarterly printed issues of Structure and Environment are their original versions

The Journal published by the Kielce University of Technology
Faculty of Civil and Environmental Engineering

PL ISSN 2081-1500

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, 2010

25-314 Kielce, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7
tel. 41 34 24 581
www.tu.kielce.pl/organizacja/wydawnictwo



Kielce University of Technology
2010



structure
structure

PRZEMYSŁAW BUCZYŃSKI

Kielce University of Technology
al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7
25-314 Kielce, Poland
e-mail: p.buczynski@tu.kielce.pl

THE INFLUENCE OF THE BASIC PROPERTIES OF MINERAL DUST ON THE PAVEMENT PROPERTIES IN THE RECYCLING TECHNOLOGY WITH FOAMED BITUMEN

Abstract

The fine-grained waste mineral materials is used in the recycling technology with foamy bitumen as mineral filler from 5% to 20% in the aggregate mix. This allows its use of mix recycling, fine-grained waste mineral materials from the dedusting system of aggregate in coating plant and during the production of aggregates in mines (whilst crushing the rocks and rinsing the aggregate).

In this investigation three different fine-grained waste mineral materials (dolomite, gabbro, and quartzite sandstone) were tested the basic functional properties were defined i.e. pH – acidity – alkalinity, Blaine's actual area P_w , the contents of clay minerals – with the use of methylene blue indicator MBF and determination of the voids of dry compacted filler. The fine-grained waste mineral materials are in proportion of 10%, 15% and 20% to mineral mix. From the analysis, which was within the domain of stability and flow (Marshall), indirect tensile stretch (ITS) and water resistance (TSR), the dependency of functional properties of fine-grained waste mineral materials on the mechanical basecourse properties in recycling technology with foamy bitumen was defined.

The possibility of utilization of fine-grained waste mineral materials in the recycling technology of deep cold with foamed bitumen, substantially affect the protection of the environment. At the same time it preserves the required properties of recycled pavement.

Keywords: fine-grained waste mineral materials, recycling, basecourse, recycled mineral mix, foamed bitumen

1. Introduction

The fine-grained waste mineral materials comes during the process of producing mineral mix asphalt, i.e. during the aggregate dedusting process and during the production of aggregates in mines (whilst crushing the rocks and rinsing the aggregate).

Strict environmental regulations have been imposed to determine the amount of industrial dust emitted to the atmosphere as 100 mg/m^3 . The above-mentioned regulations require the introduction of an alternative dedusting system, i.e. bag filters. Virtually all amount of fine-grained waste mineral materials will be kept. Thus obtained a fine-grained waste mineral materials are difficult for recycling and it is impossible to use this material again.

The preliminary analysis allows for the use of fine-grained waste mineral materials in the recycling

technology of deep cold with foamed bitumen. With this technology it is possible to try to utilize the fine-grained waste mineral materials. The mineral mix in the recycling technology with foamed bitumen may contain from 5% to 20% dust the size smaller than 0.075 mm .

2. The research of the properties of fine-grained waste mineral materials

In the application aspect of the fine-grained mineral material in the deep cold recycling with foamed asphalt, there were three types of mineral dust. Each of them were varied as to their origin and mineral composition. Two of them were received from the dust collection system of the asphalt batch-plant such as: dolomite (D) and Gabbro (G). The fine-grained material consisted of sandstone quartzite (K) is obtained as a washing process on mine. The

next step was to define the functional properties, such as: specific surface by means of Blaine tester (P_w), the contents of clay minerals – MBF ratio, an indication of voids fraction content of dry and compacted filler AVR.

The study of basic functional properties is to determine the utility of mineral dust in the aspect of using for a base coarse with foamed bitumen in deep cold recycling with foamed asphalt. The results of the basis of functional properties are presented in Table 1 (including the determination of the coefficient of variation for the considered parameters).

Table 1. The researched types of fine-grained waste mineral materials

Type of fine-grained waste mineral materials	TYPE OF TEST	ARITHMETIC MEAN	V [%]
G (gabbro)	P_w	4709	0.4
	MB_F	3.3	8.2
	pH	7.5	4.7
	AV_R	56.84	0.4
K (quartzite)	P_w	3487	0.6
	MB_F	5.0	5.4
	pH	4.5	4.1
	AV_R	56.88	0.5
D (dolomite)	P_w	4209	0.8
	MB_F	1.3	10.9
	pH	7.5	2.4
	AV_R	55.36	1.3

The maximum value of the Blaine's specific surface for fine-grained waste mineral materials were received from gabbro (G), and dolomite dust (D). The lowest finding has been observed for fine-grained waste mineral materials obtained from the quartzite (Q) sandstone.

The largest value of methylene blue indicator MBF, which is content of clay minerals in the studied dust, characterized a waste material from a quartzite sandstone which could be caused by the content of shale.

The most acidic material is quartzite sandstone with a pH is less than 4.5. The fine-grained mineral material has a pH value the same as rocks from which it was obtained. It should be noted that all the tested dusts reached a similar value of AVR [%] on level between 55 and 57%. The largest value of AVR [3] reached the dust from the sandstone quartzite,

while the smallest the dolomite aggregates. This may be related to the hardness of dust, especially derivation of received grain dust.

3. Design of mineral mix

In order to assess effect of the addition of fine-grained mineral material to the mineral mix with foamed bitumen in deep cold recycling, there were designed three type of mineral mix which differ the content of mineral dust content differing (20%, 15%, 10%) and its origin.

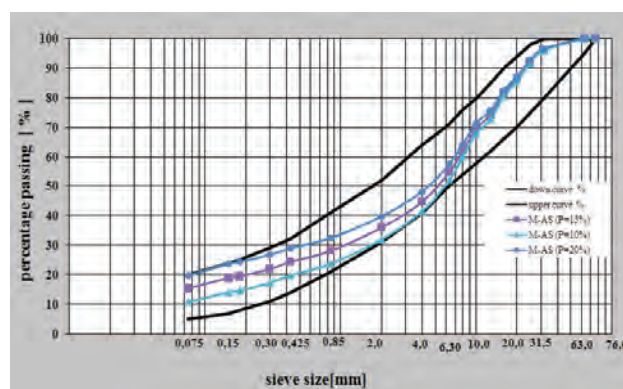


Fig. 1. The area of proper granulation of mineral mix with foamed bitumen for base course [8]

The mineral mix with foamed bitumen (Fig. 1) consisted of local recycled asphalt pavement, dolomite aggregate 31.5 mm which was earlier a compound of mechanical base course treatment and mineral dusts used for increasing a fraction content (gabbro, quartzite sandstone and dolomite). As the foamed bitumen was used a Nyfoam 85 in amount of 4.0% [4]. To ensure a more stiffness of pavement, the cement additive was used in amount of 1.5%.

4. Design of mineral mix with foamed bitumen

In order to assess the impact of fine-grained mineral material on the mechanical properties of the base course deep cold recycling with foamed asphalt, the investigation program was designed. It consisted of the two stages.

In the first stage there were defined the basic physical and mechanical properties of recycled base course such as: stability, stiffness in accordance with Marshall methodology and indirect tensile strength [5].

The second stage was referred to the study on determination of resistance to the water effects by using of TSR ratio [2]. The results of the first stage are presented in Figures 2 and 3, while the results of second stage in Figures 4 and 5.

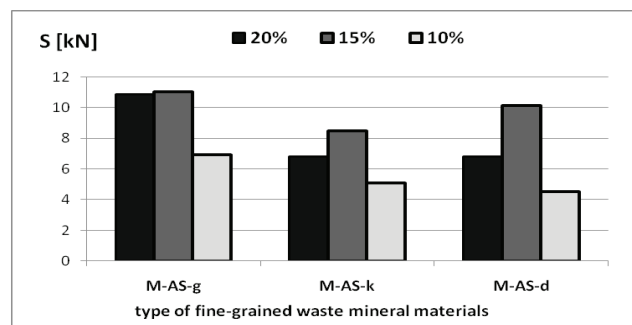


Fig. 2. The stability according to Marshall

It was found that the base course with foamed bitumen and gabbro fine-grained mineral material was characterized by the highest values of stability according to Marshall in all range of content of mineral dust (M-AS) [2], the rest mixtures with the same concentration of the waste material was characterized by a much smaller value of the stability (Fig. 2).

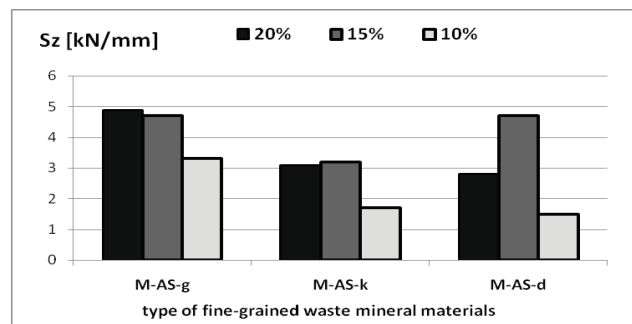


Fig. 3. The stiffness according to Marshall methodology

The value of stiffness according to Marshall is a function of stability. The greatest value of the stiffness (Fig. 3) were reached all mixtures of M-AS-g in the scope of dosage of fine-grained mineral material – 20%, 15% and 10%.

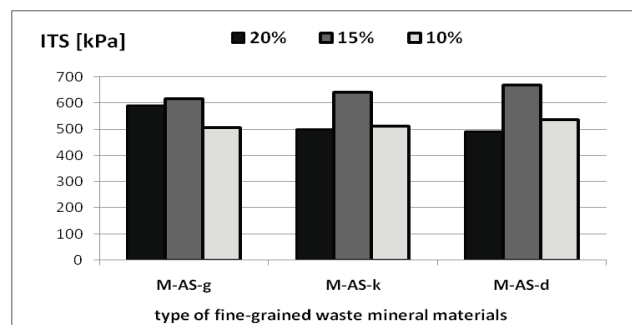


Fig. 4. Indirect tensile strength (ITS) base course

The technology of deep cold recycling mixes with foamed bitumen, with dolomite and gabbro fine-grained mineral material is resistant to the effects of water in all variant of mineral dust (Fig. 4). The minimum value of the ITS ratio (Fig. 5) was obtained in all mixes which waste material was incorporated in amount of

15%. It should be noted that the recycled base course, are resistant to the effects of water according to the criterion $TSR_{min} = 0.7$ [2]. Only the mix marked M-AS-k at a concentration of mineral dust of 15% is vulnerable to the effect of the water equal 0.58.

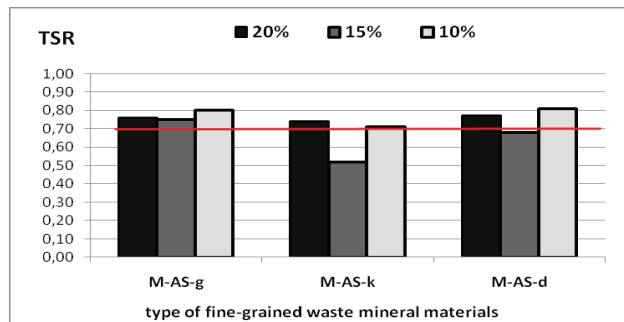


Fig. 5. Water sensitivity ratio (TSR) base course

5. Conclusions

From the analysis of the test results of base course in the recycling technology with foamed bitumen, the following conclusions can be drawn:

1. In order to apply the fine-grained mineral material is necessary to identify its characteristics and especially determining the value of pH, content of clay, the specific surface and volume of voids.
2. The best values of stability and stiffness according to Marshall methodology for all the recycled mixes were obtained at a concentration of 15% fine-grained waste material.
3. All mineral mixtures with foamed bitumen and waste material are resistant to the effects of water, at a concentration of 20% of grains less than 0.075 mm.
4. Due to the functional properties of mixes of in the recycling technology, the most beneficial is using a waste material from the gabbro aggregate in amount of 15%.

References

- [1] Grzybowski A.: 8/1997. Drogownictwo. *Stosowanie do betonów asfaltowych mączki mineralnej z układu odpylania otaczarki*, s. 241-244.
- [2] Wirtgen Cold Recycling Manual. Wirtgen GmbH, Windhagen, Germany 2006.
- [3] Grzybowski A.: 1/2001. Drogownictwo. *Kryteria oceny przydatności wypełniaczy do mieszanek mineralno-asfaltowych*, s. 25-28.
- [4] Iwański M., Chomicz A.: 8/2006. Drogownictwo. *Przydatność stosowanych w Polsce asfaltów do spieniania*, s. 267-271.
- [5] Rafalski L.: *Podbudowy drogowe*. IBDiM. Warszawa 2007, s. 110-116.

Wpływ właściwości pyłów mineralnych na podbudowy z asfaltem spienionym

1. Wstęp

Drobnopiękny materiał mineralny powstaje jako „odpad” podczas wytwarzania mieszanki mineralno-asfaltowej w wytwórni w procesie odpylania kruszywa oraz podczas procesu technologicznego wytwarzania kruszyw w kopalni.

Wprowadzenie surowych wymogów środowiska określających zawartość pyłów przemysłowych emitowanych do atmosfery na 100 mg/m^3 [1]. Wprowadzenie norm środowiskowych spowodowało konieczność zastosowania alternatywnego systemu odpylania jakim są filtry workowe. Stosowanie filtrów workowych przez WMA powoduje zatrzymanie niemal całości pyłów mineralnych podczas produkcji MMA. Tak otrzymane pyły są materiałem trudnym do utylizacji, praktycznie jest brak możliwości wykorzystania tego materiału ponownie.

Wstępna analiza technologii recyklingu głębokiego na zimno konstrukcji nawierzchni z zastosowaniem asfaltu spienionego wykazała, że właśnie przy jej realizacji potencjalnie istnieje możliwość zastosowania drobnopięknego materiału mineralnego. Mieszanka mineralna recyklowanej podbudowy w zakresie tej technologii może zawierać od 5 do 20% [2] części mineralnych mniejszych od $0,075 \text{ mm}$ – czyli pyłów mineralnych.

2. Badania właściwości funkcjonalnych drobnopięknego materiału mineralnego

Przedmiotem badań w aspekcie zastosowania drobnopięknego materiału mineralnego w technologii recyklingu głębokiego na zimno z asfaltem spienionym były trzy rodzaje pyłów mineralnych, które różniły się od siebie miejscem pochodzenia oraz składem mineralogicznym. Dwa z nich są uzyskane z układu odpylania kruszywa na wytwórni mieszank mineralno-asfaltowych – dolomitowe (D) oraz gabrowe (G). Materiał drobnopiękny z piaskowca kwarcytowego (K) jest uzyskany z procesu płukania kruszywa na kopalni.

Określono właściwości funkcjonalne takie jak: powierzchnię właściwą określoną w aparacie Blaine’a

(Pw), zawartość minerałów ilastych – wskaźnik MBF, oznaczenie pustych przestrzeni suchego, zagęszczanego wypełniacza AVR.

Badanie podstawowych właściwości funkcjonalnych ma na celu określenie przydatności pyłów mineralnych w aspekcie wykorzystania do podbudowy z asfaltem spienionym w technologii recyklingu głębokiego na zimno.

Maksymalną wartość powierzchni właściwej PW osiągnęły pyły mineralne gabrowe (G) a następnie dolomitowe (D). Najmniejszą natomiast powierzchnią właściwą charakteryzowały się pyły z piaskowca kwarcytowego (K).

Największą wartość wskaźnika błękitu metylenowego MBF charakteryzujące zawartość minerałów ilastych w badanych pyłach, posiada materiał odpadowy z piaskowca kwarcytowego, co może być spowodowane występowaniem w pokładach skalnych ilołułka skalnego.

Najbardziej kwaśnym jest materiał z piaskowca kwarcytowego o wartości $\text{pH} < 4,5$. Drobnopiękny materiał mineralny charakteryzuje się wartością pH taką samą jak skały z jakich je uzyskano. Należy zauważyć, że wszystkie badane pyły osiągnęły podobną wartość AVR [%] na poziomie 55-57%. Największą wartość AVR [3] osiągnęły pyły z piaskowca kwarcytowego, najmniejszą natomiast pyły z kruszywa dolomitowego. Może być to związane z twardością pyłów, a raczej kruszywa z jakiego zostały uzyskane oraz uziarnienia pyłów.

3. Projekt mieszanki mineralnej

W celu oceny wpływu dodatku drobnopięknego materiału mineralnego do mieszanki mineralnej z asfaltem spienionym w technologii recyklingu głębokiego na zimno zaprojektowano trzy różniące się od siebie procentową zawartością pyłów mineralnych (20%, 15%, 10%) oraz rodzajem pyłu mineralnego.

Mieszanke mineralną recyklowanej podbudowy stanowił materiał istniejący w postaci destruktu asfaltowego uzyskanego z sfrezowanych warstw konstrukcyjnych, kruszywa dolomitowego $31,5 \text{ mm}$ stanowią-

cy uprzednio podbudowę z kruszywa stabilizowanego mechanicznie oraz materiał doziarniający w postaci pyłów mineralnych (gabro, piaskowiec kwarcytowy oraz dolomitowych). Jako lepsze zastosowano asfalt spieniony Nyfoam85 w ilości 4,0% [4]. Zastosowano również dodatek cementu w ilości 1,5%.

4. Projekt mieszanki mineralnej z asfaltem spienionym

W celu oceny wpływu drobnoziarnistego materiału mineralnego na właściwości mechaniczne podbudowy wykonanej w technologii recyklingu na zimno z asfaltem spienionym opracowano program badawczy składający się z dwu etapów.

W etapie pierwszym określono podstawowe właściwości fizyczno-mechaniczne recyklowanej podbudowy: stabilność i osiadanie wg Marshalla, sztywność wg Marshalla, wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [5].

W drugim etapie badań określono odporność recyklowanych podbudów na oddziaływanie wody oraz wskaźnik TSR, w oparciu o ocenę jej wytrzymałość na pośrednie rozciąganie po oddziaływaniu wody IT-Swoda [2].

Dokonując analizy rezultatów badań mieszanki recyklowanej podbudowy, można stwierdzić, że podbudowa z asfaltem spienionym i drobnoziarnistym materiałem mineralnym pochodzenia gabrowego charakteryzuje się największą wartością stabilności wg Marshalla dla wszystkich procentowych ilości pyłów mineralnych założonych na etapie projektowania M-AS [2], pozostałe mieszanki mineralno-asfaltowe z tą samą koncentracją materiału odpadowego charakteryzują się znacznie mniejszą wartością stabilności.

Wartość sztywności wg Marshalla jest analogiczna do wartości stabilności. Największą wartość sztywności osiągnęły wszystkie mieszanki M-AS-g w zakresie stosowanych drobnoziarnistych materiałów mineralnych – 20%, 15% oraz 10% w mieszance mineralnej.

Mieszanka podbudowy wykonana w technologii recyklingu głębokiego na zimno z asfaltem spienionym, z drobnoziarnistym materiałem mineralnym gabrowym oraz dolomitowym jest odporna na oddziaływanie wody we wszystkich badanych koncentracjach. Minimalną wartość wskaźnika ITSR uzyskano we wszystkich mieszankach przy koncentracji drobnoziarnistego materiału odpadowego równej 15%. Należy zaznaczyć że recyklowane podbudowy, są odporne na oddziaływanie wody wg kryterium IT-SR_{min} = 0,7 [2]. Jedynie podbudowa M-AS-k przy

koncentracji pyłów ilości 15% jest nieodporna na oddziaływanie wody TSR = 0,58.

5. Wnioski

Dokonując analizy wyników badań laboratoryjnych mieszanek recyklowanych podbudów z asfaltem spienionym w aspekcie wpływu ilości drobnoziarnistych mineralnych materiałów odpadowych na właściwości recyklowanej podbudów, można sformułować następujące wnioski:

- w celu zastosowania drobnoziarnistego materiału mineralnego niezbędne jest dokonanie rozpoznania jego właściwości, a zwłaszcza określenie kwasowości pH, zawartości części ilastych, powierzchni właściwej oraz objętości wolnych przestrzeni,
- najkorzystniejsze wartości stabilności oraz sztywności wg Marshalla dla wszystkich recyklowanych mieszanek osiągnięto przy koncentracji 15% drobnoziarnistego materiału odpadowego,
- wszystkie mieszanki mineralne z asfaltem spienionym oraz materiałem odpadowym są odporne na oddziaływanie wody, przy koncentracji 20% ziaren poniżej 0,075 mm,
- ze względu na właściwości funkcjonalne mieszanki recyklowanych podbudów najkorzystniejsze jest zastosowanie materiału odpadowego z kruszywa gabro w ilości 15%.

OLD BRIDGES IN NEW TIMES. Searching for hidden quality

Abstract

Many bridges in The Netherlands are meanwhile 40-50 years old. Those bridges have been designed according to old design codes, which do not reflect the state of the art of today anymore. Moreover, the traffic loads have been increased substantially. If those bridges are recalculated according to modern design codes they often do not fulfill the safety standards. In spite of that, those bridges mostly do not show significant distress, which denies the results of the analysis. Obviously there are hidden reserves in bearing capacity. To detect and quantify these is an important task.

1. Considerations with regard to service life design

Until quite recently, the design of reinforced concrete structures was only based on structural safety and serviceability. Experience with damage due to corrosion and doubtful concrete quality showed, however, that design for durability should be on the same level as design for safety and serviceability. In future codes design for service life should become a major design task. In this respect the development of a new Model Code for Concrete Structures should be noted. Figure 1 shows schematically the idea behind design for service life. At the vertical axis the capitals R and S represent Resistance (R = Resistance) and Load (S = Sollicitation, Fr.) respectively. The dotted line with upward tendency represents the increase of traffic load in time.

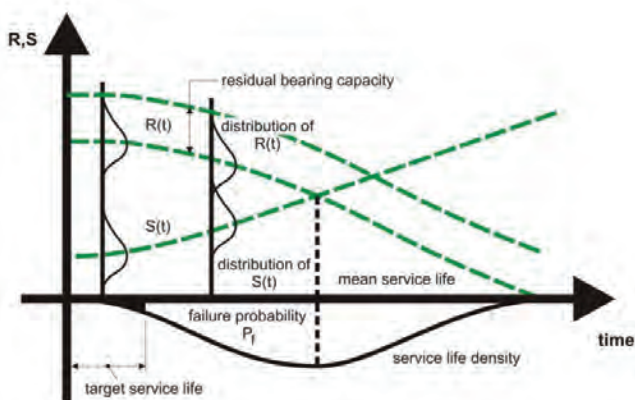


Fig. 1. Representation of the principle of design for service life

The lower of the two declining dotted lines shows the decrease of bearing capacity in time. Both the bearing capacity and the load are subjected to scatter. The condition $Z = R(t) - S(t)$ means that the structure fails, which should be avoided with a defined degree of reliability. If the corresponding reliability index β is exceeded, the decision should be made to upgrade the structure.

2. Results of a “quick scan” assessment of the bearing capacity of Dutch Bridges

In the Netherlands the bearing capacity of many bridges, built in the period 1960-1970, was investigated. The results of “quick scans” carried out by design offices, showed a remarkable result. Table 1 shows a small selection of different bridge types. The assessment of the bearing capacity was carried out under the assumption of modern traffic loads and actual building codes, whereas for concrete and steel the original design strengths were used. The last column in Table 1 shows the so-called UC-values, where UC stands for “Unity Check”. In this analysis the safety values for the loads and the materials are removed: the UC-value is the relation between maximum load on the bridge in use to the bearing capacity. If the UC-value is larger than 1, this means theoretically that the bearing capacity is insufficient. The Table shows unexpectedly high values. In all cases the shear capacity is governing.

The highest UC values were found for T-beam decks and solid slab bridge decks (Fig. 2 and 3).

Table 1. Results of quick scans for some bridges

Bridge number	Category	Year	UC-Value
37E-122	Culvert	1996	1.89
37F-110	T-Beam deck	1970	2.43
38D-103	Solid slab	1936	4.53
38F-108	Subway	1966	1.61
38G-112	Subway	1961	1.18
38G-103	T-Beam deck	1959	3.13
39G-114	Straight solid slab	1959	2.85
52G-105	Skew solid slab	1969	3.53



Fig. 2. T-beam bridge deck



Fig. 3. Solid slab bridge deck

In spite of the alarming UC-values, however, inspections did not show signs that confirmed the expectation of a serious lack of bearing capacity. Obviously there is a substantial residual bearing capacity, which means that the real bearing capacity is significantly larger than calculated. Therefore in Figure 1 a second declining line is shown, representing this higher bearing capacity. The vertical distance between the lines represents the hidden bearing capacity. It is clear that a more accurate determination of this reserve capacity is of large significance and should be regarded before eventually a decision for retrofitting of the bridge is taken.

3. Hidden bearing capacities

3.1. Considerations with regard to the concrete compressive and tensile strength

The first investigations of the bearing capacity of the bridges were carried out using the original design values for concrete and steel. The bridges were built with concrete of strength class C20/25. However, after 28 days the strength of the concrete still increases significantly, especially if a period of decades is concerned. Tests on drilled cores, taken from the bridges, showed even that the mean concrete strength is in the range 60-85 N/mm². Those high values can be explained by the fact that the cement particles used in those early days were relatively coarse, so that the hydration process will continue for a long time, causing a substantial gain of strength. The compressive strength is an important factor, but not the most important. Especially with regard to the shear capacity the tensile strength plays an important role, especially in solid slabs which normally do not contain shear reinforcement. In most design codes, the shear capacity is a direct, or an indirect, function of the concrete tensile strength. With regard to the concrete tensile strength, however, a remarkable observation was made. Tests on the drilled cylinders showed that the splitting tensile strength was in the range 4-5 N/mm², whereas the axial tensile strength was only in the range 1-2 N/mm² (Fig. 4).

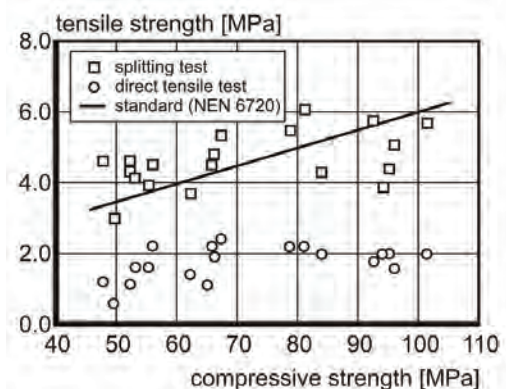


Fig. 4. Direct tensile strength and splitting tensile strength as a function of the concrete compressive strength, as determined on drilled cylinders taken from concrete bridges in the Netherlands

According to EC-2 the ratio axial tensile strength to splitting tensile strength should be 0.9, whereas the new Model Code 2010 proposes even a value 1.0. An important observation in Figure 4 is that the scatter in the values of the splitting tensile strength and the axial tensile strength is about the same. A possible explanation for the difference between splitting tensile strength

and axial tensile strength is given in Figure 5. During casting and vibrating of the concrete, under the coarse aggregate water layers are built (bleeding), see Figure 5 left. Especially the concrete of those days was sensitive to this type of phenomenon, since in that period no superplasticizers were used yet, so that excess water was necessary for obtaining the required workability.



Fig. 5. Drilled cylinder with visual flaw under one of the large particles (weakened interface)

The weakened interfaces below coarse aggregate particles explain the low axial tensile strength of the concrete. On the splitting tensile strength the weak areas have no large influence, since they are not in the planes where cracks are expected to develop. The same holds true for the cylinder compressive strength. In beams and slabs loaded in shear at first bending cracks occur, in a direction perpendicular to the axis of gravity. Such cracks are not influenced by the weak interfaces. Only after the transition from bending cracks to inclined shear cracks there might be an influence, but this is only at the stage that the shear crack is tending to progress at a low angle with the member axis, which is already near to shear failure. Tests have been carried out between strips, sawn from old bridges, and newly made strips with the same geometry, reinforcement and concrete compressive strength. They show that the behaviour is similar, which confirms that the weak interfaces under the coarse aggregates do not play a significant role with regard to the shear carrying behaviour. The shear capacity can therefore be calculated with the usual formula's, introducing the measured cylinder compression strength.

The results of this investigation are more or less comparable with the results of tests carried out some years ago at TU Delft. Figure 6 shows a shear test carried out on a strip, sawn out of an older bridge.



Fig. 6. Shear tests on beams damaged by many horizontal cracks due to Alkali Silica Reaction (TU Delft)

This solid slab bridge showed a large number of short horizontal cracks, due to the effect of Alkali Silica Reaction. The cracks can be explained on the basis of the swelling of the concrete under the influence of the ASR. In the horizontal direction a lot of reinforcement was available, both at top and bottom, which restrained the horizontal extension, and generated a type of axial prestressing. Therefore no vertical cracks occurred. In the vertical direction, however, the extension could occur freely so that the cracks were not suppressed. A considerable reduction of the shear capacity was feared, because cylinders drilled from the bottom, often showed tensile strength equal to 0, caused by the horizontal cracks. The tests on the severely damaged slab strips, showed however a reduction of the shear capacity of not more than 25%.

3.2. Consideration with regards to the choice of the method for the determination of the bearing capacity

Design of structures is mostly carried out using simplified formulations. For instance in the case of slabs, often the lower bound theory of the theory of plasticity is used (strip method, or equilibrium

method). The slab is simplified to a system of independent strips, to which parts of the loads can be attributed. The sum of the bearing capacity of the strips is assumed to be equal to the capacity of the overall system. This method of design is simple, but results in larger amounts of reinforcement than e.g. a design on basis of the theory of elasticity. However, when in case of an investigation of the bearing capacity of an existing structure the question is raised which is the most probable real bearing resistance, lower bound models are not the appropriate tool, since they give too conservative results. An alternative is here the use of the theory of plasticity, investigating and comparing the bearing capacity of a number of kinematic models in order to find the minimum capacity.

Although meanwhile thousands of shear tests on beam type of elements have been carried out, there are hardly test results available for the shear capacity with concentrated loads near to line supports. Analyses of the bridge bearing capacity in recent times showed that appropriate modes for this loading case would be very welcome. Rodrigues, Muttoni and Olivier [1] carried out interesting tests in this respect. They investigated the shear capacity of the cantilevering part of bridge decks in box girder bridges. Figure 7 shows the cracking patterns in the upper and the lower parts of the slab. The researchers demonstrated that the behaviour can principally be described with the yield line theory. A complication is however the possible failure in shear before the kinematic model could fully develop. In the cases considered, the theoretical bearing capacity according to the yield line theory was nearly reached.

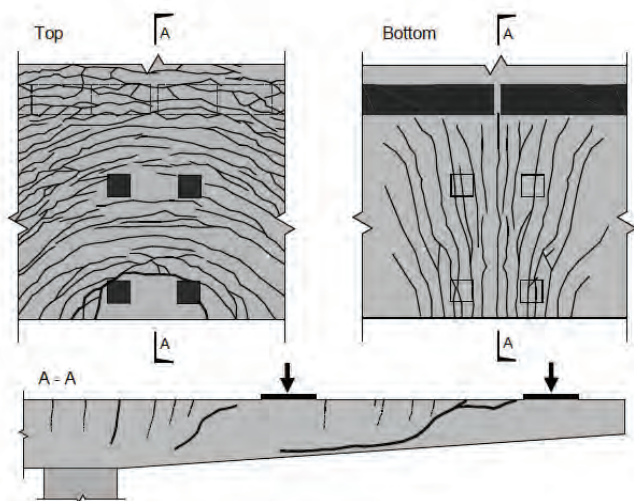


Fig. 7. Experiment investigating the behaviour of the cantilevered part of a box girder under a combination of concentrated loads (Rodrigues, Muttoni and Olivier [1])

3.3. Compressive membrane action in slabs

The design of solid slabs is carried out already for many years under the assumption that in case of a load perpendicular to the slab only bending and torsional moments occur. There is, however, another effect which is mostly ignored in design, but can significantly contribute to the bearing capacity. Already in 1955 Ockleston [2] carried out a test on one of the inner slabs in a slab field in the Old Dental Hospital in Johannesburg (that was available for research since it was bound to be demolished). The inner decks failed at a load which was about twice the theoretical load according to the yield line theory. The increase of the bearing capacity was explained on the basis of compressive membrane action. This mechanism occurs under the influence of a restraint of lateral deformations due to the surrounding part of the slab. The mechanism is explained in Figure 8.

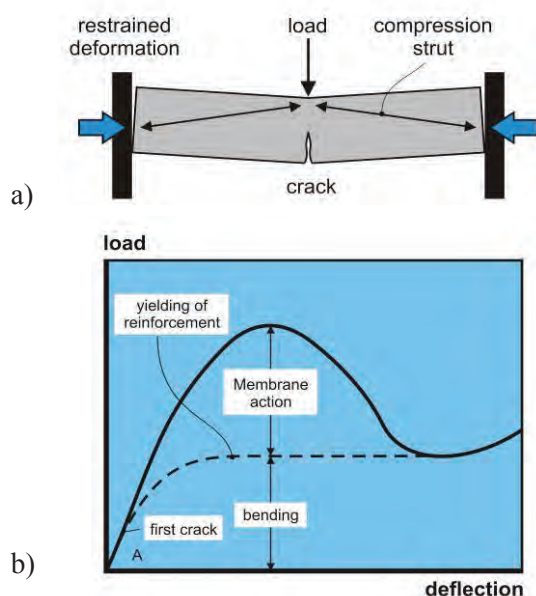


Fig. 8. Compressive membrane action in a bridge deck (a) and interaction between membrane action and bending (b)

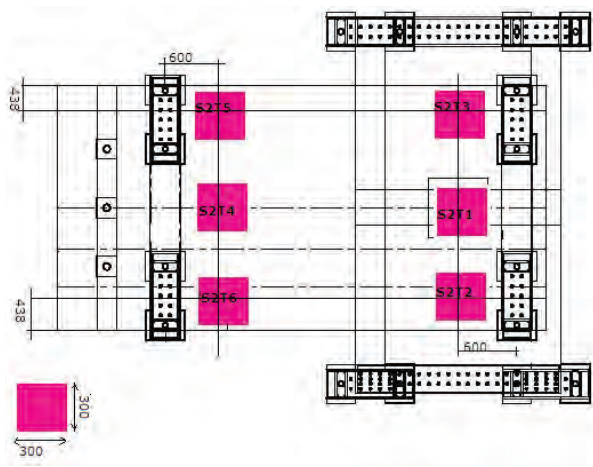
As a result of the development of cracks at midspan and at the edges, a mechanism occurs, in which the slab tries to expand in lateral direction. Since this lateral extension is restrained a compressive arch forms, which is able to sustain appreciable forces. The increase of the bearing capacity depends on the degree of restraint. Already in the sixties it was demonstrated by tests (Tong, Bachelor [3]) that the punching shear capacity is considerably increased by compressive membrane action. The Canadian and New Zealand Building Recommendations allow the consideration of this effect in design. Although

in these recommendations conservative values are given for the effect of compressive membrane action, considerable savings of reinforcement are obtained. Considering compressive membrane action, only a reinforcement ratio of about 0.5% is necessary, whereas without compressive membrane action about 1.7% is necessary.

The fact that up to now for the design of bridges in Europe compressive membrane action was not regarded means that there is still a considerable residual capacity with regard to bending and shear. Figure 9 shows a test by Taylor [4], carried out recently on a bridge in Nord Ireland. The reinforcement in the deck was applied in the middle of the deck plate. The loads reached values of 3-5 times the theoretical values, calculated without compressive membrane action. In none of the 12 tests failure occurred. The tests had to be stopped because the limit of the test facility was reached.



a)



b)

Fig. 9. Tests at TU Delft on solid slabs subjected to concentrated loads near the supports

3.4. Loads near to supports

From the control of the bearing capacity of solid slab bridges in the Netherlands it turned out that often loads near to supports, single or in combination, are governing for the shear bearing capacity, at least according to the design models. Therefore it was investigated whether the design practice in combination with the code requirements, isn't too conservative. According to those design methods the load is spread under angles of 45° to the support and then compared with the limit values for shear. Figure 9 shows the test equipment for a solid end slab in a continuous statically indeterminate bridge. A concentrated load, simulating a large wheel load, is applied near to the end support. The effect of loads was considered for linear end – and intermediate supports.

Figure 9b shows a top view on the slab with the different position of the loads. The tests ST1, ST2 and ST3 were carried out near to the linear end support (hinged support). The tests ST4-ST6 were carried out near to the intermediate support (with bending moments from adjacent slab fields). Table 2 shows that the bearing capacities found in the tests were considerably higher than obtained from the equations according to the Dutch Building Code VBC.

Table 2. Tests on slabs with concentrated loads near to supports: comparison between test results and results obtained with Dutch Building Recommendations

Test No.	P_u (test) (kN)	P_u (Dutch Code) (kN)
S1T1	954	539
S1T2	1023	533
S1T3	758	491
S1T4	731	470
S1T5	851	501
S1T6	659	501

4. Improvement of the reliability of nonlinear finite element analyses

In order to find out whether a bridge has a sufficient bearing capacity very often nonlinear finite element calculations are used. From experiences with NLFEM calculations it is known that this method is particularly useful for the interpretation of test results. As Reinhardt [5] mentioned in his retirement lecture at TU Delft “Measuring and calculating belong together”. However, it is much more difficult to predict the behaviour and a reliable value for the

bearing capacity of existing bridges, without prior available test data which could be used for calibration. Furthermore, using nonlinear FEM calculations, there is a large choice with regard to element types, element sizes, calculation procedures and material parameters. A possibility to enhance the reliability of NLFEM calculations is to carry out calibrations on test results obtained on similar types of elements. Figure 10 shows an example. In order to develop a basis for a reliable prediction of the behaviour of prestressed T- and I-beams, trial calculations and calibrations are carried out with the numerical programs DIANA and ATENA on the behaviour of long prestressed beams known from literature. This calibration on similar types of beams, the behaviour of which is well documented, is expected to increase the reliability of NLFEM prediction.

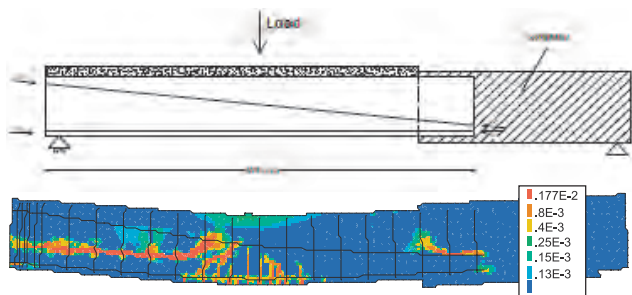


Fig. 10. NLFEM analysis of a beam under shear loading as a part of a research program to develop tailor-made analysis programs for particular types of beams

Meanwhile a practitioner's guide for NLFEM analysis has been adopted in the Model Code for Concrete Structures 2010 [6].



Fig. 11. Proof loading of an existing bridge with especially instrumented German Loading Truck (BELFA) in The Netherlands

Another way of optimizing the use of nonlinear numerical programs for the reliable calculation of the bearing capacity of existing bridges is to combine

them with proof loading and Acoustic Emission. Figure 11 shows the proof loading of a small bridge with the specially developed German vehicle BELFA (BELasting FAhrzeug = Loading Truck). In order to guide the testing, acoustic emissions are registered. In future the combination of proof loading, acoustic emission and numerical analysis is seen as an important method for the estimation of the behaviour of existing bridges. A new research program, aiming at further optimizing this method is at the onset of starting at TU Delft.

5. Conclusions

1. When old bridges are analyzed for the higher traffic loads of today, and the old design data are used for this analysis, often the analysis will suggest that the bearing capacity is insufficient.
2. The bridges dispose of considerable residual capacity with regard to higher concrete strength after decades of hydration, compressive membrane action, better redistribution than assumed in design.
3. Verification of the results of concrete strength on the basis of drilled cylinders should be done with utmost care.
4. Nonlinear FEM methods can be developed tailored to the prediction of the behaviour of particular types of bridge beams.
5. The combination of proof loading, numerical analysis and acoustic emission deserves further development, since it may become an important tool for future assessment of existing bridges.

References

- [1] Rodrigues V., Muttoni A., Olivier O., Ort L.: *Large Scale Tests on Bridge Cantilevers Subjected to Traffic Loads*, Proceedings 2nd International fib Congress, June 5-8, 2006, Napels.
- [2] Ockleston A.J.: *Load tests on a three storey reinforced concrete building in Johannesburg*, The Structural Engineer, October 1955, Vol. 33, pp. 304-322.
- [3] Tong P.Y., Batchelor B. de V.: *Compressive membrane action enhancement in two way bridge slabs*, Cracking, Deflection and the Ultimate Load of Concrete Slab Systems, SP-30, ACI Detroit, 1971, pp. 271-286.
- [4] Taylor S.E., Rankin, B., Cleland, D.J., Kirkpatrick, J.: *Serviceability of Bridge Deck Slabs with Arching Action*, ACI Structural Journal, Jan-Feb 2007, pp. 39-48.
- [5] Reinhardt, H.W.: *Meten en rekenen horen bij elkaar (Measuring and calculating belong together)*, Goodbye speech Delft University of Technology, 15. December 1988.
- [6] Fib SAG 5: *"Model Code for Concrete Structures 2010, first complete draft"*, fib Bulletins 55 and 56, 2010.

MICROMECHANICAL MODELS OF DUCTILE FRACTURE OF METALS

Abstract

In the present paper a few models of ductile fracture were presented. Alloys used in civil engineering most often crack due to void nucleation and growth. Voids are created on the border between matrix and inclusions (made of sulphur and manganese compounds). The majority of described models can be used for modelling of ductile fracture in micro scale. The Gurson Tvergaard Needleman (GTN) material model was found to be the most useful in modelling of plastic deformation of existing steel elements and structures in civil engineering.

This paper was presented at seminar for Ph.D. candidates at Kielce University of Technology.

Keywords: ductile fracture models, voids

1. Introduction

The evaluation of the reliability of civil engineering structures in service constitutes an important issue. In engineering practice, errors at the design or during execution stages are found relatively frequently. In many cases, negligence in the upkeep of structures is also noted (e.g., the lack of proper maintenance, overloading, etc.). All those factors sometimes cause concerns over the reliability of structures. For a uniaxial state of stress, the analysis does not present major difficulties. Computations for elements working under complex states of stress, however, are inherently much more complicated and they require employing residual strength hypotheses. For steel structures, it is usually Huber-Mises-Hencky criterion. Numerous investigations demonstrate that applicability of this criterion to stress analysis under failure conditions (plasticity range) is highly restricted [1]. In order to perform advanced analyses of structural elements with damages, it is necessary to use different computational tools. The complexity of those, however, makes it difficult or even impossible to apply them to engineering practice. Difficulty related to identifying the model parameters in practice constitutes yet another barrier to the application of complex computational tools. The paper presents a review of the major models of ductile fracture of metals, those which account for the development of the structure micro-damages.

2. Initiation and development of voids as a mechanism of ductile fracture

2.1. Void Initiation at Inclusions and Precipitates

Computing structural elements working under limit states can be performed using the methods of fracture mechanics. Metal fracture is plastic in character above the temperature of plastic–brittle transition [2]. It can occur due to one of the following basic mechanisms, namely void growth and coalescence, necking or shear (Fig. 1).

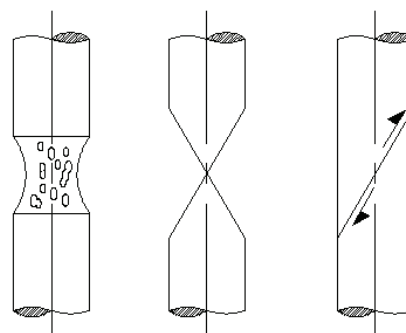


Fig. 1. Mechanisms of failure of ductile materials (from left to right): void growth and coalescence, section necking and shear

Metal alloys used in engineering contain the second phase particles (mostly sulphur and manganese compounds) dispersed within the structure of the base material. It is therefore justifiable to perform

the analysis of plastic states using porous material models that account for the presence and development of voids in the loaded material [3]. Voids are defects of steel microstructure which can be initiated at inclusions and precipitates. It means that in practice the second phase particles located in the structure of the base material take part in the process of metal and technical alloys cracking [4]. The sizes of the second phase particles range from 10^{-5} to 10^{-8} m. In the process of plastic flow, they are the particles of small dimensions that play the most important role. Their volume fraction and distribution depends on the method of material machining. The void nucleation most frequently involves the separation of the matrix which is being plastically deformed from the hard second phase particle. When applying models of porous materials, it is necessary to know the kind and magnitude of inclusions and precipitates. Their shapes are usually complex, yet for the sake of simplifying the computations, it is most frequently assumed that the particles are spherical in shape. The volume of the sphere is equal to that of a particle. The void volumetric fraction f is defined as the quotient of the volume occupied by voids divided by the total volume of the material. In practice, porosity is defined by means of the analysis of the surface of a metallographic specimen.

The initiation of voids is most commonly found at the boundaries of inclusions and precipitates. In the case the particle is strongly bound to the matrix, voids are initiated through particle fracture. When, on the other hand, the bond is weak, the particle gets detached. Basically four groups of criteria of void initiation are found:

- energy criteria,
- local critical stress criteria,
- local critical strain criteria,
- complex criteria.

The solutions most frequently found and quoted in the literature on the subject [2] are presented below:

- Gurland and Plateau model states that the void formation occurs when the elastic strain energy accumulated in the surroundings of the second phase particle is equal to, or greater than the energy necessary to form a new surface. The phenomenon takes place in the plastic range if the following dependence holds:

$$q\sigma = \sqrt{\frac{E\gamma}{d}} \quad (1)$$

where: q – stress concentration coefficient, d – particle diameter, E – Young's modulus for the matrix, γ – surface energy, where:

$$\gamma = \gamma_m + \gamma_p + \gamma_{mp} \quad (2)$$

where: γ_m – the matrix surface energy, γ_p – the particle surface energy, γ_{mp} – energy of the separation surface.

It was proved, however, that in addition to Gurland and Plateau condition being satisfied, critical stresses must be reached between the precipitate and the matrix for crack initiation to occur.

- For small particles, in order to determine the limit stress at the matrix – precipitate boundary, the continuum dislocation theory and Ashby's model can be applied:

$$\sigma'_{rr} = \tau_0 \left(1 + \sqrt{\frac{6\sqrt{6}\varepsilon_\gamma}{M\varepsilon_{0\gamma}}} \right) \quad (3)$$

where: ε_γ – non-dilatational strain, $\varepsilon_{0\gamma}$ – non-dilatational strain for shear yield point, M – Taylor's coefficient.

When the critical stress causing separation of the inclusion from the matrix (σ'_{rrc}) is known, it is possible to determine the strain that results in a void initiation:

$$\varepsilon_{c\gamma} = \frac{\varepsilon_{0\gamma} \overline{M}}{6\sqrt{6}} \left(\frac{\sigma'_{rrc}}{\tau_0} - 1 \right)^2 \quad (4)$$

- For large particles, the material hardening is taken into account in order to determine the stress at the precipitate – matrix boundary:

$$\sigma'_{rr} = \tau_0 \left[\left(\frac{\varepsilon_\gamma}{\varepsilon_{0\gamma}} \right)^{\frac{1}{n}} + \sqrt{3} \left(\frac{\sqrt{6}(n+1)}{M} \frac{\varepsilon_\gamma}{\varepsilon_{0\gamma}} \right)^{\frac{1}{n+1}} \right] \quad (5)$$

In the formula above, n denotes the consolidation exponent. The dependence was derived using the relationship between the average distance between precipitates λ , the precipitate radius r_0 and precipitate volume fraction f :

$$\frac{\lambda}{r_0} = \sqrt{\frac{2\pi}{f}} - \sqrt{\frac{8}{3}} \quad (6)$$

- In accordance with the critical strain criterion of Hancock and Cowling, void initiation occurs at the site where the strain reached a critical value, and is independent of the state of stress. The critical strain criterion is most frequently reached at external

loads higher than it is the case with the critical stress condition.

It should be emphasised that the results obtained with each of those criteria are strongly dependent on the size of the particle.

2.2. Void Development

Increase in load results in the void growth process. The so-called bridges, being in the state of plastic flow, are formed between voids. At increased load the necking of bridges occurs, which leads to the neighbouring voids coalescence and the initiation of the fracture process. If, additionally, a crack or a notch is present in the loaded element, the process of void growth is enhanced due to the local concentration of stresses. The process is accompanied by substantial plastic strains. It was proved their value at the instant of fracture may exceed 1. In this case, void coalescence is the sufficient condition for cracking to occur. A number of works focussed on the phenomenon of void growth. The results obtained in a few works are presented below [2, 4]:

In McClintock's model a void is used, cylindrical in shape, in rigid plastic matrix loaded in parallel to the cylinder longitudinal axis. The model employs Huber Mises Hencky criterion and the constitutive relationship for plastic flow of the form:

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{3\dot{\varepsilon}_e}{2\sigma_y} s_{ij} \quad (7)$$

where: s_{ij} – deviator of the stress tensor.

McClintock's solution states the dependence of the actual diameter of the void on the external deformations of the body $\varepsilon_z = \varepsilon_{33}$ and on hydrostatic stresses in the specimen:

$$\varepsilon_a = \int_0^t \dot{\varepsilon}_a dt = \int_{a_0}^a \frac{da}{a} = \ln \frac{a}{a_0} = \frac{\sqrt{3}}{2} |\varepsilon_z| \sinh \frac{\sigma_h}{k} - \frac{1}{2} \varepsilon_z \quad (8)$$

where: a – actual void diameter, a_0 – initial void diameter, k – yield point in pure shear

$$k = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}}, \quad \sigma_h - \text{mean hydrostatic stress acting}$$

far from the void.

According to McClintock, strongly hardened materials are characterised by the highest ductility. A high content of precipitates and a high degree of triaxiality of the state of stress, in turn, contribute to a decrease in the material ductility.

- Rice and Tracey conducted the same analysis for a spherical void. A single void existing in the material, or representing a sum of voids of the same total volume, was analysed. The following expression was derived:

$$\dot{\varepsilon}_{ia} = \frac{1}{a_0} \frac{da_i}{dt} \cong 2\dot{\varepsilon}_{izw} + 0,56\dot{\varepsilon}_{ezw} \sinh \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\sigma_h}{k} \right) \quad (9)$$

where: ε_{ezw} – effective strain, subscript i denotes the main direction of stresses and strains applied from the outside, subscript zw – values measured far from the void.

Rice and Johnson applied the discussed model to the analysis of a spherical void ahead of the front of a blunt crack, loaded in accordance with method I.

- Thomason's solution involves the analysis of cuboid voids located in rigid ideal plastic matrix, on which hydrostatic pressure σ_m and principal stresses σ_1 and σ_2 are exerted. According to Thomason, below a certain threshold inclusion volume fraction, fracture occurs by means of the necking of the whole section of the specimen. Above the limit value, however, fracture is caused by the necking of the bridges between inclusions.
- Brown – Embury model assumes that the greatest void strains occur in the loading direction. Fracture occurs at the instant when the length of micro-damages is equal to the distance between them. Let λ denote the distance between voids. From the Brown – Embury condition it follows that the crack is initiated when the void length also reaches value λ .

If the strain in the material is denoted as $\frac{d\varepsilon}{dt}$,

the deformation rate of void will be higher and will

reach the value $\frac{d\varepsilon_p}{dt} = c \frac{d\varepsilon}{dt}$. Thus the critical strain

in the material will amount to:

$$\varepsilon_c = \frac{1}{c} \ln(1 + \varepsilon_{pc}) \quad (10)$$

where: ε_{pc} – the critical strain of the void;
the void strain is expressed by the formula:

$$\varepsilon_p = \frac{\lambda - 2r_0}{2r_0} \quad (11)$$

where: r_0 – the initial radius of the inclusion.

Having taken into account dependences given above, a formula for the critical length of the void is obtained:

$$\lambda_c = 2r_0(1 + \varepsilon_{pc}) \quad (12)$$

Formulas presented above make it possible to derive dependences for the critical strain in a material:

$$\varepsilon_c = \frac{1}{c} \ln \left(\sqrt{\frac{\pi}{6f}} - \sqrt{\frac{2}{3}} + \varepsilon_{pn} \right) = \ln \frac{A_0}{A_c} \quad (13)$$

In the formula above, ε_{pn} denotes the strain necessary to initiate a void, A_0 – the initial cross-section area of the specimen, and A_c – cross-section area of the specimen at the instant of fracture.

The behaviour of particles located in loaded, elastic – plastic matrix depends to the greatest extent on the size of the particles and forces of interaction between particles and the matrix.

3. Gurson Tvergaard Needleman model

For issues concerning ductile fracture of technical alloys, the model of porous material first developed by A.L. Gurson [5] and later modified by Tvergaard and Needleman is often used. The macroscopic law of flow and the law of void volume fraction increase, which is a parameter of the material microstructure, are integrated in the model. Void volume fraction is defined as a ratio of the current volume of microvoids to the volume of the specimen, in accordance with the formula:

$$f = \frac{V_v}{V} \quad (14)$$

where: V_v – current void volume fraction, V – specimen volume.

It is assumed that strains and stresses are determined at the macroscopic level. Gurson Tvergaard Needleman yield criterion is reduced to the following form:

$$\Phi = \frac{\sigma_{eq}^2}{\sigma_M^2} + 2q_1 f \cosh \frac{3q_2 \sigma_m}{2\sigma_M} - 1 - q_3 f^2 = 0 \quad (15)$$

where: Φ – energy of non-dilatational strain, σ_{eq} – stress reduced in accordance with HMM criterion, σ_M – yield point, σ_m – mean stresses (arithmetic mean of the principal stresses), q_1, q_2, q_3 – Tvergaard's coefficients, f – current void volume fraction, defined by the following dependence:

$$f = \begin{cases} f & \text{for } f \leq f_c \\ f_c + \frac{\overline{f_F} - f_c}{f_F - f_c} (f - f_c) & \text{for } f_c < f < f_F \\ \overline{f_F} & \text{for } f \geq f_F \end{cases} \quad (16)$$

where: f_c – the critical void volume fraction corresponding to a decrease in the material strength, f_F – void volume fraction corresponding to the load bearing capacity of the material, $\overline{f_F} = [q_1 + (q_1^2 - q_3)^{0.5}] / q_3$.

The void volume fraction in the material is described by the expression:

$$df = df_{gr} + df_{nuc} \quad (17)$$

where: df_{gr} – the time derivative of the volume fraction of the voids already existing in the material, df_{nuc} – the time derivative of the volume fraction of the voids initiated in the deformation process.

The dependences presented above indicate that in order to apply the GTN model of material it is necessary to know the parameters that characterise the micro-structure and mechanical properties of a given material. Those primarily include:

- porosity,
- volume fraction of inclusions and precipitates,
- real tension curve,
- the critical plastic strain that causes void initiation,
- stress that is critical for cracking on the precipitate – matrix boundary.

4. Conclusions

The models of void nucleation and growth presented above make it possible to perform computations at the microscopic level. The application of those models to engineering practice is therefore difficult and sometimes even impossible. The GTN model can be used to analyse elements in the macro-scale in order to model the work of structural elements in limit states, while taking into account the real structure of the material. In the model, the concept of void volume fraction was introduced, which is a scalar measure of the degree of micro-damage development.

All the analyses performed so far using the GTN model involved laboratory specimens and a controlled state of stress. The literature on the subject does not provide the data concerning practical applications of the hypothesis to computations of elements in real structures. In the opinion of the author, the model under consideration can become a component of the system based on fracture mechanics, intended to compute the strength of the elements working under limit states.

References

- [1] Kossakowski P.: *Analysis of Load Bearing Capacity and Damage Development in St3S Steel (S235JRG2) in Complex States of Stress* (in Polish). 55 Scientific

- Conference of the Committee of Civil and Water Engineering of the Polish Academy of Sciences and the Science Committee of the Polish Association of Civil Engineers and Technicians, Kielce – Krynica, 20 – 25 September 2009.
- [2] Gołaski L.: *Elements of Experimental Fracture Mechanics* (in Polish). Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 1992.
- [3] Kossakowski P., Trąpczyński W.: *Numerical Simulation of S235JR Steel Failure Taking into Account the Impact of Microstructure Damages* (in Polish). Przegląd Mechaniczny, paper approved for printing.
- [4] Neimitz A.: *Fracture Mechanics* (in Polish). Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1998.
- [5] Gurson A.L.: *Continuum Theory of Ductile Rapture by Void Nucleation and Growth Part I – Yield Criteria and Flow Rules for Porous Ductile Materials*. Journal of Engineering Materials and Technology, 1977, 99, pp. 2-15.
- [6] Richelsen A.B., Tvergaard V.: *Dilatant plasticity or upper bound estimates for porous ductile solids*. Acta Metall. Mater., 1994, 42, pp. 2561-2577.
- [7] Corigliano A., Mariani S., Orsatti B.: *Identification of Gurson-Tvergaard material model parameters via Kalman filtering technique, I. Theory*. International Journal of Fracture, 2000, 104, pp. 349-373.
- [8] Hashemi S.H., Howard I.C., Yates J.R., Andrews R.M.: *Micro-Mechanical Damage Modelling of Notched Bar Testing of Modern Line Pipe Steel*. The 15th European Conference of Fracture – Advanced Fracture Mechanics for Life and Safety, Stockholm, August 11-13, 2004.
- [9] Needleman A., Tvergaard V.: *Numerical modelling of the ductile – brittle transition*. International Journal of Fracture, 2000, 101, pp. 73-97.

The article was co-funded by the EU through the European Social Fund, project *Development Programme of the Teaching Potential of the Kielce University of Technology – Education for Success, Human Capital Operational Programme*, agreement no. UDA – POKL.04.01.01 – 00 – 175/08-00.

Wiktor Wciślik

Mikromechaniczne modele ciągłego pękania metali

1. Wprowadzenie

Istotnym problemem w eksploatacji obiektów budowlanych jest ocena bezpieczeństwa ich pracy. W praktyce inżynierskiej stosunkowo często spotyka się błędy projektowe i wykonawcze. W licznych przypadkach pojawiają się również zaniedbania w zakresie utrzymania obiektu (np.: brak odpowiedniej konserwacji, przeciążenie itd.). Wszystkie te czynniki rodzą niekiedy poważne obawy o bezpieczeństwo pracy konstrukcji. W przypadku jednoosiowego stanu naprężenia analiza nie nastręcza większych trudności, jednak obliczanie elementów pracujących w złożonych stanach naprężenia jest ze swej natury znacznie bardziej skomplikowane i wymaga zastosowania hipotez wyężeńiowych. Dla konstrukcji stalowych jest to zazwyczaj hipoteza Hubera Misesa Hencky'ego. Liczne badania wykazały, że zastosowanie tej hipotezy do analizy naprężeń w stanach awaryjnych (zakres plastyczny) jest mocno ograniczone [1]. Zaawansowane analizy elementów konstrukcyjnych z uszkodzeniami wymagają użycia innych narzędzi obliczeniowych. Częstym proble-

mem jest jednak ich złożoność, która niekiedy utrudnia lub wręcz uniemożliwia zastosowanie w praktyce inżynierskiej. Istotną barierą są również trudności z praktyczną identyfikacją parametrów modelu. W niniejszej pracy przedstawiono przegląd najważniejszych modeli ciągłego pękania metali, uwzględniających rozwój mikrouszkodzeń struktury.

2. Inicjacja i wzrost pustek jako mikromechanizm pękania ciągłego

2.1. Inicjacja pustek na wtrąceniach i wydzieleniach

Obliczanie elementów konstrukcyjnych pracujących w stanach granicznych może być realizowane przy użyciu metod mechaniki pękania. Powyżej temperatury przejścia plastyczno-kruchego pękanie metali ma charakter plastyczny [2] i może następować na drodze jednego z podstawowych mechanizmów: wzrostu i łączenia pustek, szybkowania, lub ścięcia.

Stosowane w technice stopy metalowe zawierają cząstki drugiej fazy (przede wszystkim związki siarki i manganu) ułożone w strukturze materiału bazowego. Zasadnym jest więc, aby analizę stanów plastycznych prowadzić przy zastosowaniu modeli ma-

teriałów porowatych, które uwzględniają obecność i rozwój pustek w obciążanym materiale [3]. Pustki należą do defektów mikrostruktury stali i mogą być inicjowane na wtrąceniach lub wydzieleniach. Oznacza to, że w praktyce w procesie pękania metali i stopów technicznych biorą udział cząstki drugiej fazy ulokowane w strukturze materiału podstawowego [4]. Wielkość cząstek drugiej fazy waha się pomiędzy 10^{-5} a 10^{-8} m. W procesie plastycznego płynięcia najistotniejszą rolę odgrywają cząstki małych rozmiarów. Ich udział objętościowy oraz rozkład zależny jest od sposobu obróbki materiału. Nukleacja pustki następuje najczęściej poprzez oddzielenie odkształcającej się plastycznie osnowy od twardej cząstki drugiej fazy. Zastosowanie modeli materiałów porowatych wymaga znajomości rodzaju oraz wielkości wtrąceń i wydzielen. Ich kształt jest zazwyczaj skomplikowany, niemniej dla uproszczenia obliczeń zakłada się najczęściej, że cząstki mają kształt kuli o objętości równej objętości rozpatrywanej cząstki. Udział objętościowy pustek f definiowany jest jako iloraz objętości zajętej przez pustki do całkowitej objętości materiału. W praktyce porowatość określa się poprzez analizę powierzchni zglądu.

Inicjacja pustek ma zazwyczaj miejsce na granicach wtrąceń i wydzielen. W przypadku, kiedy cząstka jest silnie związana z osnową, pustki inicjowane są poprzez pękanie cząstek. Z kolei gdy wiązanie jest słabe, następuje oderwanie cząstki. Istnieją cztery zasadnicze grupy kryteriów inicjacji pustek:

- energetyczne,
- lokalnych naprężeń krytycznych,
- lokalnych odkształceń krytycznych,
- kryteria złożone.

Poniżej przytoczono rozwiązania najczęściej spotykane i cytowane w literaturze [2]:

- Model Gurlanda Plateau – określa powstanie pustki, gdy energia sprężysta zgromadzona w otoczeniu cząstki drugiej fazy jest równa lub większa od energii potrzebnej do utworzenia nowej powierzchni. Zjawisko to ma miejsce w zakresie sprężystym, jeżeli zachodzi zależność (1). Dowiedziano jednak, że do inicjacji pęknięcia, oprócz warunku Gurlanda Plateau, konieczne jest osiągnięcie naprężeń krytycznych pomiędzy wtrąceniem i osnową.
- Dla małych cząstek do wyznaczenia granicznego naprężenia na granicy osnowa – wydzielenie, można posłużyć się kontynualną teorią dyslokacji i modelem Ashbyego. Znajomość krytycznego naprężenia, powodującego oderwanie wtrącenia od

osnowy (σ_{rc}), pozwala na określenie odkształcenia powodującego inicjację pustki.

- W przypadku dużych cząstek w celu określenia naprężeń na granicy wydzielenie – osnowa uwzględnia się umocnienie materiału (5). W tym wzorze n oznacza wykładnik umocnienia. Zależność tą wprowadzono posługując się następującym związkiem średniej odległości między wydzieleniami λ , promienia wydzielen r_0 i udziału objętościowego wydzielen f (6).
- Warunek krytycznego odkształcenia wg Hancocka Cowlinga – inicjacja pustek zachodzi w miejscu, gdzie odkształcenie osiągnęło wartość krytyczną, niezależnie od stanu naprężenia. Najczęściej warunek krytycznego odkształcenia osiągany jest przy wyższych obciążeniach zewnętrznych niż ma to miejsce w przypadku warunku naprężeń krytycznych.

Należy zaznaczyć, że wyniki uzyskane za pomocą każdego z tych kryteriów są silnie zależne od wielkości cząstki.

2.2. Rozwój pustek

Pod wpływem zwiększającego się obciążenia następuje proces wzrostu pustek. Pomiędzy pustkami tworzą się tak zwane mostki, będące w stanie płynięcia plastycznego. Podczas zwiększania obciążenia mostki przewężają się, prowadząc do połączenia sąsiednich pustek oraz inicjacji procesu pękania. Jeżeli dodatkowo w obciążanym elemencie znajduje się pęknięcie lub karb, proces wzrostu pustek jest intensyfikowany przez lokalną koncentrację naprężeń. Procesowi temu towarzyszą znaczne odkształcenia plastyczne. Jak wykazano, ich wartość w chwili złomu może przekroczyć 1. Warunkiem pękania jest w tym przypadku łączenie się pustek. Zagadnieniu wzrostu pustek poświęcono szereg prac. Wyniki kilku z nich przedstawiono poniżej [2, 4]:

- Model McClintocka – pustka o kształcie walca w sztywno plastycznej osnowie obciążonej równolegle do osi podłużnej walca. W modelu zastosowano hipotezę Hubera Misesa Hencky'ego oraz związek konstytutywny płynięcia plastycznego postaci (7). Rozwiązanie McClintock'a określa zależność aktualnej średnicy pustki od zewnętrznych odkształceń ciała $\varepsilon_z = \varepsilon_{33}$ oraz naprężeń hydrostatycznych w próbce (8). Według McClintocka większą ciągliwością charakteryzują się materiały o dużym umocnieniu. Duża zawartość wydzielen i wysoki stopień trójosiowości stanu naprężeń przyczynia się z kolei do zmniejszenia ciągliwości materiału.

- Rice i Tracey przeprowadzili tę samą analizę dla pustki sferycznej. Analizowano pojedynczą pustkę istniejącą w materiale lub reprezentującą sumę pustek o tej samej łącznej objętości. Pozwoliło to na uzyskanie wyrażenia (9).

Rice i Johnson zastosowali omawiany model do analizy sferycznej pustki przed frontem stępienia pęknięcia, obciążonego wg sposobu I.

- Rozwiązanie Thomasona – analiza prostopadłościennych pustek umieszczonych w sztywno idealnie plastycznej osnowie i poddanych działaniu ciśnienia hydrostatycznego σ_m oraz naprężeń głównych σ_1 i σ_2 . Zdaniem Thomasona poniżej pewnego progowego udziału objętościowego wtrąceń złom następuje na drodze szybkowania całego przekroju próbki, natomiast powyżej wartości granicznej poprzez szybkowanie mostków między wtrąceniami.
- Model Brown’a Embury’ego – zakłada, iż największe odkształcania pustek mają miejsce na kierunku obciążania. Złom następuje w momencie, gdy długość mikrouszkodzeń jest równa odległości pomiędzy nimi. Niech λ będzie odległością pomiędzy pustkami. Z warunku Brown’a Embury’ego wynika, że pęknięcie zostanie zainicjowane, gdy długość pustki również osiągnie wartość λ . Jeżeli prędkość odkształcania materiału oznaczyć jako $\frac{d\epsilon}{dt}$, to prędkość odkształcania pustki będzie wyższa i osiągnie wartość $\frac{d\epsilon_p}{dt} = c \frac{d\epsilon}{dt}$. W związku z tym

krytyczne odkształcenie materiału będzie wynosić (10). Odkształcenie pustki wyraża się wzorem (11). Uwzględniając powyższe zależności, otrzymano wzór na krytyczną długość pustki (12).

Przytoczone wzory pozwalają na wyprowadzenie zależności na krytyczne odkształcenie materiału (13). W tym wzorze ϵ_{pn} oznacza odkształcenie niezbędne do zainicjowania pustki, A_0 – początkowe pole przekroju poprzecznego próbki, natomiast A_c – pole przekroju poprzecznego próbki w momencie złomu.

Zachowanie cząstek umieszczonych w obciążonej, sprężysto-plastycznej osnowie w największym stopniu zależy od wielkości cząstek oraz od sił wzajemnego oddziaływania pomiędzy cząstkami a osnową.

3. Model Gursona Tvergaarda Needlemana

W zagadnieniach ciągłego pęknięcia stopów technicznych często stosuje się model materiału porowatego opracowany przez A.L. Gursona [5], zmodyfikowany później przez Tvergaarda i Needlemana. Łączy

on makroskopowe prawo płynięcia oraz prawo wzrostu udziału objętościowego pustek, który jest parametrem mikrostruktury materiału. Udział objętościowy pustek definiowany jest jako stosunek bieżącej objętości mikropustek do objętości próbki, zgodnie ze wzorem (14).

Z założenia odkształcenia i naprężenia określone są na poziomie makroskopowym. Warunek plastyczności Gursona Tvergaarda Needlemana sprowadza się do postaci (15).

Bieżący udział objętościowy pustek w materiale opisywany jest wyrażeniem (17). Z tych zależności wynika, iż zastosowanie modelu materiałowego GTN wymaga znajomości parametrów charakteryzujących mikrostrukturę i cechy mechaniczne danego materiału. Są to przede wszystkim:

- porowatość,
- udział objętościowy wtrąceń i wydzielen,
- rzeczywista krzywa rozciągania,
- krytyczne odkształcenie plastyczne powodujące inicjację pustek,
- naprężenie krytyczne dla pęknięcia na granicy wydzielenie – osnowa.

4. Wnioski

Przytoczone modele nukleacji i wzrostu pustek pozwalają na wykonanie obliczeń na poziomie mikroskopowym. Ich zastosowanie w praktyce inżynierskiej jest więc trudne, a niekiedy wręcz niemożliwe. Model GTN może być użyty do analizy elementów w skali makro w celu modelowania pracy elementów konstrukcyjnych w stanach granicznych, przy uwzględnieniu rzeczywistej struktury materiału. W modelu wprowadzono pojęcie udziału objętościowego pustek, będącego skalarną miarą stopnia rozwoju mikrouszkodzeń.

Wszelkie dotychczasowe analizy prowadzone przy użyciu modelu GTN dotyczyły próbek laboratoryjnych i kontrolowanego stanu naprężenia. Brak w literaturze danych dotyczących praktycznego zastosowania hipotezy do obliczeń elementów konstrukcji rzeczywistych. Zdaniem autora niniejszej pracy, omawiany model może stać się elementem systemu bazującego na mechanice pęknięcia, służącego do obliczeń wytrzymałości elementów pracujących w stanach granicznych.

Referat współfinansowany przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, projekt pt. „Program Rozwojowy Potencjału Dydaktycznego Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach – kształcenie na miarę sukcesu” Program Operacyjny Kapitał Ludzki, umowa nr UDA – POKL.04.01.01 – 00 – 175/08-00.



environment
environment

ALEKSANDRA SAŁATA¹

LIDIA DĄBEK²

Kielce University of Technology
al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7
25-314 Kielce, Poland

¹ e-mail: salata@tlen.pl

² e-mail: ldabek@tu.kielce.pl

ELEMENTAL ANALYSIS OF SEDIMENTS FROM THE URBAN STORM WATER DRAINAGE DEPENDING ON GRANULOMETRIC FRACTIONS

Abstract

This is an investigation of the physical and chemical properties of sediments from the urban storm water drainage to determine the relationship between its quality and particle size. The catchment area of 85 ha is located in the center of the city with the main thoroughfares. The study included: granulometric analysis, content of mineral and organic substances, elemental composition and Scanning Electron Microscope (SEM) analysis. The results showed presence of eleven particular fractions, content of mineral substances on the level 80.46% and organic substances on the level 19.54%. Article presents also the results of studies of elemental composition and SEM analysis in the sediments depending on the fractions to confirm significant part of minerals.

Keywords: runoff sediments, sewers, granulometric analysis, Scanning Electron Microscope, elemental composition

1. Introduction

One of the most important elements for the proper functioning of the city is an efficient system of urban storm water, which is responsible for proper collection and treatment of rainwater also

called rainwater. Rainwater consist of water and sediments.

Figure 1 shows the location of catchment area selected for research. The catchment area of 85 ha is located in the center of the city with the main thoroughfares [1].

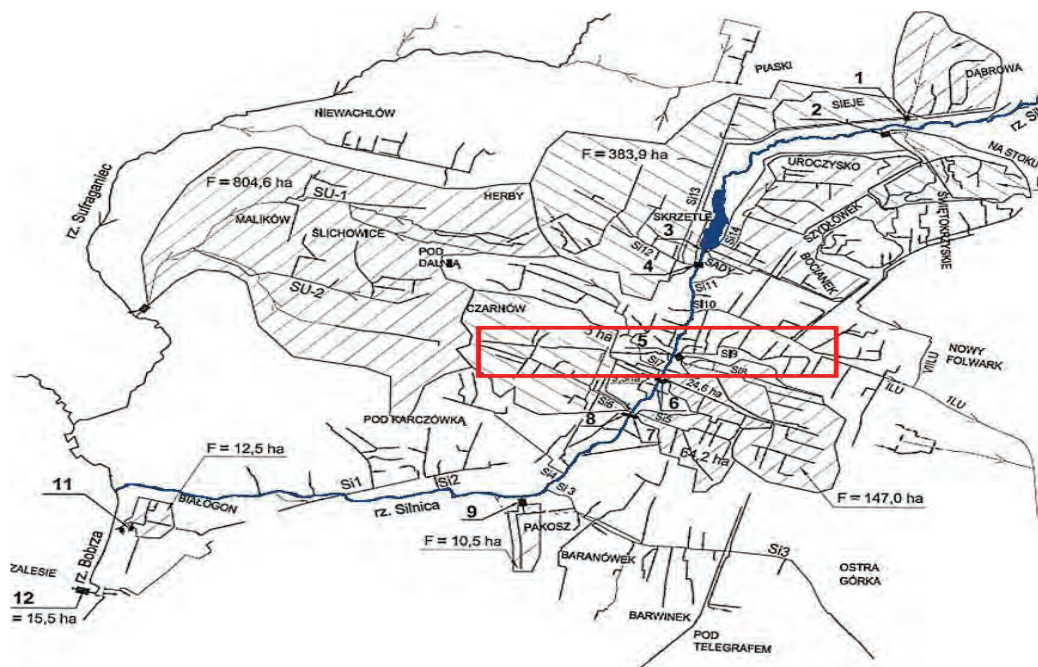


Fig. 1. Location of the catchment selected for research

2. Materials and methodology

The sediments was taken from the bottom of the settling chamber using special sampler. Settler is located in the underground part of the basin with the separator of oil products. Materials were taken from the entire cross-section of diameter 3 m settling chamber, so that in a way representative gave a deferred nature of the sediment. This means that the sediment samples of 1 kg from three different points of the bottom of the chamber and the results were averaged arithmetically [2].

a. Granulometric analysis.

Granulometric analysis of sediment was carried out using a combination of sieving and areometric analysis according to the methodology contained in publication of E. Myślińska [3]. Hydrometric analysis was performed using a set of Hydrometer Eijkelkamp.

b. Content of mineral and organic substances.

The content of mineral and organic substances determined by burning a weighed sludge previously dried to constant weight at 823 K. The residue after burning were weighed and identified as minerals, while the amount of organic matter determined by the difference of the masses and a predetermined amount of mineral substances.

c. Elemental composition.

Elemental analysis was made using X-ray microanalysis by EDAX GENESIS APEX 4.

d. Scanning Electron Microscope analysis.

SEM analysis was made using Microscope QUANTA FEG 250.

3. Results

In the first stage of the research carried out particular granulometric analysis to determine particles size distribution of sediments from urban storm water system.

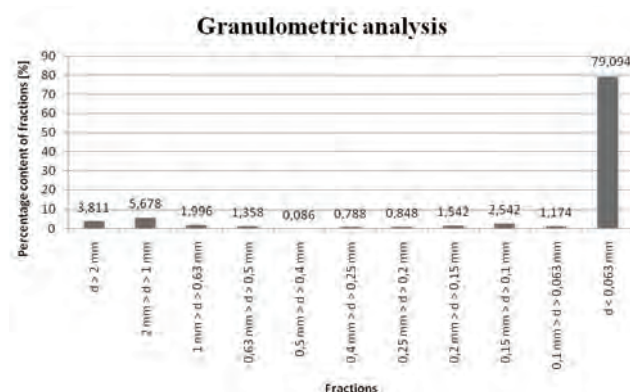


Fig. 2. Particular granulometric analysis of sediments

Figure 2 presented the results of the particular granulometric analysis and shows the advantage of the sieve fraction of dust grains with a diameter of less than 0.063 mm which represents 80% of the tested sediment. The fraction of particles with diameters greater than 2 mm fraction defined as gravel is less than 4% of the test sediment and largely consists of organic matter (leaves, insects). Fraction with a diameter of $2 \text{ mm} > d > 0.063 \text{ mm}$ is a sand fractions which contribution in the settlement was set at 17%. Sieve analysis was complemented by an analysis which identified hydrometric by the smallest fraction of the size distribution. Results of analysis showed no particles with a diameter of less than 0.002 mm, which indicates that the slightest fraction of the analyzed sediment must be considered in its entirety as dusty fraction.

Granulometric analysis was complemented by Scanning Electron Microscope observations with elemental microanalysis.

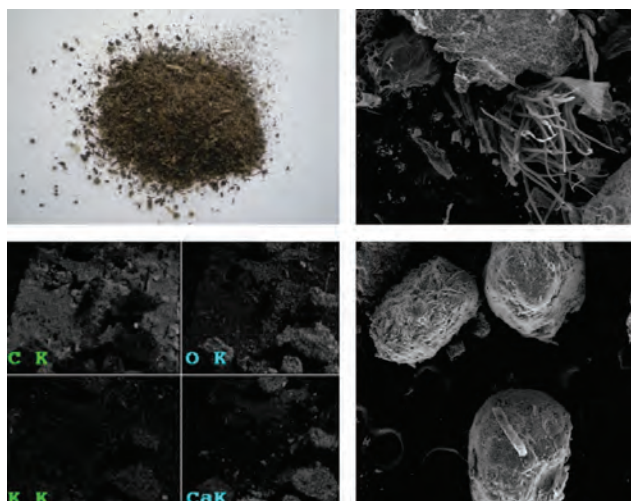


Fig. 3. Gravel fraction of sediment analyzed by SEM x 240 and elemental X-ray microanalysis

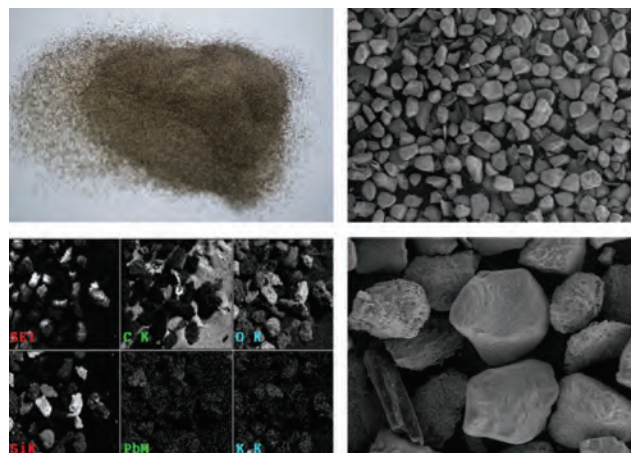


Fig. 4. Sand fraction of sediment analyzed by SEM x 240 and elemental X-ray microanalysis

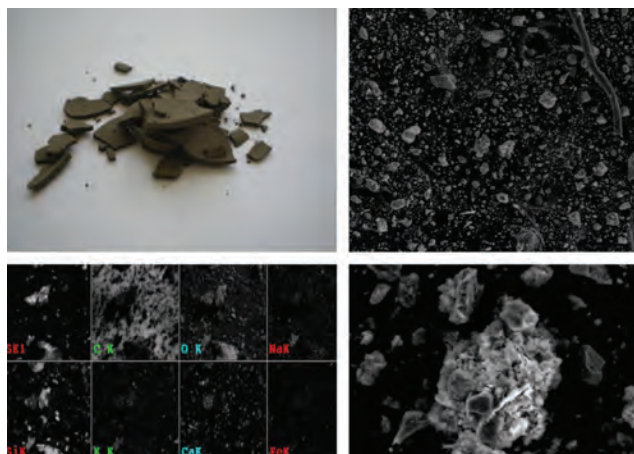


Fig. 5. Dust fraction of sediment analyzed by SEM x240/x2000 and elemental X-ray microanalysis

Figures 3-5 presents SEM observations with elemental analysis for three major fractions: gravel, sand and dust. Figure 3 shows a picture of the largest sediment particles. These data indicate a large proportion of organic matter. The research showed it to contain about 90% in this fraction. It consists mainly of organic residues. Elemental analysis shows the advantage of carbon. Figure 4 shows the results for sand fractions where the sand grains are quite visible and the elemental analysis points to

the silica contents. Figure 5 shows the results for the smallest fraction which consists primarily of mineral matter and dust.

4. Conclusions

Analyzed sediment came from urban storm water drainage. Granulometric analysis showed the presence of ten specific fractions, including the tree main: gravel, sand and dust. Research of mineral and organic sediment as a whole showed a relatively large proportion of mineral matter which is also confirmed by carrying out elemental analysis.

The research show the great diversity of the sediment and analyzed the correlation between grain size and content of mineral and organic substances. Prevalence of dust fraction is also connected with the nature of the catchment and its location.

References

- [1] *Operat wodno-prawny na odprowadzanie wód opadowych lub roztopowych po oczyszczalni zlokalizowanej przy ulicy Aleje IX Wieków Kielc na kolektorze Si 9.*
- [2] Wolska L.: *Wynik analizy a jakość informacji środowiskowej. Opracowanie monograficzne z uwzględnieniem prac własnych*, Zeszyty naukowe Politechniki Gdańskiej, Nr 608, Chemia LVII, Gdańsk 2008.
- [3] Myślińska E.: *Laboratoryjne badania gruntów*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1998.

Aleksandra Sałata
Lidia Dąbek

Analiza elementarna osadów pochodzących z miejskiej kanalizacji deszczowej w zależności od frakcji granulometrycznych

1. Wprowadzenie

Jednym z najważniejszych elementów właściwego funkcjonowania miasta jest sprawny system kanalizacji deszczowej, który odpowiedzialny jest za odbiór oraz oczyszczanie ścieków opadowych. Ścieki deszczowe składają się zarówno z wody opadowej jak i osadów deszczowych.

Rysunek 1 wskazuje na lokalizację zlewni wybranej do badań. Obszar zlewni o powierzchni 85 ha ulokowany jest w centrum miasta gdzie przebiegają główne traktory komunikacyjne [1].

2. Metodyka badawcza

Osady zostały pobrane z dolnej części komory osadniczej za pomocą specjalnego próbnika. Osadnik znajduje się w podziemnej części zlewni wraz z separatorem substancji oleistych. Materiał badawczy został pobrany z całego przekroju komory o średnicy 3 m tak, aby w sposób reprezentatywny pokazać różnorodność i charakter osadów deszczowych. Oznacza to, że próbki osadów o masie 1 kg wzięto z trzech różnych punktów na dnie komory a wyniki badań uśredniono arytmetycznie [2].

a. Analiza granulometryczna.

Analizę granulometryczną osadu wykonano metodą kombinacji analizy sitowej i areometrycznej wg metodyki zawartej w pracy E. Myślińskiej [3]. Analiza areometryczna została wykonana za pomocą zestawu do analizy areometrycznej firmy Eijkelkamp.

b. Zawartość substancji mineralnych i organicznych.

Zawartość substancji mineralnych i organicznych określono poprzez spalenie odważonej naważki osadu, wysuszonego uprzednio do stałej masy, w temperaturze 550°C. Pozostałość po spaleniu zważono i określono jako substancje mineralne, natomiast ilość substancji organicznych wyznaczono z różnicy mas naważki oraz określonej uprzednio ilości substancji mineralnych.

c. Analiza pierwiastkowa.

Analizę składu pierwiastkowego wykonano metodą mikroanalizy rentgenowskiej za pomocą urządzenia EDAX GENESIS APEX 4.

d. Analiza skaningowej mikroskopii elektronowej.

Analizę SEM wykonano przy użyciu mikroskopu QUANTA FEG 250.

3. Wyniki

W pierwszym etapie badań wykonano szczegółową analizę granulometryczną osadów deszczowych, aby określić uziarnienie w całym przekroju pobranych prób.

Przedstawione na rysunku 2 wyniki szczegółowej analizy sitowej wskazują na przewagę frakcji pyłowej o średnicy ziaren poniżej 0,063 mm, która stanowi aż 80% badanego osadu. Frakcja o średnicach ziarn powyżej 2 mm określona jako frakcja żwirowa stanowi niecałe 4% badanego osadu i w przeważającej części składa się ze szczątków organicznych (liście, owady). Frakcję o średnicy $2\text{ mm} > d > 0,063\text{ mm}$ stanowi frakcja piaszkowa, której udział w osadzie został określony na poziomie 17%. Uzupełnieniem analizy sitowej była analiza areometryczna według której określono roz-

kład granulometryczny najdrobniejszej frakcji. Wyniki analizy wykazały brak ziarn o średnicy poniżej 0,002 mm, co wskazuje, że najdrobniejszą frakcją analizowanego osadu należy zakwalifikować w całości jako frakcję pyłową.

Rysunki 3-5 przedstawiają obserwacje osadów za pomocą SEM z analizą elementarną dla trzech głównych frakcji: żwirowej, piaskowej i pyłowej. Rysunek 3 przedstawia obraz z największej frakcji cząstek osadu. Dane te wskazują na dużą część materii organicznej. Badania wykazały, że zawiera się ona na poziomie około 90% w tej frakcji i składa głównie z resztek organicznych. Analiza elementarna przedstawia przewagę zawartości węgla. Rysunek 4 pokazuje wyniki dla frakcji piaskowej, gdzie ziarna piasku są bardzo dobrze widoczne i analiza pierwiastkowa potwierdza zawartość krzemionki. Rysunek 5 przedstawia wyniki dla najmniejszej frakcji, która składa się głównie z substancji mineralnych i pyłu węglowego.

4. Wnioski

Analizowany osad pochodził z miejskiej zlewni wód opadowych. Analiza granulometryczna wykazała występowanie jedenastu szczegółowych frakcji włączając trzy główne: żwirową, piaskową oraz pyłową.

Badania zawartości substancji mineralnych i organicznych wykazały znaczną przewagę materii mineralnej, co również zostało potwierdzone za pomocą analizy pierwiastkowej.

Szereg przeprowadzonych analiz pokazuje ogromną różnorodność osadów deszczowych zarówno pod kątem właściwości fizycznych jak i chemicznych. Wykazano również korelację między wielkością uziarnienia a zawartością substancji mineralnych oraz organicznych. Przewaga frakcji pyłowej powiązana jest także z charakterem obsługiwanej zlewni a także z jej lokalizacją.

GRZEGORZ SPUREK

Kielce University of Technology
al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7
25-314 Kielce, Poland
e-mail: grzegorz_spurek@op.pl

WASTE MANAGEMENT PLANTS WITH PROCESS LINES FOR PRODUCTION OF SUBSTITUTE FUELS FOR CEMENT INDUSTRY AS A SOLUTION TO WASTE PROBLEM IN THE ŚWIĘTOKRZYSKIE REGION

Abstract

The short characteristic of municipal waste management system in the Świętokrzyskie voivodeship was conducted, basing on the data from the Central Statistic Office and local waste management plans. As a result of the analysis performed on the given data, the modernization and expansion of existing sorting installations were proposed, including the regional waste sorting plants with the alternative fuel production lines for the cement in-dustry in the Świętokrzyskie voivodeship.

This paper was presented at seminar for Ph.D. candidates at Kielce University of Technology.

Keywords: substitute fuels, waste treatment plants, Świętokrzyskie

1. Introduction

A lot of changes have been lately introduced into the national regulations governing the wide area of waste management. Updating and amendments were proposed for such important documents as waste disposal act of 27 April 2001 (Dz.U. No. 62, item 628) and act of 13 September 1996 on maintaining tidiness and order within boroughs (Dz.U.No. 132, item 622). The main objectives of the changes include:

- a) Sealing the waste disposal system;
- b) Collecting source-separated waste, including prohibited storage of selectively stored flammable waste (from 1 January 2010);
- c) Reducing the amount of municipal waste, including biodegradable waste deposited in landfills; introducing the ban on storing selectively collected biodegradable waste (from 1 January 2013);
- d) Increasing the number of modern recovery and recycling installations and those for municipal waste disposal, other than storage;
- e) Eliminating illegal dumps and reducing the pollution level of woods, recreation sites, etc.;
- f) Introducing proper monitoring systems for municipal waste disposal both for real property owners and entrepreneurs dealing with collection

and transport of municipal waste, including disciplinary procedures intended for making entrepreneurs meet their duty of submitting summary reports;

- g) Reducing the number of environmental hazards resulting from moving municipal waste from the collection sites to treatment sites, through the division of provinces into waste management regions responsible for all activities related to waste management.

Consecutive chapters of this paper present the role and significance of waste management plants (WMP) with process lines for substitute fuels production in the Świętokrzyskie region. The operation of WMP involves, among others, close cooperation with cement plants located in the region.

2. Characteristics of municipal waste management system condition in the territory of the Świętokrzyskie region (2005-2008)

The Świętokrzyskie region comprises 102 boroughs and 14 counties [1]. The provisions of the First Waste Management Plan divide the region into 4 waste management areas:

- a) Central area including counties: kielecki/urban and kielecki/rural,

- b) South-western area including counties: jędrzejowski, kazimierski, pińczowski, włoszczowski,
c) Northern area including counties: konecki, ostrowiecki, skarżyski, starachowicki,
d) South-eastern area including counties: buski, opatowski, sandomierski and staszowski [2].

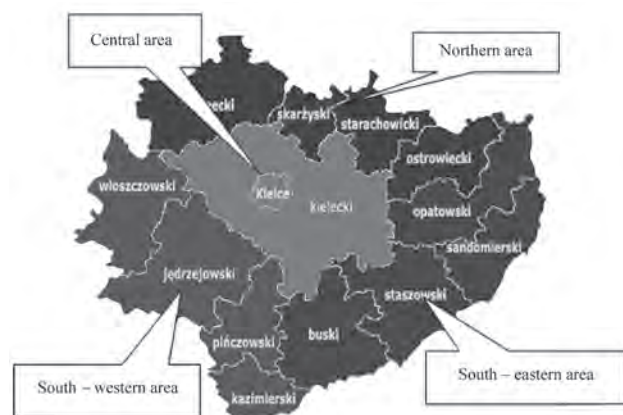


Fig.1. Świętokrzyskie Region as divided into waste management areas

Information provided by the Central Statistical office GUS confirms that in 2008, 196 thousand tonnes of waste (excluding selected waste) was collected and treated (mainly through storage at waste landfills), including: about 50.000 t of commercial, small business and office waste; 9.000 t of municipal service waste, and 138.000 t of household waste [3]. For comparison, in 2006 the amount of collected and mixed municipal waste was over 190.000 t. More than 83% of all Świętokrzyskie region residents were covered by the system of non-sorted municipal waste collection, which is more than 1 million of inhabitants. 38 boroughs in the province (2007) were engaged in selective waste collection, especially paper and cardboard packaging, metal, glass and plastics. Despite the present trend spread over Europe and some regions of Poland to limit biodegradable waste deposited in landfills, Świętokrzyskie province failed to develop a proper sorting system for the waste material including large-sized, building, electronic or hazardous waste. On 31/12/2008, the province had 18 open and monitored landfills with a total area of 55.8 ha, including 2 in urban and 16 in rural areas. Seven landfills have degassing installations. Tables 1, 2 and 3 present information on generation and composition of municipal waste coming from households and commercial facilities in the Świętokrzyskie province (data for 2005) [4].

Table 1. Municipal waste generated in urban and rural areas in 2005.

	Waste by type	Quantities [kg/M/year] 2005	
		Rural areas	Urban areas
1.	Municipal household waste	108	151
2.	Municipal commercial facilities waste	24	62
3.	Gardens and parks waste	3	12
4.	Open air markets waste	3	3
5.	Street and square litter and waste	2	7
6.	Large-sized waste	10	15
Total:		150	250

Table 2. Municipal household waste composition. Urban and rural areas of the Świętokrzyskie province in 2005.

	Waste fractions	Waste ratio [%]		Quantity [kg / M / year]	
		Rural areas	Urban areas	Rural areas	Urban areas
1.	Kitchen biodegradable waste	18	33	19.44	49.83
2.	Green waste	4	2	4.32	3.02
3.	Paper and cardboard, including packaging	12	20	12.96	30.2
4.	Multi-material waste, including packaging	2	3	2.16	4.53
5.	Plastics, including packaging	12	14	12.96	21.14
6.	Glass, including packaging	8	8	8.64	12.08
7.	Metal, including packaging	5	5	5.4	7.55
8.	Clothing, textiles	1	1	1.08	1.51
9.	Wood, including packaging	2	2	2.16	3.02
10.	Hazardous waste	1	1	1.08	1.51
11.	Mineral waste, including ashes	35	11	37.8	16.61
Total:		100%	100%	108	151

Table 3. Composition of municipal waste generated in commercial facilities (urban and rural) in the Świętokrzyskie province in 2005.

	Waste fractions	Waste ratio [%]		Quantity [kg / M /year]	
		Rural areas	Urban areas	Rural areas	Urban areas
1	Kitchen biodegradable waste	10	10	2.40	6.20
2	Green waste	2	2	0.48	1.24
3	Paper and cardboard, including packaging	27	27	6.48	16.74
4	Multi-material waste, including packaging	18	18	4.32	11.16
5	Plastics, including packaging	18	18	4.32	11.16
6	Glass, including packaging	10	10	2.40	6.20
7	Metal, including packaging	5	5	1.20	3.10
8	Clothing, textiles	3	3	0.72	1.86
9	Wood, including packaging	1	1	0.34	0.87
10	Hazardous waste	1	1	0.14	0.37
11	Mineral waste, including ashes	5	5	1.20	3.10
Total:		100%	100%	24.00	62.00

Table 4 presents data on mixed municipal waste collected in the Świętokrzyskie province by counties [5]. Data for 2006 and 2008.

From the analysis of Table 4 it is evident, that within two years between 2006 and 2008 the percentage of mixed waste collected in the Świętokrzyskie province and then deposited in landfills did not decrease. On the contrary, the amount of stored waste increased in kazimierski, konecki and kielecki counties. In terms of technological advancement this result may prove that the number of waste sorting plants, their efficiency and output are still insufficient. Taking this adverse trend into account, advantages of solutions proposed in the chapters that follow are all the more worth considering.

Table 4. Amount of municipal waste collected in the counties of the Świętokrzyskie province in 2006 and 2008.

Specification	Year	Municipal waste in tonnes collected within one year		Waste deposited in landfills in %
		Total	Including household waste	
Świętokrzyskie	2006	193 734.9	147 974.4	99.6
	2008	196 847.2	137 618.9	99.8
Counties:				
buski	2006	9 512.8	6 322.9	100.0
	2008	9 940.1	7 619.9	100.0
jędrzejowski	2006	10 301.8	9 498.5	100.0
	2008	8 219.0	7 283.1	100.0
kazimierski	2006	2 126.8	1 688.9	89.2
	2008	2 515.6	2 039.5	94.3
kielecki	2006	15 407.1	11 614.5	99.3
	2008	14 789.5	11 069.6	100.0
konecki	2006	9 422.4	6 706.6	99.0
	2008	9 521.5	6 256.5	100.0
opatowski	2006	5 241.4	3 764.3	99.7
	2008	4 600.2	3 660.2	99.4
ostrowiecki	2006	18 733.8	13 611.9	100.0
	2008	19 410.2	9 762.0	100.0
pińczowski	2006	4 570.3	3 634.1	100.0
	2008	3 885.5	2 559.1	100.0
sandomierski	2006	17 811.0	11 001.7	99.7
	2008	15 413.4	9 932.3	99.5
skarżyski	2006	11 781.3	10 157.4	99.8
	2008	9 715.1	7 281.3	99.9
starachowicki	2006	15 102.5	13 571.8	100.0
	2008	20 646.9	16 721.5	100.0
staszowski	2006	8 345.5	6 451.5	99.8
	2008	9 232.6	6 959.4	99.7
włoszczowski	2006	3 294.1	2 192.4	100.0
	2008	3 037.3	1 938.1	100.0
City with county rights:				
Kielce	2006	62 084.0	47 757.9	99.7
	2008	65 920.3	44 536.4	99.9

3. Substitute fuels from waste material for cement plants

A number of publications indicate that considerable part of municipal waste can be used as fuel [6], [7], [8]. Fuel, according to the encyclopedic definition, is a substance which releases heat when oxidized (burned). The energy produced this way can be used for industrial, transport, technological or everyday life purposes. Directive 2008/98/EC on waste sets forth clear boundaries between waste and byproducts – a significant distinction in terms of waste-derived fuel production, a trend now developing in Europe. Article 5.1 of the Directive provides that a substance or object, resulting from a production process, the primary aim of which is not the production of that item, may be regarded as not being waste referred to in point (1) of Article 3 but as being a by-product only if the following conditions are met:

- further use of the substance or object is certain;
- the substance or object can be used directly without any further processing other than normal industrial practice;
- the substance or object is produced as an integral part of a production process; and
- further use is lawful, i.e. the substance or object fulfils all relevant product, environmental and health protection requirements for the specific use and will not lead to overall adverse environmental or human health impacts.

Before the implementation of Directive 2008/98/EC provisions, due to lack of clear definitions of waste and by-product, many UE member states employed varied waste processing methods and gave new names to such products [9]. In Poland, for example, cement plants are recipients, as co-combusting plants in compliance with integrated permits issued by Heads of Provinces, of combustible substance called alternative fuel (code 19 12 10 – pursuant to the Regulation of Minister of Environment, dated 27 September 2001 on waste directory, Dz.U. 2001 No. 112, item 1206) Alternative fuels are generated in special recovery installations. Inputs can include municipal waste streams and residuals, and also packaging materials that cannot be recycled. According to waste categories inputs fall into 5 groups:

Group 1: wood, paper, cardboard and cardboard boxes,

Group 2: textiles and fibres,

Group 3: plastics and rubber,

Group 4: other materials (e.g. printing paints, spent solvents),

Group 5: fractions of high calorific value from collected non-hazardous mixed waste [10].

The cement industry has been successfully co-burning alternative fuels in cement kilns for many years now. Main characteristic features of alternative fuels, which make them suitable for burning in cement kilns include: physical condition, calorific value, elemental composition (mainly the content of Na, K, Cl and F), toxicity, amount and composition of ashes, moisture content, homogeneity, qualification for being processed and transported, particle size and density. According to data published by EURITS (the European Association of Waste Thermal Treatment for Specialized Waste), alternative fuels used as substitute fuels in cement plants should meet the following requirements [11]:

Table 5. EURITS criteria for co-incineration of waste in cement kilns

Parameter	Unit	Value
Calorific value	MJ/kg	15.00
Cl	%	0.50
S	%	0.40
Br	%	0.01
N	%	0.70
F	%	0.10
Be	Mg/kg	1.00
Hg	Mg/kg	2.00
As, Se (Te), Cd, Sb	Mg/kg	10.00
Mo	Mg/kg	20.00
V, Cr, Co, Cu, Pb, Mn, Sn	Mg/kg	200.00
Zn	Mg/kg	500.00
Ash content (excl. Ca, Al, Fe, Si)	%	5.00
PCB (sum acc. to DIN 51527)	Mg/kg	0.20

In the context of implementing the guidelines of another important EU document, Directive on waste storage (gradual reduction of biodegradable municipal wastes destined for landfills), it is worth emphasizing that nearly all energy-producing waste such as wood waste, textiles or paper non-recyclables can be incinerated in cement plants for energy recovery. It is, however, important to remember that chemical composition of alternative fuels, a variety of elements including organic content imposes certain requirements for their burning. During the process suitably high temperature has to be maintained for the determined time. For waste-derived fuels with up to 1% of halogenated organic substances, expressed as chlorine, the temperature cannot be lower than 850°C, and it has to be raised to 1100°C for waste-derived

fuels with a content of more than 1% of halogenated organic substances, expressed as chlorine. The restrictions refer both to incineration facilities, i.e. installations dedicated to waste incineration, and to co-incineration installations, such as cement kilns.

4. Waste utilization plants with process lines for generating waste-derived fuels for the cement industry in the świętokrzyskie province

120 plants for waste recovery and disposal operate in the province (acc. to Annex 1 to “Waste Management Plan for the Świętokrzyskie Province for the years 2007-2011”). These are waste landfills (18), medical waste incinerators (5), waste sorting plants (8), end-of-life vehicle dismantling facilities (13) and co-incineration facilities (9). Table 6 presents detailed data, including locations, exclusively related to co-incinerating installations in the process of cement clinker production.

Table 6. Co-incineration in clinker burning process in the Świętokrzyskie province

	Address	
1.	Lafarge Cement S.A. ul. Warszawska 110, 28-366 Małogoszcz	Waste co-incineration plant – clinker burning
2.	Dyckerhoff Sp. z o.o. Cementownia Nowiny/Nowiny Cement Plant 26-052 Sitkówka Nowiny	Waste co-incineration plant – clinker burning
3.	Grupa Ożarów S.A. Karsy 77 27-530 Ożarów	Waste co-incineration plant – clinker burning

Pursuant to the permission granted by heads of provinces, each of the three plants mentioned above use substitute fuel based on combustible waste fractions such as tires, plastics and foils, cardboard, textiles and clothes. Lafarge Group cement plant of Małogoszcz uses specific names for each type of used fuel, e.g. PASr (solid milled alternative fuels), PASi (solid alternative fuels contacted with impregnated substrate) [12]. At present in the Świętokrzyskie province, two major companies produce waste-derived fuels, including fuels for cement kilns – Mo-Bruk S.A. (Karsy 78, 25-530 Ożarów) and WTÓRPOL (25-110 Skarżysko-Kamienna). Those two suppliers can meet only part of the demand for alternative fuel. The local cement industry has to transport waste-derived fuels from other domestic sources or import them from abroad (mainly from Germany). Generally, one of the major problems

cement plants (inc. those in the Świętokrzyskie province) face is ensuring proper quality and continuity of supply of waste-derived fuels. Received substitute fuels are frequently non-homogenous, with a high metal material content, low calorific value (below EURITS recommendations), and high moisture content (more than 20%). Lack of unified waste-derived fuels standards in Poland affects operation of cement plants. The most frequent problems include clogged up installations due to improperly separated waste, metal fractions in waste-derived fuel streams, exceeded levels of heavy metals detected in fuel samples, etc. The safety of cement plant operatives exposed to harmful agents contained in the substitute fuels is another problem resulting from lack of full control over the delivered combustible waste. These are biological agents (incl. medical waste) or chemical substances (hazardous waste materials which are not regulatory listed for disposal in cement kilns), the generators of which often try to get rid of them outside the law.

Solutions to those problems should be provided by the expansion of existing sorting lines and construction of modern waste recovery and disposal plants (WMP). Therefore, the objectives to adopt include reducing the quantity of all wastes subject to deposition in landfills, increasing the percentage of recycled materials, composting and producing waste derived fuels for cement plants. Figure 2 presents the WMPs role and significance in waste management strategies in the counties of the Świętokrzyskie province [13].

A drum screen and manual sorting chamber are main facilities typical of Polish WMPs. Few sorting plants in Poland are adjusted for composting of biodegradable waste fractions, processing of building waste, active landfill reclamation or producing fuels of certain properties for the cement industry. The WMP in Hajnówka is an excellent example of Polish installation, where preparation of waste for further processing is done in a full-scale way at different levels of technology, making it possible to separate the mixed waste fraction. The installation is made up from a mobile drum screen, single-shaft shredder, magnetic and non-magnetic metals separators, air separator, units for bulky waste transport (belt conveyors) [14]. One of the key factors ensuring correct operation of WMP is the selection (depending on the stream volume at the inlet) of proper number of sorting devices and their arrangement in the technological line, including a thorough analysis of the input material aimed at obtaining fractions of the highest purity grade. The

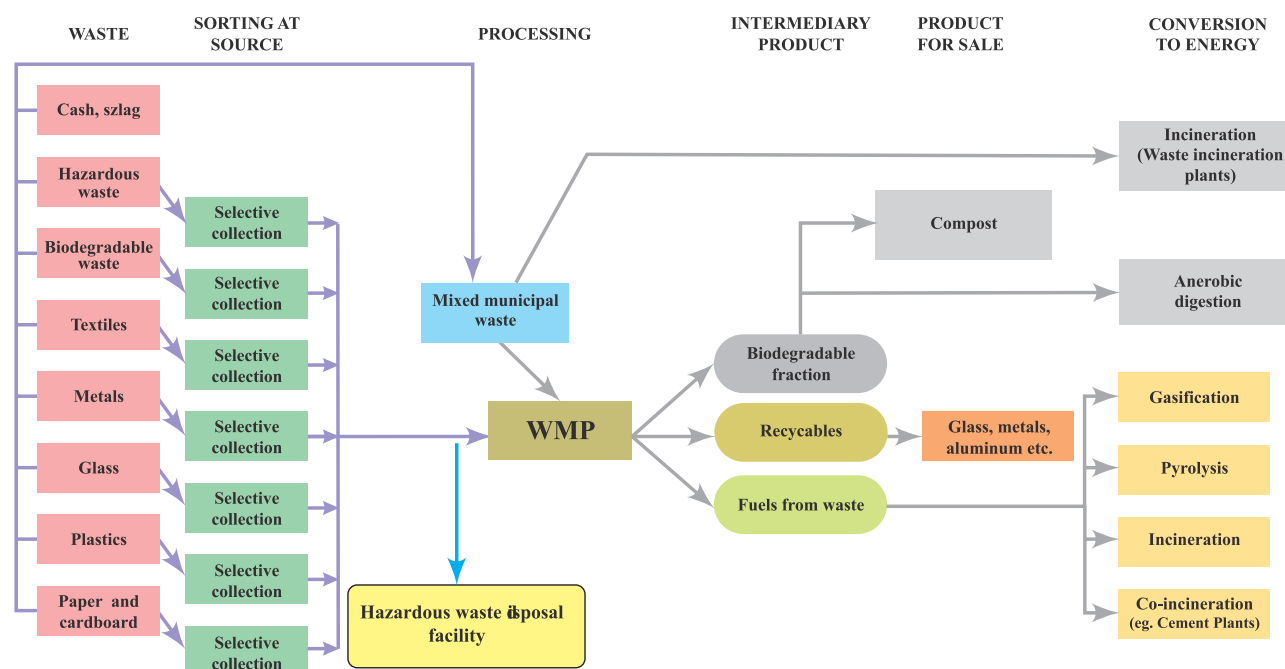


Fig. 2. Proposed waste management flowchart in the counties of the Świętokrzyskie province

analysis of data presented in chapter 2 and related to the quantity and morphological composition of municipal mixed waste collected from households and commercial facilities in the Świętokrzyskie province, one can notice that high calorific fraction of waste including paper and cardboard packaging, plastics, textiles, and wood waste is irretrievably wasted due to its deposition in landfills. Figure presents details of the solution to waste-derived fuel production problem, based on fraction separation technology proposed by the Department of Waste Disposal Technologies and Equipment at Politechnika Śląska/Silesian Technical University. Their solution can be used in the Świętokrzyskie province for the production of substitute fuels intended for local cement plants.

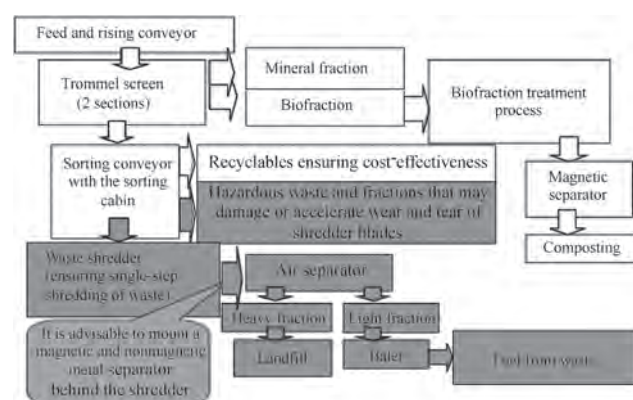


Fig. 3. Proposed extension (grey color) of local sorting lines and WMPs for the production of waste-derived fuels [15]

Generating fuels from mixed municipal waste requires (as shown in the chart above) placing a sieve in the technological line to enable separation of the so called thick fraction (min. 80 or 100 mm) composed of light and combustible materials, mainly paper and cardboard, plastics and wood. Further mechanical processing of that fraction (which amounts to ca. 30-40% total municipal waste mass in the province) enables obtaining fuel of calorific value of ca. 16-18 MJ/kg and moisture content of ca. 20% [16]. In order to ensure high quality of waste-derived fuel (confirmed with a certificate of quality delivered to cement plants with each waste sample), and to maintain continuous supervision over the chemical composition of the combustible mixture (safety measures), WMP should run their own laboratories.

5. Summary

The GUS data show that the Świętokrzyskie province is one of the most neglected regions in Poland in terms of municipal waste management. Over 90% of all waste collected in the province is deposited in landfills. Despite recent positive trends relating to raw material recycling, mainly packaging waste, energy recovery from municipal waste from households and commercial facilities is still a marginal matter, which is difficult to accept considering the fact that the Świętokrzyskie province is home to three modern co-incineration installations with cement kilns (Lafarge – Małgoszcz, Dyckerhoff – Nowiny, Grupa CRH

– Ożarów), where selected and pretreated municipal waste fractions can easily be utilized through thermal disposal. The very process of pretreatment of waste for co-combustion in a cement kiln requires expansion of existing regional incineration and waste disposal plants (WMPs). The system presented in this paper, relating to waste acquisition and processing leading to generation of high calorific fuel for cement plants, has already been implemented in waste management strategies of the lubelskie province and podlaskie province. Finally, the following measures have to be undertaken by administrative bodies to facilitate conversion of the so called waste thick fraction (paper, cardboard, wood and plastics) to substitute fuels for the use in cement plants:

Provinces:

- Systematic (annual) raise of waste collection fee paid to marshal offices,
- Further development of selective collection of combustible waste fraction, including paper and card packaging, plastics and textiles,
- Introduction of financial incentives for cement plants located in particular areas of waste management.

General – Poland:

- Cancelling the unfavorable for cement plants provisions included in the Regulation of the Minister of Environment of 17 September 2009 on detailed technical conditions of qualifying parts of energy recovered for thermal conversion of municipal waste,
- Raising community awareness in relation to thermal disposal of selected waste in cement plants,
- Undertaking all possible measures to acknowledge some of combustible waste (i.e. paper, cardboard, packaging, wood, rubber, textiles) as products - fuels (in accordance with EU Directive 2008/98).

References

- [1] Central Statistical Office
- [2] Waste Management Plan for the świętokrzyskie province for the years 2007-2011.
- [3] Environment Protection 2009, Central Statistical Office, Department for Regional Studies and Environment, Warszawa 2009.
- [4] Waste Management Plan for the świętokrzyskie province for the years 2007-2011
- [5] Central Statistical Office
- [6] Duda J., *Systems and technologies of thermal waste disposal*, p. 165, in: Waste-derived fuels 2009, Department of Technologies and Installations for Waste Management Silesian University of Technology, Gliwice 2009, p. 201 [in Polish].
- [7] Kowalski Z., Banach M., Czarnecka W., *Thermal use of waste combustible substances*, p. 61, in: Waste-derived fuels 2009, Department of Technologies and Installations for Waste Management Silesian University of Technology, Gliwice 2009, p. 95 [in Polish].
- [8] Lepucki M., Duda J., *Systems and technologies of thermal waste disposal*, p. 165, in: Waste-derived fuels 2009, Department of Technologies and Installations for Waste Management Silesian University of Technology, Gliwice 2009, p. 191 [in Polish].
- [9] Wandrasz J. W. *Fuel from waste and its place in thermal processes*, str.5, w: Waste to Energy and Environment, Department of Technologies and Installations for Waste Management Silesian University of Technology, Gliwice, 2010, p. 5
- [10] Kruczek H., *Standarization of alternative waste for combustion and co-combustion in boilers*, Dolnośląskie Centre of Advanced Technologies, Wrocław, 2007, p. 4 [in Polish].
- [11] <http://www.incineration.info/publications>
- [12] Sarna M., Mokrzycki E., Uliasz-Bocheńczyk A., *Waste-derived alternative fuels for cement plants – based on experience of Lafarge Cement Poland S.A.*, pp. 309-316, Journals of Scientific Papers of the Civil and Environmental Faculty at Koszalin Technical University, Koszalin 2003, pp. 309-316 [in Polish].
- [13] Municipal Solid Waste and its role in Sustainability, IEA Bioenergy, 2003.
- [14] <http://archiwum.komunalny.home.pl/archiwum/index.php?mod=tekst&id=10955>
- [15] Hryb W., Wandrasz J.W., *Directions of development of modern installations in Waste Management Plants*, pp. 73-82, in: Waste Management and Environmental Protection Archive, vol. 11, 2009, pp. 73-82 [in Polish].
- [16] „Waste-derived fuel”- opinion of Polish Chamber of Waste Management for Cement Producers Association concerning „Municipal waste-derived alternative fuels for the cement industry” p. 55, in: Waste and Environment No. 1 (55)/09, Maxpress [in Polish].

Grzegorz Spurek

Zakłady zagospodarowania odpadów z liniami technologicznymi do produkcji paliw zastępczych dla przemysłu cementowego sposobem na rozwiązanie problemu odpadowego w województwie świętokrzyskim

1. Wprowadzenie

W ostatnim czasie jesteśmy świadkami wprowadzania wielu zmian w krajowych przepisach prawnych dotyczących kwestii szeroko rozumianej gospodarki odpadami. Mowa tu m.in. o aktualizacjach i projektach nowelizacji takich ważnych aktów prawnych, jak: Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. o odpadach (Dz.U. Nr 62, poz. 628), Ustawa z dnia 13 września 1996 r. o utrzymaniu czystości i porządku w gminach (Dz.U. Nr 132, poz. 622), Głównym celem wprowadzenia zmian w obowiązujących przepisach jest:

- a) uszczelnienie systemu gospodarowania odpadami komunalnymi,
- b) prowadzenie selektywnego zbierania odpadów komunalnych „u źródła”, w tym zakazu składowania odpadów palnych selektywnie składowanych (od dnia 1 stycznia 2010 r.),
- c) zmniejszenie ilości odpadów komunalnych, w tym odpadów ulegających biodegradacji kierowanych na składowiska, w tym m.in. wprowadzenie zakazu składowania odpadów ulegających biodegradacji selektywnie zbieranych (od dnia 1 stycznia 2013 r.),
- d) zwiększenie liczby nowoczesnych instalacji do odzysku, w tym recyklingu, oraz unieszkodliwiania odpadów komunalnych w sposób inny niż składowanie,
- e) całkowite wyeliminowanie nielegalnych składowisk, a tym samym zmniejszenie zaśmiecenia lasów, terenów rekreacyjnych itp.,
- f) prowadzenie właściwego sposobu monitorowania postępowania z odpadami komunalnymi zarówno przez właścicieli nieruchomości, jak i przedsiębiorców odbierających i transportujących odpady komunalne, w tym wprowadzania środków dyscyplinujących przedsiębiorców, w celu wywiązywania się z obowiązku składania zbiorczych zestawień danych,

g) zmniejszenie dodatkowych zagrożeń dla środowiska wynikających z transportu odpadów komunalnych z miejsc ich powstania do miejsc odzysku lub unieszkodliwiania, poprzez podział województwa na regiony gospodarki odpadami, w ramach których prowadzone będą wszelkie czynności związane z gospodarką odpadami.

Poniżej w kolejnych rozdziałach pracy, opierając się na ww. założeniach przedstawiono rolę i znaczenie zakładów zagospodarowania odpadów (ZZO) z liniami technologicznymi do produkcji paliw zastępczych w województwie świętokrzyskim. Funkcjonowanie ZZO oparto m.in. na ścisłej współpracy z zakładami cementowymi w regionie.

2. Charakterystyka stanu systemu gospodarki odpadami komunalnymi na terenie województwa świętokrzyskiego (lata 2005 – 2008)

W skład województwa świętokrzyskiego wchodzi: 102 gminy i 14 powiatów [1]. Według zapisów pierwszego Wojewódzkiego Planu Gospodarki Odpadami województwo zostało podzielone na 4 rejony gospodarki odpadami:

- a) rejon centralny, w skład którego wchodzi powiaty: kielecki/grodzki, kielecki ziemski,
- b) rejon południowo-zachodni: powiat jędrzejowski, powiat kazimierski, powiat pińczowski, powiat włoszczowski,
- c) rejon północny: powiat konecki, powiat ostrowiecki, powiat skarżyski, powiat starachowicki,
- d) rejon południowo-wschodni, do którego zaliczono następujące powiaty: buski, opatowski, sandomierski i staszowski [2].

Z informacji uzyskanych z GUS wynika, że w 2008 r. w województwie świętokrzyskim zebrano i unieszkodliwiono (głównie przez składowanie na składowisku odpadów) ponad 196 tys. ton odpadów komunalnych (bez wyselekcjonowanych), w tym: ok. 50 tys. ton po-

chodzących z handlu, małego biznesu i biur; 9 tys. ton z usług komunalnych i 138 tys. ton z gospodarstw domowych [3]. Dla porównania, w roku 2006 liczba zebranych zmieszanych odpadów komunalnych wynosiła ponad 190 tys. ton. Zorganizowanym systemem zbierania i odbioru niesegregowanych odpadów komunalnych objętych zostało ponad 83% wszystkich mieszkańców województwa świętokrzyskiego, co łącznie przewyższa liczbę 1 mln mieszkańców. W selektywne zbieranie odpadów zaangażowano ponad 38 gmin województwa (stan na 2007 r.), w których głównie nacisk położono na zbieranie odpadów: opakowaniowych z papieru i tektury, metali, szkła i tworzyw sztucznych. Pomimo utrzymującego się w Europie i w wybranych rejonach Polski trendu i dążenia do ograniczania ilości odpadów ulegających biodegradacji kierowanych na składowiska odpadów, w województwie świętokrzyskie system segregacji ww. odpadów należy do słabo rozwiniętych, podobnie jak odpadów wielkogabarytowych, budowlanych, elektronicznych oraz niebezpiecznych. Na dzień 31.12.2008 r. na terenie województwa istniało 18 czynnych i kontrolowanych składowisk odpadów, o łącznej powierzchni 55,8 ha, w tym 2 znajdujące się na terenach miejskich i 16 na terenach wiejskich. Na 7 składowiskach występuje instalacja do odgazowania. W tabelach 1, 2 i 3 zawarto informację nt. wskaźników wytwarzania i składu morfologicznego odpadów komunalnych pochodzących z gospodarstw domowych oraz obiektów usługowych w województwie świętokrzyskim (dane za 2005 r.) [4].

W tabeli 4 zawarto informację dotyczącą ilości zebranych zmieszanych odpadów komunalnych z województwa świętokrzyskiego, w podziale na poszczególne powiaty [5]. Dane zawarte w tabeli dotyczą lat 2006 i 2008.

Analizując dane z tabeli 4, można dostrzec, że na przestrzeni dwóch lat pomiędzy 2006-2008 procent odpadów zmieszanych, zebranych w województwie świętokrzyskim i następnie deponowanych na składowiskach nie uległ obniżeniu, wręcz przeciwnie w powiatach takich jak: kazimierski, konecki i kielecki ilość składowanych odpadów wzrosła. Pod względem przygotowania technologicznego wynik ten może zatem dowodzić, że ilość sortowni w omawianym województwie, ich efektywność i przepustowość jest wciąż dalece niewystarczająca. Biorąc pod uwagę ten niekorzystny i wciąż utrzymujący się w omawianym regionie trend, należy z większą uwagą dostrzec zalety rozwiązania, które zostało zaproponowane w kolejnych rozdziałach niniejszej pracy.

3. Paliwa zastępcze z odpadów dla zakładów cementowych

W szeregu publikacji wykazano bezspornie, że znaczna część odpadów komunalnych, może zostać wykorzystana jako paliwo [6, 7, 8]. Paliwo, to zgodnie z encyklopedyczną definicją, substancja wydzielająca przy intensywnym utlenianiu (spalaniu) duże ilości ciepła. Energia uzyskana ze spalania paliwa może zostać wykorzystana do celów przemysłowych, transportowych, technologicznych, czy codziennych potrzeb życiowych. Obecnie w Unii Europejskiej za sprawą wprowadzenia Dyrektywy 2008/98/WE w sprawie odpadów jasno wskazano granice pomiędzy odpadem, a produktem ubocznym – podział ważny ze względu na rozwijający się w Europie trend tworzenia paliw z odpadów. Zgodnie z zapisem art. 5 ust. 1 Dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady substancja lub przedmiot, powstające w wyniku procesu produkcyjnego, którego podstawowym celem nie jest ich produkowanie, mogą być uznane za produkt uboczny, a nie za odpady, o których mowa w art. 3 pkt 1 niniejszej dyrektywy, wyłącznie jeżeli spełnione są następujące warunki:

- a) dalsze wykorzystywanie danej substancji lub tego przedmiotu jest pewne,
- b) dana substancja lub przedmiot mogą być wykorzystywane bezpośrednio bez jakiegokolwiek dalszego przetwarzania innego niż normalna praktyka przemysłowa,
- c) dana substancja lub przedmiot są produkowane jako integralna część procesu produkcyjnego, oraz
- d) dalsze wykorzystywanie jest zgodne z prawem, tzn. dana substancja lub przedmiot spełniają wszelkie istotne wymagania dla określonego zastosowania w zakresie produktu, ochrony środowiska i zdrowia ludzkiego, i nie doprowadzi do ogólnych niekorzystnych oddziaływań na środowisko lub zdrowie ludzkie.

Przed wprowadzeniem Dyrektywy 2008/98/WE ze względu na brak powyższego zapisu i rozróżnienia pomiędzy definicją odpadu i produktu ubocznego, w wielu krajach członkowskich UE dochodziło do zróżnicowanych metod przetwarzania odpadów, nadawania nazw powstałym w ten sposób produktom [9]. Przykładem takiego kraju może być Polska. Do zakładów cementowych, jako do instalacji współspalających odpady za zgodą wojewodów zawartej w wydanych pozwoleniach zintegrowanych przywożona jest substancja palna o nazwie paliwo alternatywne (kod 19 12 10 – zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 27 września 2001 r. w sprawie katalogu odpadów, Dz.U. 2001 nr 112 poz. 1206). Paliwa alterna-

tywne są wytwarzane w specjalnych instalacjach do przetwarzania odpadów. Materiałami wsadowymi mogą być strumienie odpadów komunalnych i pozostałości poprodukcyjne, ale także nienadające się do recyklingu odpady opakowaniowe. Zgodnie z kategoriami odpadów materiały wsadowe ogólnie można podzielić na 5 grup:

Grupa 1: drewno, papier, tektura i tekturowe pudełka,

Grupa 2: tkaniny i włókna,

Grupa 3: tworzywa sztuczne i guma,

Grupa 4: inne materiały (np. farby drukarskie, zużyte sorbenty),

Grupa 5: frakcje o wysokiej wartości opałowej z zebranych niebezpiecznych odpadów mieszanym [10].

Przemysł cementowy z powodzeniem od wielu lat stosuje proces współspalania paliw alternatywnych w procesie wypału klinkieru. Głównymi cechami paliw alternatywnych warunkującymi ich stosowanie w piecach do wypału klinkieru są: stan fizyczny, wartość opałowa, skład chemiczny (głównie zawartość Na, K, Cl i F), toksyczność, ilość i skład chemiczny popiołów, wilgotność, jednorodność, zdolność do obróbki i transportu oraz uziarnienie i gęstość. Według danych opublikowanych przez EURITS (Europejskie Stowarzyszenie Zakładów Termicznego Przekształcania Odpadów) paliwa alternatywne stosowane, jako paliwa zastępcze w cementowniach powinny spełniać następujące wymagania [11] (tab. 5).

W kontekście wprowadzania w życie wytycznych zawartych w kolejnym ważnym dokumencie Unii Europejskiej poruszającym sferę gospodarowania odpadami, a mianowicie dyrektywie dotyczącej składowania odpadów (dążenie do etapowego ograniczania masy odpadów komunalnych ulegających biodegradacji kierowanych do składowania) wartym podkreślenia wydaje się fakt, że w zasadzie wszystkie odpady zawierające w sobie energię takie, jak m.in. odpady drzewne z gospodarki leśnej, tekstylia, papier nienadający się do recyklingu mogą być z powodzeniem spalane z w cementowniach z odzyskiem energii. Należy przy tym pamiętać, że skład chemiczny paliw alternatywnych, który jak pokazują doświadczenia może obejmować jednak wiele różnych składników, w tym również organicznych, narzuca określone wymagania co do warunków ich spalania. Konieczne jest zapewnienie odpowiednio wysokiej temperatury spalania i czasu utrzymywania tej temperatury w komorze spalania. Temperatura ta nie może być niższa od 850°C dla paliw odpadowych zawierających do 1% związków chlorowcoorga-

nicznych przeliczonych na chlor oraz nie niższa niż 1100°C dla paliw odpadowych zawierających powyżej 1% związków chlorowcoorganicznych przeliczonych na chlor. Ograniczenia te dotyczą zarówno spalarni odpadów, tj. instalacji zbudowanych specjalnie w celu spalania odpadów, jak też instalacji współspalania, takich jak m.in. piece do wypału klinkieru.

4. Zakłady zagospodarowania odpadów z liniami technologicznymi do produkcji paliw z odpadów dla przemysłu cementowego w województwie świętokrzyskim

Na terenie województwa świętokrzyskiego (wg danych zawartych w zał. Nr 1 do „Planu Gospodarki Odpadami dla Województwa Świętokrzyskiego na lata 2007-2011”) istnieje 120 instalacji służących do odzysku i unieszkodliwiania odpadów. W skład powyższych instalacji wchodzi m.in. składowiska odpadów (18), spalarnie odpadów medycznych (5), sortownie odpadów (8), stacje demontażu pojazdów wycofanych z eksploatacji (13) oraz współspalarnie odpadów (9). Szczegółowe dane, w tym lokalizacyjne dotyczące wyłącznie instalacji do współspalania odpadów w procesie wypału klinkieru przedstawiono w tabeli 6.

W każdym z powyższych zakładów cementowych, jako paliwo zastępcze w procesie wypału klinkieru, za zgodą wojewodów stosowane jest obecnie paliwo na bazie frakcji palnych odpadów m.in. opony, pocięte plastiki i folie, kartony, tekstylia i odzież. W cementowni z Grupy Lafarge, zlokalizowanej w Małogoszczu ww. paliwom wg własnych potrzeb nadano nawet specyficzne nazwy m.in. PASr (paliwa alternatywne stałe rozdrobnione), PASi (paliwa alternatywne stałe impregnowane) [12]. Obecnie na terenie woj. świętokrzyskiego istnieją dwie liczące się firmy posiadające stosowne decyzje środowiskowe i produkujące paliwa z odpadów, w tym m.in. dla przemysłu cementowego, są to: Mo-Bruk S.A. (Karsy 78, 25-530 Ożarów) oraz WTÓRPOL (25-110 Skarżysko-Kamienna). Dostawy z ww. zakładów zaspakajają wyłącznie część zapotrzebowania na paliwa alternatywne w cementowniach z regionu świętokrzyskiego, pozostałe ilości paliw z odpadów są sprowadzane z innych lokalizacji w Polsce, w tym importowane z zagranicy (głównie z Niemiec). Ogólnie można śmiało stwierdzić, iż jednym z większych problemów, z którym obecnie borykają się cementownie (w tym również te zlokalizowane w woj. świętokrzyskim), jest problem zapewnienia odpowiedniej jakości i ciągłości dostaw paliw z odpadów. Przywożone do ce-

mentowni paliwa zastępcze charakteryzują się często niejednorodnym składem, w tym znaczną zawartością części metalowych, niską wartością opałową (poniżej wartości zalecanych przez EURITS) oraz znaczną wilgotnością (często powyżej 20%). Brak jednolitego systemu standaryzacji paliw z odpadów w Polsce przyczynia się do wielu problemów technicznych, jak i tych natury jakościowej, z którymi codziennie muszą się wznagać służby utrzymania ruchu i produkcji w zakładach cementowych. Mowa tu m.in. o częstym zatykaniu instalacji przez nieodseparowane prawidłowo przez elektromagnesy, czy kraty części metalowe zawarte w strumieniu paliw z odpadów, w tym przypadki wykrytych przekroczeń metali ciężkich występujące w próbkach paliw. Osobnym zagadnieniem, wynikającym z braku „pełnej” kontroli nad przywożonym do cementowni odpadem palnym pozostają również sprawy bezpieczeństwa związanego narażeniem pracowników zakładu na czynniki szkodliwe, które mogą być zawarte w strumieniu przywożonych paliw zastępczych, mowa tu m.in. o czynnikach biologicznych (np. odpady medyczne), substancjach chemicznych (odpady niebezpieczne nie objęte zgodą wojewody na ich termiczne unieszkodliwienie w piecu do wypały klinkieru), których posiadacz odpadu często zamierza się pozbyć w sposób niezgodny z prawem.

Rozwiązaniem powyższych problemów występujących w cementowniach, w tym aktualnie istniejącego problemu „odpadowego” województwa świętokrzyskiego należy upatrywać w rozbudowie istniejących linii sortowniczych i budowie nowoczesnych zakładów zagospodarowania odpadów (ZZO). Celem podjęcia ww. działań jest ograniczenie do minimum ilości odpadów deponowanych na składowiskach poprzez zwiększenie odzysku surowców wtórnych, produkcję kompostu, w tym głównie rozpoczęcie produkcji paliwa z odpadów dla cementowni. Na rysunku 2, przedstawiono rolę i znaczenie, jaką powinny odgrywać ZZO w systemie gospodarki odpadami poszczególnych powiatów województwa świętokrzyskiego [13].

Głównymi urządzeniami wchodzącymi w skład typowego dla polskich warunków ZZO jest przesiewacz bębnowy oraz kabina sortowania ręcznego. Tylko niektóre sortownie lub ZZO istniejące w Polsce, poza prowadzeniem procesów odzysku surowców wtórnych są przystosowane do prowadzenia procesów, m.in. kompostowania frakcji odpadów ulegających biodegradacji, przerobu odpadów budowlanych, rekultywacji czynnej składowisk, w tym produkcji paliw o określonych właściwościach dla cementowni.

Godnym powielenia przykładem polskiej instalacji, w której przygotowanie odpadów do dalszego wykorzystania realizowane jest w sposób kompleksowy na różnych stopniach technologicznych, umożliwiających rozdział zmieszanej frakcji odpadów jest ZZO w miejscowości Hajnówka. Głównymi urządzeniami wchodzącymi w skład omawianej instalacji są: mobilny przesiewacz bębnowy, jednowałowe urządzenie rozdrabniające, separatory metali magnetycznych i niemagnetycznych, separator powietrzny, zespoły do transportu materiału odpadowego luzem, w postaci przenośników taśmowych [14]. Jednym z kluczowych elementów gwarantującym prawidłowe funkcjonowanie ZZO jest dobór (w zależności od wielkości strumienia na wejściu) odpowiedniej ilości urządzeń sortujących, ułożenie tychże urządzeń w odpowiedniej kolejności w ciągu technologicznym, w tym dogłębna analiza wsadu w celu uzyskania (na końcu procesu przetwarzania) frakcji o najwyższym stopniu czystości. Analizując dane wymienione w rozdziale 2, dotyczącym ilości i składu morfologicznego zmieszanych odpadów komunalnych zebranych z gospodarstw domowych i obiektów usługowych w województwie świętokrzyskim, można zauważyć, że wysokokaloryczna frakcja odpadów, w skład której wchodzi m.in. papier i tektura, w tym opakowania, tworzywa sztuczne, tekstylia, drewno jest obecnie głównie bezpowrotnie „marnowana”, na skutek jej deponowania na składowisku odpadów. Na rysunku 3, opierając się o sprawdzoną technologię rozdziału frakcji odpadów zaproponowaną przez Katedrę Technologii i Urządzeń Zagospodarowania Odpadów Politechniki Śląskiej, przedstawiono szczególnie rozwiązania pozwalające na tworzenie paliw z odpadów. Rozwiązanie to może również z powodzeniem zostać powielone na terenie województwa świętokrzyskiego, w perspektywie tworzenia paliw zastępczych dla zlokalizowanego w regionie przemysłu cementowego.

Wytwarzanie paliwa ze zmieszanych odpadów komunalnych wymaga umiejscowienia w ciągu technologicznym sita pozwalającego na wydzielenie tzw. frakcji grubej odpadów (min. 80 lub 100 mm) złożonej z materiałów lekkich i palnych, głównie papieru, kartonu, tworzyw sztucznych, drewna. W wyniku dalszej mechanicznej obróbki tejże frakcji (stanowiącej w warunkach woj. świętokrzyskiego ok. 30-40% całkowitej masy odpadów komunalnych) można uzyskać paliwo o kaloryczności ok. 16-18 MJ/kg i wilgotności ok. 20% [16]. W celu zagwarantowania wysokiej jakości paliwa z odpadów (potwierdzonej tzw. certyfikatem jakości dostarczonym do cementowni z każdą próbką odpadów),

w tym zapewnienia ciągłej kontroli składu chemicznego ww. mieszanki palnej (zachowanie warunków bezpieczeństwa) ZZO powinny dodatkowo dysponować własnymi laboratoriami.

5. Podsumowanie

Z danych GUS wynika, że województwo świętokrzyskie należy aktualnie do jednych z najbardziej zaniedbanych regionów w Polsce jeżeli chodzi o sprawy gospodarki odpadami komunalnymi. Ponad 90% wszystkich odpadów komunalnych zebranych w województwie trafia obecnie na składowiska odpadów. Pomimo utrzymujących się od pewnego czasu w regionie optymistycznych trendów dotyczących recyklingu surowcowego, głównie odpadów opakowaniowych, to odzysk energii zawartej w odpadach komunalnych zebranych z gospodarstw domowych i obiektów usługowych pozostaje wciąż sprawą marginalną i wręcz zapomnianą. Z sytuacją tą trudno się pogodzić, jeżeli ma się na uwadze fakt, iż województwo świętokrzyskie jest jedynym w Polsce regionem, w którym występują aż trzy nowoczesne instalacje do współspalania odpadów w procesie wypału klinkieru (Lafarge – Małogoszcz, Dyckerhoff – Nowiny, Grupa CRH – Ożarów), w których z powodzeniem, przy zachowaniu odpowiedniego reżimu technologicznego wybrane i wstępnie przetworzone frakcje odpadów komunalnych mogą zostać poddane procesom termicznego unieszkodliwienia. Sam proces przetwarzania i tym samym przygotowania odpadów do współspalania w piecu do wypału klinkieru wymaga jednak rozbudowy obecnie istniejących w województwie rejonowych sortowni i zakładów zagospodarowania odpadów (ZZO). Przedstawiony w pracy system pozyskiwania i następnie w ramach rejonowych ZZO przetwarzania odpadów, m.in. w wy-

sokokaloryczną frakcję palną dla cementowni został już z powodzeniem zaimplementowany w programach gospodarki odpadami takich województw, jak lubelskie, podlaskie. Podsumowując należy dodać, że aby opłacalne i konkurencyjne dla składowania okazało się przetwarzanie tzw. frakcji grubej odpadów (m.in. papier, tektura, drewno, tworzywa sztuczne) na paliwa zastępcze stosowane w cementowniach, na poszczególnych szczeblach administracyjnych kraju konieczne wydaje się być dążenie do:

województwa:

- a) systematycznego (z każdym rokiem) podnoszenia opłaty marszałkowskiej za gromadzenie odpadów,
- b) dalszego rozwijania systemów selektywnej zbiórki frakcji palnych odpadów, m.in. papier i tektura, w tym opakowania, tworzywa sztuczne, tekstylia,
- c) wprowadzenia motywacji finansowej dla zakładów cementowych zlokalizowanych w poszczególnych regionach gospodarki odpadami;

ogólnie – obszar Polski:

- a) zniesienie niekorzystnych dla cementowni zapisów projektu Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 17 września 2009 r. w sprawie szczególnych warunków technicznych kwalifikowania części energii odzyskanej z termicznego przekształcenia odpadów komunalnych,
- b) podnoszenia świadomości społeczeństwa dotyczącej spraw termicznego unieszkodliwiania wybranych odpadów w zakładach cementowych,
- c) podjęcia wszelkich działań mających na celu uznanie wybranych frakcji palnych odpadów (m.in. papier i tektura, opakowania, drewno, guma, tekstylia) jako produktów – paliw (zgodnie z zaleceniami Dyrektywy 2008/98 Unii Europejskiej).

EDYTA GROBELSKA¹
AGATA LUDYNIA²

Kielce University of Technology
al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7
25-314 Kielce, Poland

¹e-mail: edytagrobelska@gmail.com

²e-mail: ludynia1@gmail.com

THE INFLUENCE OF SAMPLE PREPARATION BY THE LASER DIFFRACTION METHOD ON THE PARTICLE SIZE DISTRIBUTION OF BENTONITE

Abstract

In this study, the effect of sample preparation on the content of clay particles was investigated. Monoionic forms of bentonite from Slovakia were used in an experimental programme. The samples were tested by laser diffraction. The analysis of the results was conducted using the Helos H 2398 SUCEL. The preparation of samples has a significant influence on particle size distribution. The most similar results to those of the areometric analysis were obtained when tests are carried out directly after the preparation of samples by means of the Calgon disperser simultaneously with a mechanical stirrer.

This paper was presented at seminar for Ph.D. candidates at Kielce University of Technology.

Keywords: bentonite, laser diffraction method (LDM), particle size distribution (PSD)

1. Introduction

The particle size (also known as granulometric) composition is a significant parameter influencing many physical properties of soils and the processes occurring in them. It is also a basis for classification of soils according to the PN-86/B-02480 standard. Currently, there are a variety of methods used to determine the percentage of individual soil fractions. The methods fall into the following groups:

1. The sieve methods:
 - a) round-aperture metal sieves, square-aperture wire mesh screens, micro-perforated sieves,
 - b) the wet-sieving analysis.
2. The gravity methods:
 - a) the flow methods (by Kopecky),
 - b) the sedimentation methods:
 - the balance methods (the Atterberg method and the pipette method),
 - the areometric method,
 - the sedimentation balance method,
 - the photo-extinction sedimentation analysis,
 - c) the centrifugation.
3. The optical methods:
 - a) direct measurement of samples under a microscope,
 - b) the laser diffraction method.

4. The X-ray diffraction methods.

5. The organoleptic tests [13].

The sieve-pipette and the areometric methods are the most frequently used methods. The Polish Standard [7] recommends the areometric method for determining the particle size composition of soils with the particle diameter of $< 63 \mu\text{m}$.

Despite the wide-range application of the methods named above, their multiple limitations, related to the measurement of tiny particles, should be kept in mind. The sieve method, for instance, cannot be employed to determine the particle size composition of cohesive soils due to lack of sieves with apertures $< 63 \mu\text{m}$ in size. The sedimentation methods are based on Stokes' law, which assumes the spherical form of particles and their uniform density [13]. Therefore, they are not capable of rendering the real size of the soil particles. The $< 0.005 \text{ mm}$ clay particles are known [14] to have the form of plates and flakes, not the wrongly assumed spherical shape. Moreover, the accuracy of the areometer measurement can sometimes be distorted by the occurrence of minor amount of organic matter in the soil.

The recent technological advancement has allowed the increased application of the laser diffraction method

to the determination of the particle size composition of materials. Since the method is grounded in different principles and calculations, it does not give results comparable with those of the sedimentation methods. Nevertheless, it has been widely considered as innovative [13, 7]. In this paper a laser diffractometer employing the Mie theory-based model has been selected for the investigation. The diffractometer can be used for light scattering on irregularly-shaped particles unlike the simple Fraunhofer model, which makes the method precise. It should be pointed out that over the last 15 years, a number of manufacturers including Beckman-Coulter, Malvern, Microtrac, Fritsch, Retach, Horiba, Cilas and Helos have been developing laser diffractometry. This has enabled the particle size analysis in a wide range of particle dimensions [9]. The application of the laser method to the assessment of the particle size composition of materials is becoming increasingly common. The authors of the paper [6] recommend that the clay fraction be determined by the laser method through calculation of the Skempton parameter [7].

The experiments were conducted on bentonite due to its characteristic properties. Bentonite is a clay soil which contains the minimum montmorillonite content of 75%. Scientists derive the origin of bentonite from the decomposition of volcanic ash and dust settled at the sea bed in an alkaline environment. Rarely occurring in pure form, bentonite is usually accompanied by other clay minerals such as kaolinite and illite [1, 2], which are highly water-absorptive and swelling minerals. With such properties, they find application in the petroleum, chemical and food industries.

It is noteworthy that the use of bentonites in industry and environmental engineering is increasing year by year. One of their fundamental applications is the stabilization of boreholes and deep trenches. They are also employed as stabilizing and softening agents as well as absorbents [3]. In recent years, bentonites have been proposed as a buffer in nuclear waste repositories [4] due to their unique expanding properties and high adsorptive potential for water. In addition, they are used for the removal of toxic chemicals from the environment, the reduction of contamination spread in soil, water and air as well as, typically, in the sealing of landfills [5].

As mentioned above, bentonites are employed in many branches of industry. The investigation into their composition is a fundamental issue in many engineering solutions. However, it should be stated that regardless of the selected method of investigation, there is a variety of factors influencing the measurements. The method of

sample preparation is one of them. The paper presents various techniques of sample preparation for the analysis of the particle size composition of bentonite by the laser method. The results were compared with the areometric method, which is a standard practice in the soil classification studies. Still, it should be emphasised that with its significant simplifying assumptions, the areometric method does not render the real grain-size distribution of soils. Therefore, the results obtained by means of the laser method can show better agreement with the real particle size.

2. The methodology of the investigation

The HELOS H2398 SUCCELL laser was used to investigate the particle size composition of bentonite.

Two lasers, blue and red, are the source of light in the apparatus. Their individual configuration ensures coverage of a wide range of particle size. A system of two detectors enables measurement within the range of 0.1 – 87.50 μm .

Prior to the test, the sample material is mechanically (magnetic stirrer) and chemically (Calgon) dispersed in distilled water. Before the measurement is conducted, 10 ml of the sample material is with a laser beam. The size of the particles is calculated from the measurement treated with ultrasounds in order to remove possible aggregates. The prepared liquid together with the suspended matter flows through a measuring cell, where it is scanned of the laser beam diffraction field generated on the particles, and is read out from the diagram produced by the detector. The detector consists of a set of individual sensors, each of which collects scattered light from a certain angle range. The row of detector sensors takes 'a shot' of the light scattered on the particles going through the laser beam. An average measurement takes approximately 12 seconds, during which the angles of particle reflection in the cell are registered 1000 times per second. The number of measurements taken makes the overall sample analysis statistically significant. Despite that, the procedure is carried out at least three times. One shot only would not be representative of the sample as a whole, therefore the apparatus takes many shots and an arithmetic mean of the results is calculated.

As demonstrated above, the laser analysis has many advantages:

- 1) it is a quick method with high reproducibility,
- 2) a minor amount of sample material is required,
- 3) results are produced directly in a digital format,
- 4) the software enables the operator to observe the process in real time.

3. The description of the object of the investigation

The investigation into the particle size composition was carried out on a monoionic form of bentonite ($B^- Na^+$). Ca-montmorillonit, the initial material, was delivered from an open pit in Jelšovský Potok, Slovakia. Bentonites from Slovakia have been imported to Poland for many years. Up to 77% of the mineral comes from Jelšovský Potok [12]. Nowadays, the pit is considered one of the largest and most abundant deposits of bentonite in Central Europe. It is also one of the purest beds. The crude mineral in the best part of the deposit contains 50-85% of the smectite-group minerals (Ca-montmorillonit mainly) as well as the SiO_2 group minerals (quartz and cristobalite) and accessory minerals like feldspar, biotite, barite and goethite [12]. Bentonite from the deposit in Jelšovský Potok is one of the products of intense chemical weathering of rhyolitic tuffs, created as a result of the Tertiary volcanic activity in central Slovakia. The deposit is situated at the north-western boundary of the Kremnické foothills.

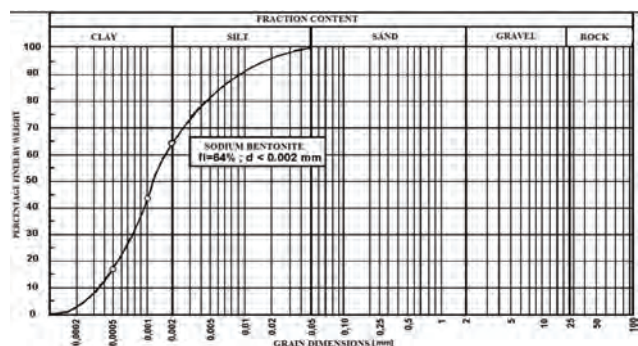
Ca-montmorillonit from Jelšovský Potok was subjected to ionic exchange. The monoionic soda form was obtained by multiple saturation of the fraction $< 63 \mu m$ and the removal of the substances dissolved by means of diffusion. Then bentonite was dried at room temperature and stored in an air-tight container until the tests. The detailed preparation procedure can be found in [15].

The soil properties after the exchange are as in Table 1:

The tests were conducted in compliance with the Polish Standard [7] according to the method presented in the above Table 1.

Table 1. Properties of the monoionic form of bentonite

PROPERTIES	PERCENT	METHOD
clay fraction content	64%	aerometric method
liquid limits w_L	314%	Casagrande method
plasticity parameter I_p	267%	$I_p = w_L - w_p$
Skempton's activity A	4.17%	clay fraction by aerometric method
Skempton's activity A	6.64%	clay fraction by laser method when $f_i = 40,19\%$
moisture content	12%	dry method
montmorillonite content	min 75%	water vapour sorption (WST) [17]



4. Results

A sample was prepared 48 hours prior to the experiment. Distilled water was added to a dry soil specimen so as to obtain a plastic paste. The sample was prepared earlier, because the tested bentonite requires longer saturation time due to its structure.

5. Conclusions

1. Sample preparation significantly influences the results of the investigation of the particle size content.
2. In every case, the clay fraction content determined by means of the laser method was lower than the content determined by the aerometric method.
3. The result nearing that of the aerometric method was produced for the sample prepared and tested on the same day, with liquid limit, by using a mechanical stirrer.
4. Further investigation is required. Apart from the proper sample preparation, there is a variety of factors influencing the precise determination of the particle size composition of bentonite by both the laser method, i.e. exposition length to ultrasounds, and the aerometric method (eg.: correct adoption of density ρ_s).
5. Obtaining the maximum convergence of the results from the laser and the aerometric methods is of practical significance due to the fact that the aerometric method is still considered a standard in soil classification. It is not unlikely, however, that with all the simplifying assumptions the aerometric method relies on, the results obtained by the laser method reflect the real particle size distribution.

The paper is co-financed with the European Union resources within the European Social Fund, project: *The Development Programme of the Teaching Potential of the Kielce University of Technology – education for success*, the Human Capital Operational Programme, Agreement no. UDA-POKL.04.01.01-00-175/08-00.

Table 2. Experiment plan

Mechanical stirring, sample prepared and tested on the same day, liquid limit		
1.	Description:	Results:
	1. 12 g of paste + 200 ml of water + 5 ml of dispersant + mechanical stirrer 5 minutes	$f_l = 40.19\%$ $f_n = 59.81\%$
	2. Test repeated after 48 h	$f_l = 31.68\%$ $f_n = 68.32\%$
	3. 10 g of undisturbed dry soil + 200 ml of water + 5 ml of dispersant + mechanical stirrer 5 min (see point 1; except for undisturbed dry soil sample – obviously, different weight due to heavier basis weight of paste)	$f_l = 38.38\%$ $f_n = 61.62\%$
	4. Test repeated after 48 h	$f_l = 29.89\%$ $f_n = 70.11\%$
	5. 10 g of undisturbed dry soil + 200 ml of water + 20 ml of dispersant + mechanical stirrer 5 minutes (see point 3; except for more dispersant – increased amount of dispersant does not induce better results)	$f_l = 33.43\%$ $f_n = 66.57\%$
	6. Test repeated after 48 h	$f_l = 30.41\%$ $f_n = 69.59\%$
Observations:	Tests after 48 hours indicate a lower clay fraction content.	
Manual mixing, sample tested on the next day after preparation, liquid limit		
2.	Description:	Results:
	1. 10 g of paste soaked in 200 ml of water + 5 ml of dispersant – after 48 hours mixed manually (no equivalent for manual mixing on the same day as nodules appear)	$f_l = 26.56\%$ $f_n = 73.44\%$
	2. 10 g in undisturbed dry soil + 200 ml of water + 10 ml of dispersant – after 48 hours mixed manually (conclusion can be drawn that manual mixing produces lower results than mechanical stirring)	$f_l = 28.92\%$ $f_n = 71.08\%$
Observations:	Comparing the results obtained with different amounts of dispersant, it was observed that the increase of dispersant in pastes in the first 24 hours of the test produced better results in the first 24 hours and worse in the next 24 hours. In suspensions, the results after the first 24 hours were worse than after the next 24 hours (this could be related to the time needed for the reaction)	
Manual mixing, sample tested on the same day after preparation, liquid/ soft-plastic limit		
3.	Description:	Results:
	1. 5 g of paste + several ml of water + 1 ml of dispersant	$f_l = 33.33\%$ $f_n = 66.67\%$
	2. Test repeated after 48 h	$f_l = 29.63\%$ $f_n = 70.37\%$
	3. 4.5 g of undisturbed dry soil + several ml of water + 1.5 ml of dispersant	$f_l = 36.29\%$ $f_n = 63.71\%$
	4. Test repeated after 48 h	$f_l = 28.78\%$ $f_n = 71.22\%$

References

- [1] Grabowska-Olszewska B.: *The Influence of Sorptive Properties of Selected Types of Cohesive Soil on Their Hydrofility*. (in Polish) Biul. Geol. UW, No. 10, 1968.
- [2] Grabowska-Olszewska B., Siergiejew J.M. (ed.): *Soil Science*. (in Polish) Wyd. Geol., Warszawa.
- [3] Yang Tao., Xiao-Dong Wen., Junfen Li., Liming Yang.: *Theoretical and Experimental Investigations on the Structures of Purified Clay and Acid-activated Clay*. Applied Surface Science, No. 252, pp. 6154-6161, 2006.
- [4] Montes G., Duplay J., Martinem L., Mendoza C.: *Swellingshrinkage Kinetics of MX80 Bentonite*. Applied Clay Science, No. 22, pp. 279-293, 2003.

- [5] Bergaya F., Lagaly G.: *Surface Modification of Clay Minerals*. Applied Clay Science, No. 19, pp. 1-30, 2001
- [6] Cichy W., Bryk J.: *Natural Soil Sealing with Bentonite. Seminar Materials – The Geotechnical Aspects of Waste Storage*. (in Polish) Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 1994.
- [7] PN-88/B-04481 *Building Lands. Soil Sample Testing*. (in Polish).
- [8] Myślińska E. *Laboratory Soil Investigations*. (in Polish) Wyd. Naukowe PWN, Warszawa 1992.
- [9] Ryżak M., Bieganski A., Walczak R.T.: *Application of laser diffraction method for determination of particle size distribution of grey-brown podzolic soil*. Research in Agricultural Engineering, 53, pp. 34-38, 2007.
- [10] Grabowska-Olszewska B.: *The Investigation into Microstructures and Porous Space by Using the Electron Scanning Microscope* (in Polish), in: The Methods of Investigation into Cohesive Soils, Grabowska-Olszewska (red.). Wydawnictwa Geologiczne – Warszawa, pp. 7-21, 1990.
- [11] Bolewski A., Budkiewicz M., Wyszomirski P.: *Ceramic Materials*. (in Polish) Wydawnictwo Geologiczne – Warszawa, 1991.
- [12] Kraus I., Kuzvart M.: *Deposits of Non-metallic Raw Materials*. Nakład SNTL, Praha 1987.
- [13] Ryżak M., Walczak R.T., Niewczas J.: *The Comparison of Particle Size Distribution of Soil Particles by the Laser Method and the Sedimentation Method*. (in Polish) Acta Agrophysica, 2004, No. 4(2), pp. 509-518.
- [14] Korabiewski B.: *Materials for the Second Year Students II of Geography*. Soil Science – Laboratory Exercises. (in Polish), No. 8, Wrocław 2011, pp. 1-31.
- [15] Kozłowski T.: *The Phase Composition of Water in Cohesive Soils below 0°C* (in Polish), Politechnika Świętokrzyska, Kielce 1997.
- [16] Stępkowska E.: *The Physical-chemical Properties of Clay Minerals*. (in Polish), In: The Problems of Physical Chemistry and Soil Dynamics (in Polish), Wyd. PAN, Wrocław 1973.

Edyta Grobelska

Agata Ludynia

Wpływ preparatyki próbek na rozkład granulometryczny cząstek bentonitu metodą dyfrakcji laserowej

1. Wprowadzenie

Skład granulometryczny to istotny parametr wpływający na wiele fizycznych właściwości gruntów i procesów w nich zachodzących. Stanowi również podstawę ogólnej klasyfikacji gruntów według normy PN-86/B-02480. Obecnie istnieje szereg metod mających na celu określenie procentowej zawartości poszczególnych frakcji gruntu. Wyróżnia się kilka grup metod:

1. Sitowe:

- a) sita metalowe z okrągłymi oczkami, sita siatkowe z kwadratowymi oczkami, sita mikroperforowane,
- b) analiza sitowa na mokro;

2. Grawitacyjne:

- a) przepływowe (Kopeckiego)
- b) sedymentacyjne:
 - wagowe: Atterberga, pipetowa,
 - areometryczna,

- wagi sedymentacyjnej,
- badania fotoekstynkcji zawiesiny;

c) odwirowywania.

3. Optyczne:

- a) bezpośredni pomiar składników pod mikroskopem,
- b) dyfrakcji laserowej;

4. Rentgenograficzne.

5. Organoleptyczne [13].

Do najczęściej stosowanych należą metody sitowo-pipetowa i areometryczna. Polska Norma [7] do oceny składu granulometrycznego gruntów o średnicy cząstek $< 63 \mu\text{m}$ zaleca metodę areometryczną.

Mimo szerokiego zastosowania powyższych metod należy pamiętać, iż napotykają one na liczne ograniczenia, szczególnie przy pomiarze bardzo małych cząstek. Metoda sitowa ze względu na brak sit o wymiarach oczek $< 63 \mu\text{m}$ nie nadaje się do oceny skła-

du granulometrycznego gruntów spoistych. Z kolei metody sedymentacyjne oparte są na prawie Stokesa, które zakłada kulistość cząstek i ich jednakową gęstość [13]. Nie pozwala to na uchwycenie rzeczywistych wymiarów cząstek gruntowych. Jak wiadomo [14], cząstki minerałów ilastych $< 0,005$ mm mają postać płytek i blaszek, a nie, jak założono – sfery. Dodatkowo dokładność odczytów na areometrze może czasem utrudniać występowanie w gruncie nawet niewielkich ilości części organicznych [8].

Dzięki postępowi technologicznemu ostatnich kilkunastu lat coraz częściej używaną metodą do oceny składu granulometrycznego stała się dyfrakcja laserowa. Nie jest to metoda dająca porównywalne wyniki z metodami sedymentacyjnymi, gdyż opiera się na innych zasadach i przeliczeniach, ale przez wielu uważana jest za innowacyjną [13, 7]. W niniejszej pracy do badań wykorzystano dyfraktometr laserowy, którego zasada działania opiera się na modelu Mie. Może on być używany dla rozpraszania na cząstkach o nieregularnym kształcie w przeciwieństwie do prostego modelu Fraunhofera, dzięki czemu metoda staje się bardziej precyzyjna. Warto wspomnieć, iż od 15 lat dyfraktometria laserowa jest ciągle ulepszana przez kilku producentów, wliczając w to Beckman-Coulter, Malvern, Microtrac, Fritsch, Retach, Horiba, Cilas i Helos, którzy urozmaicają pod względem rozpiętości wielkości i różnorodności ziaren, które mogą być zanalizowane [9]. Zastosowanie metody laserowej do oceny składu granulometrycznego jest coraz bardziej powszechne. Autorzy opracowania [6] uważają, że frakcję ilową najlepiej określać za pomocą oznaczenia współczynnika Skemptona metodą laserową [7].

Ze względu na szczególne właściwości, eksperymentom poddano bentonit. Jest to skała ilasta, która zawiera nie mniej niż 75% montmorillonitu. Według naukowców bentonit powstał w wyniku rozkładu popiołów i pyłów wulkanicznych osadzonych na dnie mórz w środowisku alkalicznym. Zwykle nie występuje w czystej postaci. Towarzyszą mu inne minerały ilaste, np.: kaolinit, illit [1,2]. Są to minerały odznaczające się dużą zdolnością pochłaniania wody, czemu towarzyszy pęcznienie. Ze względu na silne właściwości adsorpcyjne, znajdują one zastosowanie w przemyśle naftowym, chemicznym i spożywczym.

Warto wspomnieć, że wykorzystanie bentonitów przez przemysł i inżynierię środowiska wzrasta z roku na rok. Jednym z ich podstawowych zastosowań jest użycie do stabilizacji otworów wiertniczych i głębokich wykopów. Używane są również jako

środki stabilizujące, absorbenty i plastyfikatory [3]. W ostatnich latach bentonity, dzięki swoim szczególnym właściwościom ekspansywnym i wysokim potencjałom adsorpcyjnym dla wody, są proponowane do budowy barier ochronnych przy przechowywaniu odpadów radioaktywnych [4]. Ponadto mają zastosowanie przy usuwaniu toksycznych związków chemicznych ze środowiska, przy redukowaniu stopnia rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w glebie, wodzie i powietrzu, a także typowo do uszczelniania składowisk [5].

Bentonity wykorzystywane są w wielu dziedzinach przemysłu. Poznanie ich składu jest kwestią szczególnej wagi dla wielu rozwiązań inżynierskich. Należy jednak zaznaczyć, że poza wyborem odpowiedniej metody badawczej istnieje szereg czynników wpływających na wyniki pomiarów. Jednym z nich jest sposób przygotowania próbki do analizy. W pracy przedstawiono różne sposoby preparatyki próbek do analizy składu granulometrycznego bentonitu metodą laserową. Wyniki odniesiono do metody areometrycznej, stanowiącej standard przy badaniach klasyfikacyjnych gruntów. Należy jednak podkreślić, że wobec poważnych założeń upraszczających, metoda areometryczna nie podaje „rzeczywistego” rozkładu uziarnienia gruntu i to właśnie wyniki uzyskiwane przy użyciu metod laserowych mogą być bardziej zgodne z wymiarami realnych cząstek.

2. Metodyka badań

Do badań składu granulometrycznego bentonitu użyto lasera HELOS H 2398 SUCCELL.

Źródłem światła w aparacie są dwa lasery: niebieski i czerwony, tak dobrane aby zapewnić pokrycie jak największego zakresu wielkości cząstek. W połączeniu z systemem dwóch detektorów umożliwia to pomiar w przedziale $0,1 - 87,50$ μm .

Przed analizą materiał poddaje się dyspersji mechanicznej (mieszadło magnetyczne) i chemicznej (Kolgen) w wodzie destylowanej. Przed samym pomiarem, w celu usunięcia możliwych agregatów, próbkę w ilości około 10 ml poddaje się działaniu ultradźwięków. Tak przygotowany płyn wraz z zawieszonym materiałem przepływa przez celę pomiarową, gdzie skanowany jest przez wiązkę laserową. Rozmiar cząstek jest obliczany z wyniku pomiaru pola dyfrakcji wiązki laserowej powstającej na cząstkach, a odczytywany na powierzchni detektora. Detektor składa się z wielu osobnych czujników, z których każdy zbiera rozproszone światło z pewnego zakresu kątów. Szereg detektora robi „ujęcie” światła

rozproszony na cząstkach przechodzących akurat przez wiązkę laserową. Przeciętny pomiar trwa ok. 12 sekund, podczas których kąty odbicia cząstek w celi rejestrowane są 1000 razy na sekundę. Taka ilość uzyskanych wyników umożliwia statystycznie istotną analizę próbki jako całości. Pomimo to, procedura wykonywana jest co najmniej trzykrotnie. Zrobienie tylko jednego ujęcia nie byłoby reprezentatywne dla całej próbki, dlatego aparat robi wiele ujęć i wyciąga średnią z wyników.

Jak widać z powyższego, analiza laserowa ma wiele zalet:

1. Jest metodą szybką i ma dobrą odtwarzalność.
2. Wystarczy niewielkie ilości materiału demonstracyjnego.
3. Rezultaty są uzyskiwane bezpośrednio w formie cyfrowym.
4. Oprogramowanie umożliwia ponadto operatorowi śledzenie procesu w czasie rzeczywistym.

3. Przedstawienie obiektu badań

Badania składu granulometrycznego prowadzono na monojonowej formie bentonitu ($B^- Na^+$). Materiał wyjściowy stanowił Ca-montmorillonit pochodzący z kopalni Jelšovy Potok na Słowacji. Bentonity ze Słowacji od wielu lat stanowią przedmiot importu do Polski, w tym nawet do 77% kopaliny pochodzi z Jelšovego Potoku [12]. Obecnie kopalnia uznawana jest za jedno z najcenniejszych i największych złóż bentonitu w Europie Środkowej. Odznacza się równocześnie najwyższą czystością. Kopalina w stanie surowym w najlepszej partii złoża zawiera 50–85% minerałów grupy smektytu (głównie Ca-montmorillonit), a ponadto minerały grupy SiO_2 (kwarc, także cristobalit) oraz akcesorycznie skałen, biotyt, baryt i goethyt [12]. Bentonit z tego złoża stanowi jeden z produktów intensywnego wietrzenia chemicznego tufów ryolitowych, powstałych w rezultacie trzeciorzędowej aktywności wulkanicznej w środkowej Słowacji. Złoże jest usytuowane w północno – zachodnim obrzeżeniu pogórza Kremnickiego.

Ca-montmorillonit z Jelšovego Potoku poddano wymianie jonowej. Monojonową formę sodową otrzymano przez wielokrotne nasycanie frakcji < 63 μm i usunięcie substancji rozpuszczonych za pomocą dyfuzji. Bentonit następnie był suszony w temperaturze pokojowej i przetrzymywany do czasu badań

w szczelnym pojemniku. Szczegółowa preparatykę można znaleźć w pracy [15].

Właściwości gruntu po wymianie przedstawiono w tabeli 1.

4. Wyniki badań

Eksperyment zaczęto od przygotowania próbki 48 h wcześniej. Suchy grunt zalano wodą destylowaną tak, aby był w konsystencji plastycznej pasty. Próbkę zalano 48 h wcześniej, ponieważ badaniu poddawany jest bentonit, który ze względu na swoją strukturę, potrzebuje dłuższego czasu aby w pełni się nasycił.

5. Wnioski

1. Preparatyka próbek ma znaczący wpływ na wyniki badania składu granulometrycznego.
2. W każdym przypadku zawartość frakcji ilowej określona metodą laserową była niższa od zawartości określonej metodą areometryczną.
3. Wynik najbardziej zbliżony do metody areometrycznej uzyskano dla próbki przygotowanej i badanej tego samego dnia, w konsystencji płynnej, przy użyciu miesadła mechanicznego.
4. Badania wymagają kontynuacji, bo poza odpowiednim przygotowaniem próbki istnieje jeszcze szereg czynników mających wpływ na precyzyjne określenie składu granulometrycznego zarówno metodą laserową (np. czas ekspozycji na działanie ultradźwięków) jak i areometryczną (np. prawidłowe przyjęcie gęstości właściwej).
5. Dążność do uzyskania maksymalnej zbieżności wyników między metodami laserową i areometryczną ma znaczenie praktyczne, ponieważ ta ostatnia metoda uznawana jest nadal za standard przy klasyfikacji gruntów. Niewykluczone jednak, że wobec znanych założeń upraszczających stosowanych przy metodzie areometrycznej, to właśnie wyniki uzyskiwane metodą laserową lepiej odzwierciedlają rzeczywisty rozkład uziarnienia gruntu.

Autorki niniejszej pracy pobierają stypendium współfinansowane przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego projekt pt. „Program Rozwojowy Potencjału Dydaktycznego Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach – kształcenie na miarę sukcesu” Program Operacyjny Kapitał Ludzki, Umowa nr UDA-POKL.04.01.01-00-175/08-00.

HOW TO PREPARE THE MANUSCRIPT (Font size 14 pt Times New Roman)

Abstract

The abstract should not exceed 10 lines. It should provide information about the objectives of the work, methods used and test results obtained in the course of the experiments/analyses.

(Font size 10 pt Times New Roman Italic)

Keywords: phrases, words (Font size 10 pt Times New Roman)

1. Introduction

The introduction should present the background of the work (font size 11 pt Times New Roman).

2. Main text

2.1. General information

The paper volume should not exceed 8 pages of A4 size with font size of 11 pt (Times New Roman). The number in square brackets [1] should be used for quotations. The paper should be sent by email to sae@tu.kielce.pl. The papers in the journal are reviewed.

2.2. Figures

Figures (in black and white or colour) should be of good quality and numbered with the sequence of their appearance in the text. They should be centered and have a caption of 10 pt size. High resolution files *.JPG, *.WMF, *.CDR, *.TIFF, *.EPS, *.BMP files should be used and inserted into the text as well as sent as separate files. 10 pt spacing should be left between the figure and the text.

2.3. Tables

Tables should be centered. Titles should be placed above the tables and written with font size of 10 pt (Times New Roman). The same applies to the text in the table (see example below).

Table 1. Title of the table.

No	table	table	table
1	table	table	table
2	table	table	table
3	table	table	table

2.4. Equations

Equations and formulas should be centered and numbered in brackets. 11 pt spacing should be left between the equation and the text above and below it.

3. Conclusions

References (arranged in the citing order):

- [1] Nowak M.: *Modelowanie konstrukcyjne (Structural modelling)*. Postępy Technologiczne 10 (2000), pp. 30-34.
[2] Zarylski R.: *Pomiary dynamiczne (Dynamic measurements)*. WNT, Warszawa 1971.
(Font size 10 pt Times New Roman)

Maria Nowak

Tytuł w języku polskim

1. Wprowadzenie

2. Tekst artykułu

Tekst w języku polskim ma odpowiadać swoim układem wersji angielskiej, może być skrócony. Nie powinien zawierać tabel, rysunków, wzorów, a jedynie odniesienie do tych, które znajdują się w wersji angielskiej. Objętość artykułu nie powinna przekraczać 8 stron czcionką 11 (Times New Roman). Bibliografię należy umieszczać w nawiasie kwadratowym [1] i numerować w kolejności alfabetycznej. Artykuły należy przesłać na adres sae@tu.kielce.pl. Artykuły są recenzowane.

3. Wnioski

THE REVIEW PROCESS

The following requirements need to be met by the paper:

- the title should reflect the content of the paper
- the content should be within the thematic scope of the journal
- the paper should be properly and clearly divided into paragraphs
- original elements need to be part of the paper
- the research method should be properly selected
- adequate references need to be cited
- interpretation and conclusions should match the presented test results
- the paper should not contain parts indicating commercial use

The reviewers:

A. Bartosik, R. Chatys, R. Dachowski, O. Moroz, H. Nowak, L. Lichołai,
Z. Rymarczyk, V. Sidorov, Z. Tartachynska, A. Zwierzchowska

