

## 7. Streszczenie

Deficyt siarki to problem identyfikowany w glebach wielu krajów świata, w tym Polski. Nawożenie upraw tym pierwiastkiem stanowi obecnie istotny element działalności rolniczej, podobnie jak systematyczne zwiększanie zasobów materii organicznej w glebie. Materiały pochodzenia odpadowego stanowią potencjalne źródło siarki dla roślin. Celem badań było zweryfikowanie hipotezy badawczej zakładającej, że wielkość produkcji pulpy siarkowej pochodzącej z procesu odsiarczania biogazu uzasadnia wykorzystanie tego odpadu jako surowca w procesach produkcyjnych, aplikacja mieszanin pulpy siarkowej i wybranych materiałów organicznych umożliwia równoczesne wzbogacenie gleby w łatwo dostępną siarkę i materię organiczną oraz wywiera korzystny wpływ na plonowanie kukurydzy, a stworzenie granulatu z pulpy siarkowej i materiału organicznego jest technicznie możliwe.

Badanie ankietowe przeprowadzono w latach 2018-2021 wśród personelu, zlokalizowanych na terenie Polski, największych oczyszczalni ścieków komunalnych. Dotyczyło wielkości produkcji i kierunków zagospodarowania odpadowej pulpy siarkowej (pochodzącej z procesu odsiarczania biogazu powstającego w trakcie fermentacji metanowej osadów ściekowych).

Trwające 240 dni doświadczenie inkubacyjne założono w 2017 roku na dwóch glebach: bardzo lekkiej i ciężkiej. W ramach każdej gleby, schemat doświadczenia obejmował 9 obiektów: obiekt kontrolny (bez dodatków), obiekty z dodatkiem siarki (wprowadzonej z pulpą siarkową) oraz obiekty z dodatkiem mieszanin pulpy siarkowej z materiałami organicznymi: obornikiem granulowanym bydlęcym, osadem pofermentacyjnym i biowęgłem. Siarkę stosowano w dwóch dawkach: dla gleby bardzo lekkiej 20 i 40 mg S · kg<sup>-1</sup> s.m. gleby, a dla gleby ciężkiej 30 i 60 mg S · kg<sup>-1</sup> s.m. gleby. Po 240 dniach określono dynamikę utleniania siarki zawartej w pulpie siarkowej oraz wpływ aplikacji materiałów na zakwaszenie, aktywność biologiczną gleb oraz zawartość węgla organicznego w glebach.

Doświadczenie polowe realizowano w latach 2018-2019 w Stacji Doświadczalnej Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie. W I roku (2018 r.) prowadzenia doświadczenia wyodrębniono 5 obiektów: obiekt kontrolny bez nawożenia, obiekt z nawożeniem pulpą siarkową oraz obiekty z nawożeniem pulpą siarkową w połączeniu z materiałami organicznymi (obornikiem granulowanym bydlęcym, kompostem z odpadów zielonych i biowęgłem). Dawki składników pokarmowych wyniosły 155 kg N · ha<sup>-1</sup>, 42 kg P · ha<sup>-1</sup>, 70,5 kg K · ha<sup>-1</sup> i 50 kg S ·

ha<sup>-1</sup>. W II roku (2019 r.) doświadczenie kontynuowano celem oceny dwóch strategii nawożenia: ponownego zastosowania materiałów i nawozów wprowadzonych w I roku badań i wyłącznego nawożenia mineralnego NPK, w celu określenia następczego działania materiałów wykorzystanych w I roku badań. Z tego powodu w II roku prowadzenia doświadczenia każde z poletek podzielono na pół. Nawożenie w II roku prowadzenia doświadczenia stosowano w takich samych dawkach, jak w I roku badań. W obu latach badań rośliną testową była kukurydza odmiany San, z przeznaczeniem na kiszonkę. Po każdym roku prowadzenia doświadczenia określono wpływ nawożenia materiałami na wielkość i skład chemiczny plonu kukurydzy oraz na chemiczne właściwości gleby.

Bazując na materiałach wykorzystanych w eksperymencie inkubacyjnym i polowym, przygotowano prototyp nawozu w formie granulowanej. Wykorzystano pulpę siarkową i obornik granulowany bydlęcy. Granulat przygotowano zgodnie z procedurą dostosowaną do właściwości fizycznych i chemicznych komponentów. Określono podstawowe właściwości fizyczne wyrobu.

Wielkość rocznej produkcji pulpy siarkowej w przebadanych oczyszczalniach ścieków w Polsce (zakładach o projektowej maksymalnej przepustowości > 50 000 m<sup>3</sup> · d<sup>-1</sup>) wyniosła około 40 Mg. Materiał ten z reguły był przekazywany firmom zewnętrznym w ramach zawartych umów na transport oraz zbieranie lub odzysk odpadu.

Zawartość siarki siarczanowej w inkubowanym materiale glebowym z dodatkiem pulpy siarkowej i jej mieszanin z materiałami organicznymi istotnie się zwiększała do 60 dnia inkubacji, a następnie ulegała zmniejszeniu. Aplikacja wymienionych materiałów prowadziła do istotnego zwiększenia zasobności w przyswajalną formę siarki i obniżenia wartości pH inkubowanego materiału glebowego. Oddziaływanie wprowadzonych materiałów na aktywność dehydrogenaz zależało od składu granulometrycznego gleby (wpływ zaaplikowanych materiałów na aktywność tych enzymów w glebie bardzo lekkiej był niewielki, a w glebie ciężkiej ich aktywność z reguły była ograniczona obecnością wprowadzonych materiałów). Aplikacja badanych materiałów miała niewielki wpływ na zawartość węgla organicznego ogółem w inkubowanym materiale glebowym (istotną zmianę wartości tego parametru, w odniesieniu do gleby obiektu kontrolnego, odnotowano tylko w niektórych obiektach gleby ciężkiej).

W odniesieniu do obiektu kontrolnego (nienawożonego), zastosowane nawożenie prowadziło do istotnego zwiększenia plonu świeżej i suchej masy części nadziemnych kukurydzy (przy czym, w porównaniu do nawożenia pulpą siarkową, nie stwierdzono aby aplikacja mieszanin

pulpy siarkowej z materiałami organicznymi prowadziła do istotnego zwiększenia plonowania kukurydzy). Rośliny nawożone badanymi materiałami cechowały się porównywalną lub większą zawartością azotu ogółem i porównywalną lub mniejszą zawartością siarki ogółem niż rośliny obiektu kontrolnego. Nie wykazano wpływu zastosowanych materiałów na wartość pH i zawartość węgla organicznego ogółem w glebie doświadczenia polowego. Zastosowane nawożenie prowadziło z reguły do zwiększenia zasobności gleby w siarczanową formę siarki.

Przygotowany granulat nawozowy cechował się porowatą strukturą. Był to materiał z przewagą granul o średnicy 0,5-3 mm, małej gęstości nasypowej i uwilgotnieniu.

## 8. Summary

The problem of sulfur deficiency has been identified in soils of many countries around the world, including Poland. Crops fertilization with this nutrient is an important part of agricultural practices, as is the systematic increase in soil organic matter content. Materials of waste origin constitute a potential source of sulfur for plants. The aim of the research was to verify the research hypothesis assuming that the amount of sulfur pulp production from biogas desulfurization process justifies the use of this waste as a raw material in production processes, application of mixtures of sulfur pulp and selected organic materials enables simultaneous enrichment of soil with readily available sulfur and organic matter and has a beneficial effect on maize yielding, and the production of granules from sulfur pulp and organic material is technically possible.

The survey study was conducted in 2018-2021, among the staff of the largest municipal wastewater treatment plants located in Poland. It focused on the production amount and directions in the management of waste sulfur pulp (originated from the biogas desulfurization during sewage sludge methane fermentation).

A 240-day incubation experiment was conducted in 2017. It consisted of two soils, i.e. very light and heavy, and 9 treatments (for each soil): non-amended soil (control), soil amended with sulfur (introduced as sulfur pulp) as well as soil amended with mixtures of sulfur pulp and organic materials: granulated cattle manure, digestate and biochar. Two doses of sulfur were applied: 20 and 40 mg S · kg<sup>-1</sup> d.m. for very light soil and 30 and 60 mg S · kg<sup>-1</sup> d.m. for heavy soil. The dynamics of oxidation of sulfur contained in waste sulfur and the effect of introduced materials on soil properties, i.e. acidity, biological activity and organic carbon content, were determined.

The field experiment was conducted in the years 2018-2019 at the Experimental Station of the University of Agriculture in Krakow. In the first year of the experiment (2018), it comprised 5 treatments: non-fertilized soil (control), soil fertilized with sulfur pulp and soil fertilized with mixtures of sulfur pulp and organic materials (granulated cattle manure, compost from green waste and biochar). The following doses of fertilization were used: 155 kg N · ha<sup>-1</sup>, 42 kg P · ha<sup>-1</sup>, 70,5 kg K · ha<sup>-1</sup> and 50 kg S · ha<sup>-1</sup>. In the second year (2019), the experiment was continued to assess two fertilization strategies: reapplication of materials and fertilizers introduced in the first year of the research, and exclusive mineral NPK fertilization, in order to

determine the residual effect of materials used in the first year of the experiment. Due to this reason, in the second year of the research, each plot was divided in half. In the second year of the experiment, fertilization was applied in the same doses as in the first year of the research. In both years of the research, 'San' maize, which was cultivated for silage, was the test plant. After each year of the experiment, the effect of applied fertilization on the quantity and chemical composition of maize yield and chemical properties of soil, was determined.

Based on the materials used in incubation and field experiments, a prototype of granulated fertilizer was prepared. Sulfur pulp and granulated cattle manure were used. The prototype of granulated fertilizer was prepared according to a procedure adjusted to the physical and chemical properties of the components. Basic physical properties of the manufactured product were determined.

Annual production of sulfur pulp in the tested sewage treatment plants in Poland (plants with a designed maximum capacity  $> 50,000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ) was approximately 40 tons. This material was usually transferred to external companies under contracts for waste transportation and collection or waste recovery.

Sulfate sulfur content in the incubated soil material, treated with the addition of sulfur pulp and its mixtures with organic materials, increased significantly up to day 60, and then decreased. Application of these materials significantly increased the content of available sulfur and decreased the pH value of the incubated material. The effect of introduced materials on dehydrogenase activity depended on soil granulometric composition (the impact of the applied materials on the activity of these enzymes in very light soil was small, and in heavy soil their activity was usually limited by the presence of introduced materials). Application of the studied materials had little effect on the total organic carbon content in the incubated soil material (a significant change in the value of this parameter, in relation to the control soil, was noted in some treatments of heavy soil).

Compared to the control treatment (non-fertilized), the applied fertilization significantly increased the yield of fresh and dry mass of aboveground parts of maize (however, compared to sulfur pulp fertilization, fertilization with mixtures of sulfur pulp and organic materials did not cause a significant increase in the maize yield). Plants treated with the examined materials had a comparable or higher content of total nitrogen, and a comparable or lower content of total sulfur, in relation to the control plants. The applied materials had no significant effect on the pH value

and total organic carbon content in the soil of the field experiment. As a rule, the applied fertilization increased the soil abundance in sulfate sulfur.

The prepared granulated fertilizer had a porous structure. It consisted mostly of granules with a diameter of 0.5-3 mm, and was characterized by low bulk density and moisture content.