

Wpływ temperatury na mikrobiologiczne usuwanie siarkowodoru z biogazu

*Magdalena Zdeb, Małgorzata Pawłowska
Politechnika Lubelska*

1. Wstęp

Siarkowodór (H_2S) jest gazem bardzo toksycznym, bezbarwnym, palnym, o charakterystycznym zapachu zgniłych jaj. Jest bardzo niebezpieczny dla organizmów żywych. Już niskie stężenia siarkowodoru negatywnie wpływają na układ nerwowy, a stężenie wyższe od 600 ppm może wywołać śmierć. Związek ten wykazuje korozyjność w stosunku do betonu i stali. Ponadto, powstające w czasie spalania siarkowodoru tlenki siarki zanieczyszczają atmosferę [16, 17]. Siarkowodór powstaje zarówno w warunkach naturalnych, jak i antropogennych. Procesy naturalne to redukcja siarczanów i organicznych związków zawierających siarkę w naturalnych ekosystemach lądowych i wodnych pozbawionych dostępu tlenu. Siarkowodór pochodzący ze źródeł antropogennych powstaje głównie w oczyszczalniach ścieków, w procesie kompostowania i składowania odpadów, w przemyśle spożywczym i paliwowym [11]. Tworzy się on w trakcie beztlenowego rozkładu substancji organicznej i stanowi jeden ze składników biogazu powstającego na składowiskach odpadów i w procesie oczyszczania ścieków. Jego stężenie w biogazie może sięgać nawet 2% obj. [19].

Usuwanie siarkowodoru z zanieczyszczonych nim gazów (desulfuryzacja) prowadzone jest głównie ze względów zdrowotnych, ale także w celu zapobiegania korozji materiałów i minimalizacji zanieczyszczenia atmosfery. Odsiarczanie może być prowadzone na wiele sposobów. Na wybór procesu wpływają głównie skład gazu, jego temperatura oraz ciśnienie. Do usuwania siarkowodoru stosowane są metody fizyczne, chemiczne i biologiczne. Wadą metod fizycznych i chemicznych są wysokie koszty inwestycyjne i eksploatacyjne, wysokie koszty potrzebnych chemikaliów oraz problemy z zagospodarowaniem odpadów [12].

Metody biologiczne wydają się być najbardziej atrakcyjnymi, głównie ze względu na niskie nakłady kapitałowe oraz brak ich negatywnego wpływu na środowisko [14]. W procesach biologicznych zanieczyszczenia na skutek działalności mikroorganizmów osadzonych na wypełnieniu, rozkładane są do produktów nieszkodliwych, jak woda, CO₂ i proste związki mineralne [18]. Proces mikrobiologicznego oczyszczania gazów może się odbywać w urządzeniach zwanych biofiltrami, bioskruberami i bioreaktorami trójfazowymi (z warstwą nawadnianą). W biofiltrach wypełnienie stanowi materiał biologiczny (kora, torf, kompost, osady ściekowe), zawierający składniki odżywcze, natomiast w bioreaktorach trójfazowych podłożem dla rozwoju bakterii są materiały obojętne (szkło, ceramika, plastik). W biofiltrach oczyszczany gaz, wcześniej nawilżony, przepuszczany jest przez stałe złożo biologiczne. W bioreaktorach trójfazowych z warstwą nawadnianą mikroorganizmy osadzone są na wypełnieniu nieorganicznym, podczas gdy woda z solami odżywczymi, spływając w dół po wypełnieniu, zwilża warstwę biologiczną. Gazy mające ulec oczyszczeniu przemieszczają się zwykle przeciwnie do kierunku przepływu cieczy. Ciecz absorbuje zanieczyszczenia, które dyfundują następnie do warstwy mikroorganizmów na powierzchni wypełnienia, gdzie ulegają utlenianiu. W bioskruberach zanieczyszczenia z gazów również absorbowane są w cieczy, w której zawieszone są mikroorganizmy. Jednak intensywne procesy biologicznego rozkładu zanieczyszczeń zachodzą dopiero w odstojniku. Proces absorpcji zanieczyszczeń i ich mikrobiologicznego rozkładu (regeneracja cieczy) zachodzą więc w dwóch oddzielnych komorach.

Biofiltracja jest metodą stosowaną głównie do usuwania odorów, między innymi siarkowodoru. Do jej zalet należą niskie nakłady inwestycyjne, niskie koszty eksploatacyjne oraz wysoka skuteczność (powyżej 99%). Najczęściej stosowanymi w biofiltracji zanieczyszczonych gazów szczepami bakterii są *Chlorobiaciae*, *Xanthomonas*, *Thiobacilli*. Według Bohna ilość mikroorganizmów przypadająca na 1 g organicznego materiału wypełniającego biofiltr może dochodzić do 1 miliona [1].

Czynnikami wpływającymi na przebieg procesów biologicznych są głównie: stężenie zanieczyszczenia w oczyszczanym gazie, natężenie przepływu, odczyn oraz temperatura. W trakcie procesów biologicznych temperatura powinna być kontrolowana w celu utrzymania ich prawidłowego przebiegu. Zbyt wysokie temperatury powodują denaturację białek; zbyt niskie – zwykle hamują podziały komórkowe, przez co negatywnie wpływają na rozwój mikroorganizmów odpowiedzialnych za rozkład zanieczyszczeń. Niekiedy obserwuje się, że niższe temperatury (nieprzekraczające jednak minimalnych wartości granicznych dla aktywności bakterii) polepszają przebieg procesu poprzez poprawę sorpcji zanieczyszczającej substancji.

Zmiany temperatury w złożu mogą być spowodowane zarówno czynnikami zewnętrznymi (wpływ temperatury powietrza atmosferycznego), jak i wewnętrznymi (egzotermiczny charakter procesu). Na skutek respiracji bakterii powstaje energia cieplna, powodująca podwyższanie temperatury złoża, a przez to – wysuszanie materiału wypełniającego biofiltr [7]. Wysuszanie medium, na którym utwierdzone są mikroorganizmy, jest jednym z częściej występujących czynników negatywnie oddziałujących na proces biofiltracji.

Celem eksperymentu było zbadanie wpływu temperatury na szybkość procesu usuwania siarkowodoru z powietrza. Badanym medium było sztuczne podłoże organiczne POKON, bogate w substancje odżywcze dostępne dla bakterii. Badania prowadzono w warunkach statycznych we fiolkach szklanych o objętości 25,5 ml inkubowanych w dwóch różnych temperaturach: 6 i 28°C. Maksymalne stężenie początkowe siarkowodoru wynosiło 48% objętościowych.

2. Materiały i metody

W eksperymencie użyto dostępnego w handlu sztucznego substratu organicznego POKON, stosowanego w uprawie roślin. Baza ta została zastosowana w doświadczeniu bez specjalnego wstępnego przygotowania. Właściwości materiału podano w tabeli 1. Siarkowódz gazowy wytworzono w reakcji stężonego H_2SO_4 i siarczku sodu w aparacie Kippa.

W celu osiągnięcia zamierzonego celu przeprowadzono eksperyment statyczny, w którym przygotowano dwie serie próbek (każdą w trzech powtórzeniach). W każdej serii przygotowano po 3 fiołki o objętości 25,5 ml, w których umieszczono 0,5 g próbki podłoża. Następnie fiołki szczelnie zamknięto gumowymi korkami i inkubowano w dwóch temperaturach przez okres dwóch tygodni zanim rozpoczęto właściwy eksperyment. W tym czasie do fiołek dodawano siarkowódz w celu zapewnienia ciągłej dostępności substratu dla bakterii. Siarkowódz dozowany był do fiołek przy użyciu strzykawki. Aby zapobiec nadmiernemu wzrostowi ciśnienia wewnątrz fiołek podczas dozowania gazu w korku umieszczano dodatkową igłę.

Szybkość usuwania siarkowodoru obliczano na podstawie spadku stężenia tego gazu we fiolkach, w czasie. Szybkość tę określono, jako ilość siarkowodoru usuniętą przez daną objętość badanego materiału w jednostce czasu. Próbkę gazową o objętości 150 μ l pobierano cyklicznie, poprzez gumowe korki, za pomocą strzykawki. Próbkę analizowano chromatograficznie za pomocą chromatografu gazowego GC Shimadzu 14B, wyposażonego w szklaną kolumnę wypełnioną Porapakiem Q. W celu integracji pików posłużono się programem ChromaX 2007 wersja 1.0 b.

Tabela 1. Właściwości substratu organicznego POKON [10, 20]
Table 1. The properties of the organic substratum POKON [10, 20]

Parametr	Wartość
zawartość wody (% s.m.)	187
gęstość nasypowa (kg dm^{-3})	0,43
gęstość właściwa (kg dm^{-3})	1,32
porowatość całkowita (%)	88,0
ogólny węgiel organiczny (% s.m.)	40,7
TKN (% s.m.)	0,94
pH	5,5
Zawartość metali ciężkich ($\text{mg kg}^{-1}\text{s.m.}$)	
Cd	0,42
Cr	3,25
Cu	2,82
Fe	2205,95
Mn	59,64
Ni	1,50
Pb	26,49
Zn	42,63
Hg	poniżej poziomu wykrywalności

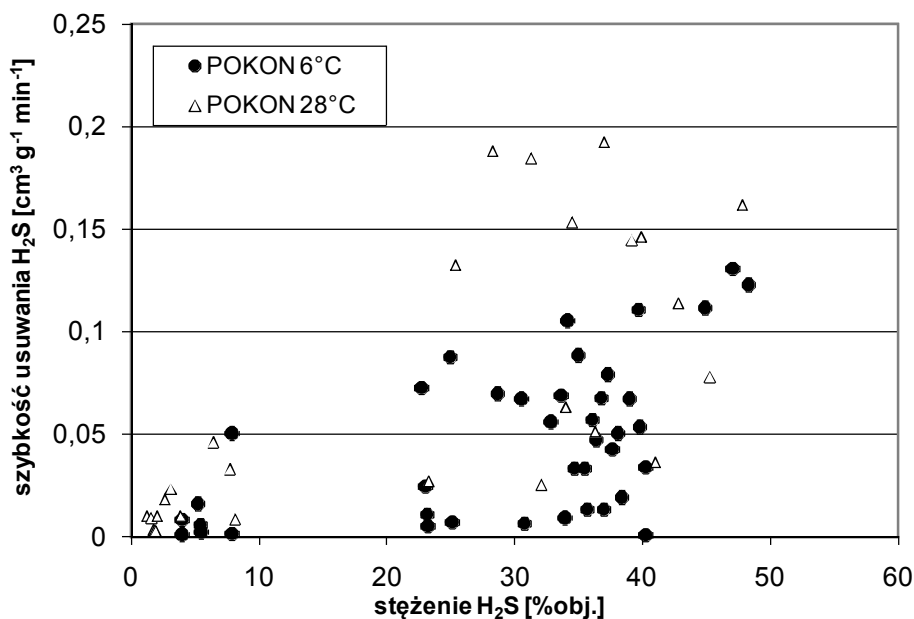
W celu sprawdzenia, czy siarkowodór nie jest sorbowany przez szkło lub gumę, czyli materiały mające bezpośredni kontakt z gazem w doświadczeniu, przeprowadzono próbę kontrolną. Przygotowano 3 fiołki niewypełnione materiałem, do których wprowadzono siarkowodór w podobnym stężeniu jak we właściwym eksperymencie. Po wykonaniu analizy chromatograficznej pobieranych w odstępach czasu próbek gazowych zaobserwowano brak istotnej zmiany stężenia gazu. Stwierdzono więc, że sorpcja nie występowała.

3. Wyniki i ich dyskusja

Wpływ temperatury na szybkość usuwania siarkowodoru w substracie organicznym POKON przedstawiono na rys. 1.

Zgodnie z przewidywaniem, wyższe wartości szybkości usuwania siarkowodoru zaobserwowano w próbkach inkubowanych w temperaturze 28°C. Maksymalna wartość szybkości usuwania siarkowodoru w próbkach inkubowanych w temperaturze 28°C wynosiła $0,19 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1} \text{ min}^{-1}$ ($7468 \text{ g m}^{-3} \text{ h}^{-1}$), a w próbkach inkubowanych w 6°C wynosiła $0,13 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1} \text{ min}^{-1}$ ($5124 \text{ g m}^{-3} \text{ h}^{-1}$) i była o 30% niższa. Przy wzroście temperatury o 22°C zaobserwowano 1,46-krotny wzrost maksymalnej szybkości usuwania siarkowodoru. W zakresie

stężenie siarkowodoru do 10%, wartości średniej szybkości usuwania H_2S dla próbek inkubowanych w temperaturze 6 i 28°C wynosiły odpowiednio $0,012 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1} \text{ min}^{-1}$ ($471 \text{ g m}^{-3} \text{ h}^{-1}$) i $0,015 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1} \text{ min}^{-1}$ ($590 \text{ g m}^{-3} \text{ h}^{-1}$). Przy stężeniach siarkowodoru powyżej 20% zaobserwowano większe różnice między średnimi szybkościami usuwania gazu w obu temperaturach. W przypadku próbek o niskiej temperaturze wartość średnia szybkości wynosiła $0,054 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1} \text{ min}^{-1}$ ($2127 \text{ g m}^{-3} \text{ h}^{-1}$), a w próbkach inkubowanych w temperaturze wyższej – $0,1 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1} \text{ min}^{-1}$ ($3863 \text{ g m}^{-3} \text{ h}^{-1}$). Większa średnia szybkość usuwania siarkowodoru, będąca wynikiem wzrostu temperatury do 28°C, była w tym przypadku zaledwie 1,85 razy wyższa niż w temperaturze 6°C.



Rys. 1. Wpływ temperatury na szybkość usuwania siarkowodoru w substracie organicznym POKON

Fig. 1. The influence of temperature on H_2S removal rate in artificial organic base POKON

Biorąc pod uwagę tak niską wartość wzrostu aktywności przy wzroście temperatury o 22°C stwierdzić można, że proces ma charakter niebiologiczny albo, że jest on limitowany przez czynniki fizyczne. Podstawą do takiego stwierdzenia są dane podane przez Kinga, według którego proces jest limitowany biochemicznie, jeśli współczynnik wzrostu aktywności przy wzroście temperatury o 10°C przekracza wartość 2 [8]. Potwierdzenie tego wniosku wymaga

dalszych badań szybkości usuwania H_2S w temperaturach pośrednich pomiędzy 6 i $28^{\circ}C$. Istnieje bowiem prawdopodobieństwo, że maksymalna szybkość usuwania H_2S przez bakterie obecne w podłożu w badanym przypadku została osiągnięta w temperaturze poniżej $28^{\circ}C$.

W literaturze znaleźć można dane dotyczące wpływu temperatury na przebieg biologicznych procesów usuwania zanieczyszczeń gazowych. Różni autorzy podają zbliżone do siebie zakresy temperatur, w których biofiltracja zachodzi najefektywniej. Optymalne wartości temperatury dla różnych szczepów bakterii zależą od ich preferencji temperaturowych. Według Bohna większość odorów usuwana jest w temperaturze od 25 do $40^{\circ}C$, przy optymalnej temperaturze dla tych procesów około $37^{\circ}C$ [1]. Podobne zakresy temperatur dla optymalnej aktywności bakterii podawane są również dla bakterii metanotroficznych, utleniających metan: $10\div 35^{\circ}C$ [4]. Wyniki zbliżone do Bohna uzyskali Yang i Allen, którzy badając bakterie utleniające siarkę zaobserwowali ich największą aktywność w przedziale temperatury $25\div 50^{\circ}C$ [21]. Według Cha i wsp. bakterie *Thiobacillus* sp.IW, jedne z najczęściej stosowanych w biofiltracji, wykazują optimum wzrostu w temperaturze $30^{\circ}C$ [3]. Opierając się na tych danych, Oh i wsp. przeprowadzili doświadczenie, w którym badali wpływ temperatury na proces usuwania H_2S przez te bakterie. Zaobserwowali maksymalną efektywność *Thiobacillus* sp.IW w przedziale temperatur $30\div 40^{\circ}C$ [13]. Chung i wsp. badali wpływ temperatury w zakresie $15\div 50^{\circ}C$ na usuwanie H_2S w procesie biofiltracji prowadzonej przez bakterie *Thiobacillus thioparus* CH11. Najwyższą efektywność procesu zaobserwowali w temp. $20\div 37^{\circ}C$, najmniejszą przy $50^{\circ}C$, co najprawdopodobniej było efektem wrażliwości bakterii na wysokie temperatury. Optymalna temperatura dla przebiegu procesu wynosiła $30^{\circ}C$ [5]. Podobne wyniki uzyskali Knauf i Zimmer, badający efektywność usuwania związków organicznych z gorących gazów wylotowych pochodzących z fabryki produkującej płyty pilśniowe. Zauważyli oni spadkową tendencję efektywności usuwania zanieczyszczeń wraz ze wzrostem temperatury gazów wylotowych. W eksperymencie zastosowano dwa materiały: wióry drzewne oraz kompost z kory drzewnej. Przy wzroście temperatury z 35 do $50^{\circ}C$ zaobserwowano spadek efektywności procesu usuwania zanieczyszczeń organicznych na wiórach drzewnych z 80 do 70%. W przypadku kompostu spadek wydajności procesu z 95 do 85% odnotowano przy wzroście temperatury z 40 do $55^{\circ}C$ [9]. Brennan i wsp., przeprowadzając biofiltrację siarkowodoru i merkaptanu metylowego, zaobserwowali około 50% spadek efektywności usuwania zanieczyszczeń na skutek obniżenia temperatury z wartości $20\div 22^{\circ}C$ do wartości $9\div 12^{\circ}C$ [2]. Z kolei Pinnette i wsp. stwierdzili, że usuwanie odorów może być z powodzeniem prowadzone nie tylko w zakresie temperatur najczęściej podawanym przez badaczy, ale również w temperaturze poniżej $10^{\circ}C$ [15], co potwierdzało by nasze obserwacje. Natomiast Datta i wsp. dowiedli, że biologicz-

ne procesy usuwania zanieczyszczeń zachodzić mogą również w temperaturach około 70°C (biofiltracja termofilowa). Badali oni procesy usuwania siarkowodoru w temperaturach 40, 50, 60 i 70°C, prowadzone przez bakterie z gorących źródeł. Stwierdzili, że procesy te skutecznie zachodzą nawet w wysokiej temperaturze, a glukoza i glutaminian sodu jeszcze bardziej je intensyfikują [6].

Doświadczenie opisane w artykule przeprowadzono w warunkach statycznych, dlatego nie można wysnuć konkretnych wniosków z porównania jego wyników z wynikami eksperymentów prowadzonych w warunkach przepływowych, które dostępne są w literaturze. W eksperymencie nie przeprowadzono również identyfikacji szczepu bakterii, odpowiedzialnych za usuwanie H₂S. Stężenie początkowe siarkowodoru w opisywanym eksperymencie wynosiło 48% obj. i było wielokrotnie większe od początkowych stężeń H₂S, wprowadzanych do układów biologicznych pracujących w warunkach dynamicznych.

4. Podsumowanie

Temperatura jest czynnikiem silnie wpływającym na wzrost i aktywność bakterii, odgrywających główną rolę w biologicznych procesach oczyszczania gazów. Optymalny zakres temperatury dla usuwania danego zanieczyszczenia zależy głównie od preferencji temperaturowych stosowanych w procesie szczepów bakterii. Skuteczne usuwanie większości odorów, jak wynika z danych literaturowych, zachodzi w zakresie temperatur 20÷40°C. Potwierdzają to wyniki przeprowadzonego doświadczenia, gdzie stwierdzono, iż szybkość usuwania H₂S w próbkach inkubowanych w temperaturze 28°C była wyższa niż w temperaturze 6°C. Jednakże efektywne oczyszczanie gazów z siarkowodoru może być również prowadzone w niższych temperaturach, o czym świadczy wysoka wartość szybkości usuwania H₂S, mierzona w temperaturze 6°C.

Literatura

1. **Bohn H.:** *Consider biofiltration for decontaminating gases.* Chemical Engineering Progress Vol. 88, No 4, 34-40, 1992.
2. **Brennan B. M., Donlon M., Bolton E.:** *Peat biofiltration as an odour control technology for sulphur-based odours.* Chartered Institution of Water and Environmental Management Vol. 10, No 3, 190-198, 1996.
3. **Cha J.-M., Park Y., Lee I.-W.:** *Effect of cultivation condition on growth of the hydrogen sulphide-degrading Thiobacillus sp.IW isolated from waste coal mine water.* Korean Journal of Biotechnology and Bioengineering 9, 287-293, 1994.
4. **Chandranthi M., Mehrotra A. K., Hettiaratchi J. P. A.:** *Thermal conductivity of leaf compost used in biofilters: An experimental and theoretical investigation.* Environmental Pollution 136, 167-174, 2005.

5. **Chung Y.-Ch., Huang Ch., Tseng Ch.-P.:** *Operation optimization of Thiobacillus thioparus CH11 biofilter for hydrogen sulfide removal.* Journal of Biotechnology 52, 31-38, 1996.
6. **Datta I., Fulthorpe R., Sharma S., Grant Allen D.:** *High-temperature biotrickling filtration of hydrogen sulphide.* Applied Microbiology and Biotechnology 74, 708-716, 2007.
7. **Devigny J., Deshusses M., Webster T.:** *Biofiltration for air pollution control.* Lewis Publishers, Boca Raton, New York, Washintong DC, 1-22, 1999.
8. **King G.:** *Responses of atmospheric methane consumption by soils to global climate change.* Global Change Biology 3, 351-362, 1997.
9. **Knauf S., Zimmer H.:** *Biofiltration at a temperature above 40°C: comparison of the biofilter materials bark compost and woodchips.* Staub-Reinhaltung der Luft 54 (2), 41-44, 1994.
10. **Kobylecka D.:** *Właściwości fizyczne i chemiczne podłoża organicznego POKON pod kątem jego wykorzystania w biofiltracji gazu składowiskowego.* Praca magisterska, Politechnika Lubelska, 1-70, 2007.
11. **Lee E. Y., Lee N. Y., Cho K. S., Ryu H. W.:** *Removal of hydrogen sulfide by sulfate-resistant Acidithiobacillus thiooxidans AZ 11.* Journal of Bioscience and Bioengineering Vol. 101, No 4, 309-314, 2006.
12. **Nishimura S., Yoda M.:** *Removal of hydrogen sulfide from an anaerobic biogas using a bio-scrubber.* Water Science Technology Vol. 36, No 6-7, 349-356, 1997.
13. **Oh K. J., Kim D., Lee I.-H.:** *Development of effective hydrogen sulphide removing equipment using Thiobacillus sp.IW.* Environmental Pollution 99, 87-92, 1998.
14. **Potivichayanon S., Pokethitiyook P., Kruatrachue M.:** *Hydrogen sulfide removal by a novel fixed-film bioscrubber system.* Process Biochemistry 41, 708-715, 2006.
15. **Pinnette J. R., Giggey M. D., Marcy G. J., O'Brien M. A.:** *Performance of biofilters at two agitated bin composting facilities.* Proc. 87th Annual Meeting of the Air and Waste Management Association, Ohio, 1994
16. **Strevett K. A., Vieth R. F., Grasso D.:** *Chemo-autotrophic biogas purification for methane enrichment: mechanism and kinetics.* The Chemical Engineering Journal 58, 71-79, 1995.
17. **Truong L. V.-A., Abatzoglou N.:** *A H₂S reactive adsorption process for the purification of biogas prior to its use as a bioenergy vector.* Biomass and Bioenergy 29, 142-151, 2005.
18. **Vincent A., Hobson J.:** *CIWEM monographs on best practice no. 2, p.31,* Chartered Institution of Water and Environmental Management, London, UK, 1998.
19. **Woodcock K. E., Gottlieb M.:** *Natural gas.* Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, 12 Wiley, 377-386, 2004.
20. **Wójcik-Adamczyk M.:** *Ocena właściwości kompostu z ZUSOK pod kątem jego wykorzystania do oczyszczania biogazu składowiskowego.* Praca magisterska, Politechnika Lubelska, 1-74, 2007.
21. **Yang Y., Allen E. R.:** *Biofiltration control of hydrogen sulfide: 1. Design and operational parameters.* Journal of the Air and Waste Management Association 44, 863-868, 1994.

An Influence of Temperature on Microbial Removal of Hydrogen Sulphide from Biogas

Abstract

Hydrogen sulfide (H_2S) is a very toxic and dangerous, especially to living organisms, gas. Its other disadvantages are habitual "rotten egg" odor, a corrosivity to concrete and steel and a possibility to cause an atmosphere pollution with sulfur oxides, which are formed during a combustion of the biogas as a fuel. H_2S removing (desulfurization) is required for reasons of safety, health, corrosion prevention and atmosphere pollution minimalisation. Hydrogen sulfide removal can be conducted via physical, chemical and biological methods. The main disadvantages of physical and chemical processes are high operating costs, chemicals prices and problems with chemical waste disposal. Biological processes seem to be the most attractive methods for H_2S removing from contaminated gases, because of their low required capitals and no significant negative influence on atmosphere. The most popular biological methods of gases purification are biofiltration, bioscrubbing and biotrickling filtration. Biofiltration is a method, which is used especially for odours elimination. There are many factors influencing the biofiltration. One of them is temperature.

The influence of temperature on H_2S biofiltration process was examined in the paper. The examination was carried out in the organic base POKON. The organic base is a popular artificial substrate for plant cultivation, accessible in a trade. POKON was taken to the experiment without special preparing. Gaseous hydrogen sulfide was produced from concentrated liquid H_2SO_4 and sodium sulfide in Kipp's apparatus. The substrate samples (in three repetitions) were incubated within 2 weeks in two temperatures: 6 and 28 °C, before proper experiment was started. A gaseous hydrogen sulfide was introduced to the headspaces using a syringe till the concentration of H_2S reached the values about 48% v/v. The 150 μ l headspace gas samples were then taken from the vials by gas tight syringe through the rubber plugs and analyzed chromatographically (GC Shimadzu 14B). Changes in H_2S concentrations, dependent on time, were the basis for the H_2S removal rate calculation.

Results of a laboratory research on hydrogen sulfide biofiltration using the organic substrate POKON in two temperatures: 6 and 28°C, were presented in the paper. The initial concentration of H_2S was up to 48% v/v. The maximum value of hydrogen sulfide removal rate noticed at the temperature of 28°C was $0.19 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}_{\text{ww}} \text{ min}^{-1}$, while the highest value at the temperature of 6°C was $0.13 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}_{\text{ww}} \text{ min}^{-1}$, and was 30% lower.

