

*Catalytic wet oxidation of sewage sludge*

## Katalityczne utlenianie na mokro osadów ściekowych



DOI: 10.15199/62.2026.4.2

Do mokrego utleniania (WO) trzech rodzajów osadów ściekowych z oczyszczalni jako katalizatory homogeniczne zastosowano roztwory soli  $\text{FeSO}_4$  i  $\text{CuSO}_4$  w temp. 230–310°C. Po 9 min procesu WO stopień usunięcia związków organicznych wyniósł ponad 90%. Stwierdzono, że katalityczny proces WO jest bardzo skuteczny w przetwarzaniu osadów ściekowych.

**Słowa kluczowe:** osady ściekowe, oczyszczanie ścieków, utlenianie na mokro, katalizatory rozpuszczalne

*Sol.  $\text{FeSO}_4$  and  $\text{CuSO}_4$  salts were used as homogeneous catalysts for wet oxidn. (WO) of 3 municipal sewage sludges at 230–310°C. The org. compds. removal was higher than 90% after 9 min long WO. The catalytic WO process was found very efficient for treatment of sewage sludge.*

**Keywords:** ewage sludge, wastewater treatment, wet oxidation, soluble catalysts

Oczyszczanie ścieków komunalnych powoduje powstawanie dużych ilości osadu ściekowego, którego utylizacja stała się poważnym problemem środowiskowym. W ostatnich latach światowa produkcja osadów ściekowych znacznie wzrosła, a prognozuje się, że ta tendencja wzrostowa jeszcze się nasili w nadchodzących dziesięcioleciach<sup>1)</sup>. W związku z ciągłą rozbudową systemów kanalizacyjnych oraz powszechnym wdrażaniem zaawansowanych technologii oczyszczania ścieków przewiduje się, że ilość wytwarzanego osadu będzie nadal rosła. Jednocześnie coraz bardziej rygorystyczne przepisy dotyczące gospodarki odpadami nakładają coraz większe ograniczenia na tradycyjne sposoby utylizacji osadów, w tym stosowanie ich w rolnictwie jako nawozu, składowanie na wysypiskach oraz spalanie. W szczególności: (i) wykorzystanie osadów ściekowych w rolnictwie budzi nadal duże kontrowersje ze względu na potencjalne zagrożenia dla gleby i bezpieczeństwa żywności, (ii) składowanie osadów o dużej zawartości substancji organicznych podlega w ostatnich latach coraz większym ograniczeniom, czemu towarzyszyły spadek dostępnej pojemności składowisk, a także (iii) spalanie budzi poważne obawy dotyczące środowiska, związane głównie z powstawaniem dioksyn, furanów i popiołów lotnych.

W najbliższej przyszłości te tradycyjne strategie zagospodarowania nie będą już wystarczające, by poradzić sobie z nieustannie rosnącą ilością osadu. W związku z tym

*The treatment of municipal wastewater generates large quantities of sewage sludge, whose disposal has become a major environmental issue. In recent years, the global production of sewage sludge has increased substantially, and this upward trend is projected to intensify further in the coming decades<sup>1)</sup>. Driven by the continuous expansion of wastewater collection systems and the widespread implementation of advanced wastewater treatment technologies, sludge production is expected to rise even further. Meanwhile, increasingly stringent waste management regulations have imposed growing restrictions on conventional sludge disposal routes, including agricultural application as fertilizer, landfilling, and incineration. Specifically, (i) agricultural utilization of sewage sludge remains highly controversial due to potential risks to soil and food safety, (ii) landfilling of sludge with high organic content has been increasingly restricted in recent years, accompanied by a continuous decline in available landfill capacity, as well as (iii) incineration raises serious environmental concerns, mainly associated with the formation of dioxins, furans, and fly ash.*

*In the near future, these conventional management strategies will no longer be sufficient to cope with the continuously increasing sludge volumes. Consequently, increasing attention has been directed toward the development of sustainable alternative technologies, such as energy recovery via anaerobic digestion or gasification, and oxidative treatment for volume reduction and stabilization<sup>2)</sup>.*

*One promising alternative that has attracted growing research interest is wet oxidation (WO), which involves the oxidation of organic contaminants in aqueous media by using molecular oxygen at elevated temperatures (150–330°C) and under high pressures (3–25 MPa)<sup>3–5)</sup>.*

\* Address for correspondence / Adres do korespondencji:

Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu 730070, China;  
e-mail: yangsegg@163.com

coraz większą uwagę poświęca się opracowywaniu zrównoważonych technologii alternatywnych, takich jak odzysk energii poprzez fermentację beztlenową lub zgazowanie oraz obróbka utleniająca służąca zmniejszeniu objętości i stabilizacji<sup>2)</sup>.

Jedną z obiecujących metod, która cieszy się coraz większym zainteresowaniem naukowców, jest utlenianie na mokro WO (*wet oxidation*), polegające na utlenianiu zanieczyszczeń organicznych w środowisku wodnym przy użyciu tlenu cząsteczkowego w podwyższonych temperaturach (150–330°C) i pod wysokim ciśnieniem (3–25 MPa)<sup>3–5)</sup>. Katalityczne utlenianie na mokro CWO (*catalytic wet oxidation*) pozwala na skuteczne usuwanie związków organicznych poprzez utlenianie zanieczyszczeń w fazie ciekłej do ditlenku węgla i wody, z wykorzystaniem tlenu lub powietrza w obecności katalizatora. Zastosowanie katalizatora pozwala zmniejszyć wymagania dotyczące warunków pracy, przyspieszyć przebieg reakcji oraz skrócić czas jej trwania<sup>6)</sup>. W ciągu ostatnich 3 dekad wiele uwagi poświęcono badaniom nad CWO oraz opracowywaniu odpowiednich katalizatorów<sup>7–13)</sup>.

Rozpuszczalne sole metali przejściowych, a zwłaszcza siarczany miedzi, są powszechnie uznawane za skuteczne katalizatory w procesie mokrego utleniania powietrzem zarówno modelowych związków organicznych, jak i rzeczywistych ścieków<sup>14–17)</sup>. Niemniej jednak zastosowanie takich soli metali w przetwarzaniu osadów ściekowych nie zostało jeszcze wystarczająco zbadane. Głównym celem przeprowadzonych badań była zatem ocena wpływu siarczany miedzi oraz innych soli metali przejściowych na utlenianie na mokro osadu ściekowego w systemach reakcji wsadowych. Ze względu na potencjalne ryzyko zanieczyszczenia metalami ciężkimi związane ze stosowaniem katalizatorów na bazie miedzi, w celach porównawczych zbadano również sole żelaza i inne alternatywne katalizatory metaliczne.

## Część doświadczalna

### Materiały

Większość doświadczeń przeprowadzono, stosując osad ściekowy pochodzący z zakładu przemysłowego zajmującego się oczyszczaniem ścieków zawierających węglowodory, rozpuszczalniki organiczne, farby i zanieczyszczenia olejowe. Zebrany osad ściekowy zawierał suchą masę w ilości 22,8% mas. Po zebraniu osadu poddano go wirowaniu, usunięto supernatant, a uzyskany osad o konsystencji pasty podzielono na jednorodne porcje o masie ok. 15 g i zamrożono. Przed każdym eksperymentem zamrożony osad rozmrażano i zawieszano w 200 mL wody w celu jego odtworzenia. Przetestowano również 3 komunalne osady ściekowe o różnych zawartościach substancji lotnych. Sole metali  $\text{CuSO}_4$  (bezwodny siarczan miedzi(II)) i  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  (heptahydrat siarczany żelaza(II)) zostały zakupione w Szanghaju.

*Catalytic wet oxidation (CWO) results in efficient organic removal by oxidizing pollutants into carbon dioxide and water in the liquid phase, using oxygen or air in the presence of a catalyst. The introduction of a catalyst lowers the required operating conditions, accelerates the reaction rate, and shortens the reaction duration<sup>6)</sup>. Considerable research efforts have been devoted to CWO and the development of corresponding catalysts over the past three decades<sup>7–13)</sup>.*

*Soluble transition metal salts, especially copper sulfate, are widely recognized as effective catalysts in the wet air oxidation of both model organic compounds and real wastewaters<sup>14–17)</sup>. Nevertheless, the application of such metal salts for the treatment of sewage sludge remains insufficiently investigated. The primary objective of the present study was therefore to evaluate the effects of copper sulfate and other transition metal salts on the wet oxidation of sewage sludge in batch reaction systems. Given the potential heavy metal pollution risks associated with copper-based catalysts, iron salts and other alternative metallic catalysts were also explored for comparative purposes.*

## Experimental

### Materials

*Most experiments were performed on a secondary sewage sludge obtained from an industrial plant treating effluents containing hydrocarbons, organic solvents, paintings and oily pollutants. The collected sewage sludge contained dry solids (22.8% by mass). After collection, the received sludge was centrifuged, the supernatant was eliminated and the received pasty sludge was divided into ca. 15 g homogeneous aliquots and frozen. Before any experiment, the pasty sludge was unfrozen and suspended in 200 mL water to reconstitute the sludge. Three municipal sludges, containing different volatile solid concentrations, were also tested. The metallic salts  $\text{CuSO}_4$  (copper(II) sulfate anhydrous) and  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  (iron(II) sulfate heptahydrate) were purchased from Shanghai.*

### CWO Experiments

*CWO of the sewage sludge was carried out in a 0.6 L batch autoclave (Fig. 1). After loading the industrial sludge suspension (total organic carbon,  $\text{TOC}_0$  3000–6000 mg/L) and the catalyst ( $\text{CuSO}_4$  or/and  $\text{FeSO}_4$ , 50–200 mg/L), the reactor was closed, purged using Ar and heated to the reaction temperature. The introduction of air was considered as time zero for the reaction. Experiments were performed under changing the reaction temperature and/or the air pressure.*

### Analytical methods

*After reaction, the whole suspension was recovered from the reactor and the TOC content of the supernatant and the solid, recovered after filtration, were measured using a Shimadzu 5050A TOC analyzer equipped with the solid*

## Doświadczenia CWO

Proces CWO osadu ściekowego prowadzono w autoklawie wsadowym o pojemności 0,6 L (rys. 1). Po wprowadzeniu zawiesiny osadu przemysłowego (całkowity węgiel organiczny, TOC 3000–6000 mg/L) oraz katalizatora ( $\text{CuSO}_4$  lub/i  $\text{FeSO}_4$ , 50–200 mg/L) reaktor zamknięto, przepłukano argonem i ogrzano do temperatury reakcji. Za moment zerowy reakcji przyjęto moment wprowadzenia powietrza. Doświadczenia prowadzono przy zmiennej temperaturze reakcji i/lub zmiennym ciśnieniu powietrza.

## Metody analityczne

Po zakończeniu reakcji całą zawiesinę pobrano z reaktora, a zawartość TOC w supernatancie oraz w fazie stałej, odzyskanej po filtracji, zmierzono za pomocą analizatora TOC Shimadzu 5050A wyposażonego w moduł SSM5000 do pomiarów w fazie stałej. Następnie obliczono całkowity współczynnik konwersji TOC. Nadmiar nadtlenu wodoru HE, zdefiniowano za pomocą równania (1):

$$\text{HE} = \text{H}_2\text{O}_2, \text{ nadmiar} = \frac{(\text{H}_2\text{O}_2)_{\text{rzecz.}} - (\text{H}_2\text{O}_2)_{\text{stechiom.}}}{(\text{H}_2\text{O}_2)_{\text{rzecz.}}} \quad (1)$$

## Wyniki badań i ich omówienie

### Wpływ temperatury

W procesie WO związków organicznych temperatura reakcji była istotnym parametrem wpływającym na usuwanie zanieczyszczeń. Ogólnie, im wyższa była temperatura robocza, tym większa była skuteczność usuwania zanieczyszczeń i szybkość reakcji. Wpływ temperatury na usuwanie TOC podczas procesu WO badano w temp. 230, 250, 270, 290 i 310°C. Wyniki przedstawiono na rys. 2. Zgodnie z oczekiwaniami wzrost temperatury spowodował zwiększenie stopnia usuwania TOC. W temp. 310°C stopień usunięcia TOC wyniósł 89% po 1 min i 98,7% po 9 min procesu.

### Wpływ czasu przebywania

Doświadczenia dotyczące przetwarzania osadu przeprowadzono w temp. 230–310°C, a całkowity czas trwania reakcji wyniósł 9 min. Skuteczność usuwania TOC podczas bezkatalitycznego WO osadu ściekowego w różnych temperaturach przedstawiono na rys. 2. Czas przebywania miał znaczący wpływ na wydajność przetwarzania osadu.

W ramach każdego zestawu doświadczeń izotermicznych usuwanie TOC gwałtownie wzrastało w ciągu pierwszej minuty reakcji, po czym tempo usuwania stopniowo spadało. Takie zachowanie można przypisać dwóm głównym czynnikom. Po pierwsze, szybkość reakcji zależała nie tylko od temperatury, ale także od stężenia reagentów, przy czym stężenie substancji organicznych w osadzie ściekowym stale spadało w miarę postępu reakcji, co powodowało

SSM5000 module. The overall TOC conversion was then calculated. HE is defined as equation (1):

$$\text{HE} = \text{H}_2\text{O}_2, \text{ nadmiar} = \frac{(\text{H}_2\text{O}_2)_{\text{rzecz.}} - (\text{H}_2\text{O}_2)_{\text{stechiom.}}}{(\text{H}_2\text{O}_2)_{\text{rzecz.}}} \quad (1)$$

where HE means hydrogen peroxide excess.

## Results and discussion

### Effect of temperature

In the WO of organic compounds, the reaction temperature was an important parameter affecting the removal of pollutants. Generally, the higher operating temperature was, the higher pollutant removal and the reaction rate were obtained. The effect of temperature on TOC removal during WO was investigated at 230, 250, 270, 290 and 310°C. The results are shown in Fig. 2. As it was expected, rising temperature increased the TOC removal. At 310°C, the TOC removal reached 89 and 98.7% after 1 and 9 min, respectively.

### Effect of residence time

Sludge conversion experiments were conducted at temperatures ranging from 230 to 310°C with a total reaction duration of 9 min. The TOC removal efficiency during non-catalytic wet oxidation (WO) of sewage sludge across different temperatures was presented in Fig. 2. The residence time exerted a significant influence on sludge conversion efficiency.

Within each isothermal experimental set, TOC removal increased rapidly during the initial 1 min of the reaction, followed by a gradual deceleration in the rate of removal. This behavior could be attributed to 2 key factors. First,

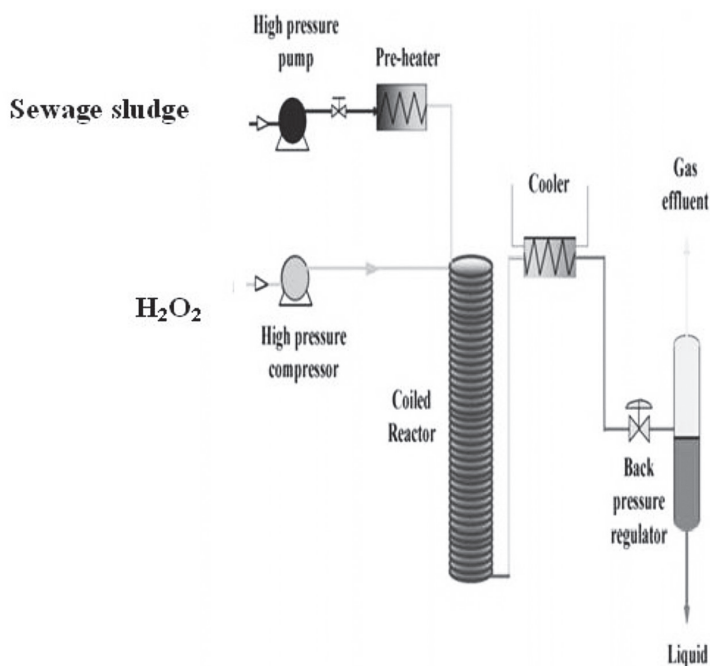


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental setup

Rys. 1. Schemat aparatury badawczej

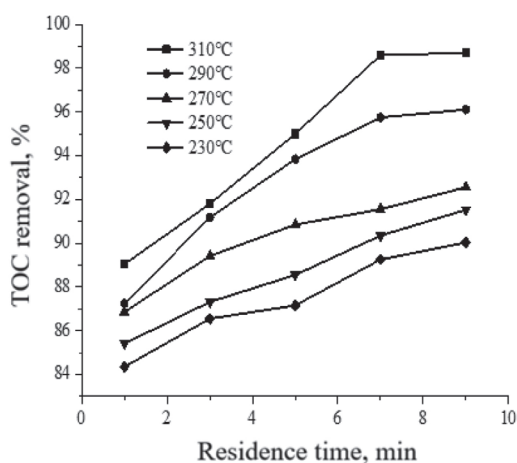


Fig. 2. Effect of temperature on WO of sewage sludge; residence time 1 to 9 min, HE 0.8, initial TOC 3000 mg/L

Rys. 2. Wpływ temperatury na skuteczność WO osadu ściekowego; czas przebywania 1–9 min, HE 0,8, początkowe TOC 3000 mg/L

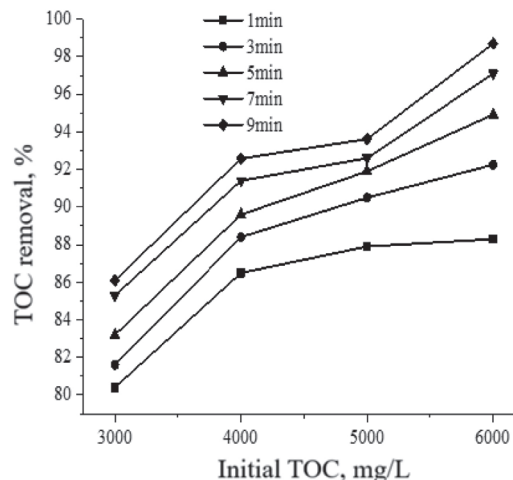


Fig. 3. Effect of initial TOC on WO of sewage sludge

Rys. 3. Wpływ początkowego stężenia TOC na skuteczność WO osadu ściekowego

spowolnienie szybkości reakcji. Po drugie, powstawanie trudno rozkładalnych związków pośrednich dodatkowo przyczyniało się do zaobserwowanego spowolnienia kinetyki reakcji.

### Wpływ początkowego stężenia TOC

Zbadano wpływ początkowego stężenia TOC na WO osadu ściekowego w temp. 310°C, przy współczynniku HE wynoszącym 0,8 i czasach przebywania w zakresie 1–9 min. Wyniki przedstawiono na rys. 3. Wstępne stężenie TOC miało znaczący wpływ na skuteczność usuwania TOC. Wzrost początkowego stężenia TOC z 3000 do 5000 mg/L spowodował wyraźną poprawę skuteczności usuwania TOC. Jednak gdy stężenie to przekroczyło 5000 mg/L, poprawa w zakresie usuwania TOC stopniowo ulegała zmniejszeniu. Na przykład przy czasie przebywania wynoszącym 9 min stopień usuwania TOC wzrósł jedynie z 97,1% do 98,7%, podczas gdy początkowe stężenie TOC wzrosło z 5000 do 6000 mg/L.

### Wpływ HE

Przeprowadzono serię doświadczeń w celu określenia wpływu HE na WO osadu ściekowego przy danym stężeniu TOC. Wyniki doświadczenia pokazane są na rys. 4. Wydajność usuwania całkowitego węgla organicznego rosła wraz ze wzrostem wartości HE, a przy HE = 0,8 usunięto 98,7% TOC.

### Wpływ katalizatora

W trakcie WO osadu ściekowego osiągnięto znaczny stopień usunięcia całkowitego węgla organicznego (rys. 5). W szczególności skuteczność usuwania TOC wzrastała wraz ze wzrostem stężenia zarówno katalizatora w postaci siarczynu żelaza ( $\text{FeSO}_4$ ), jak i siarczynu miedzi

the reaction rate was dependent not only on temperature but also on reactant concentration, with the concentration of organic matter in sewage sludge continuously declining as the reaction proceeds, thereby reducing the reaction rate. Second, the formation of recalcitrant intermediate compounds further contributes to the observed decrease in reaction kinetics.

### Effect of initial TOC

The effect of initial TOC concentration on the wet oxidation (WO) of sewage sludge was investigated at 310 °C, with an HE value of 0.8 and residence times ranging from 1 to 9 min. The corresponding results were presented in Fig. 3. The initial TOC concentration exerted a notable effect on TOC removal efficiency. An increase in initial TOC from 3000 to 5000 mg/L led to a pronounced enhancement in TOC removal. However, when the initial TOC concentration exceeded 5000 mg/L, the improvement in TOC removal became gradually less significant. For instance, at a residence time of 9 min, TOC removal increased only from 97.1% to 98.7% as the initial TOC rose from 5000 to 6000 mg/L.

### Effect of HE

A series of experiments were conducted to determine the effect of HE on WO of sewage sludge at given TOC concentration. The experimental results were presented in Fig. 4. The TOC removal increased with increasing HE and 98.7% of TOC was removed when HE was 0.8.

### Effect of catalyst

A significant total organic carbon (TOC) removal was achieved during the wet oxidation (WO) of sewage sludge (Fig. 5). Specifically, TOC removal efficiency increased with the increasing concentration of both ferrous sulfate

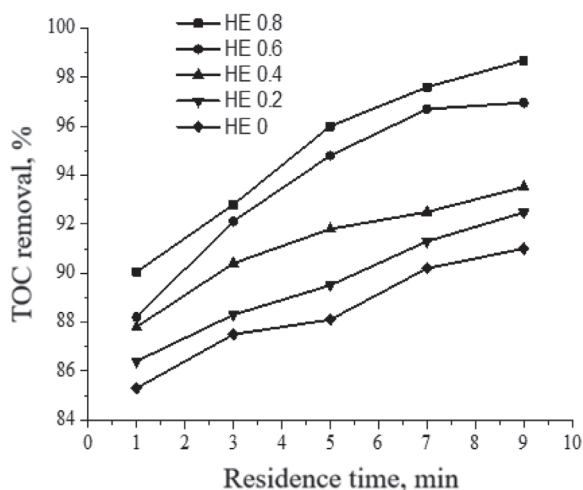


Fig. 4. Effect of HE on WO of sewage sludge

Rys. 4. Wpływ HE na skuteczność WO osadu ściekowego

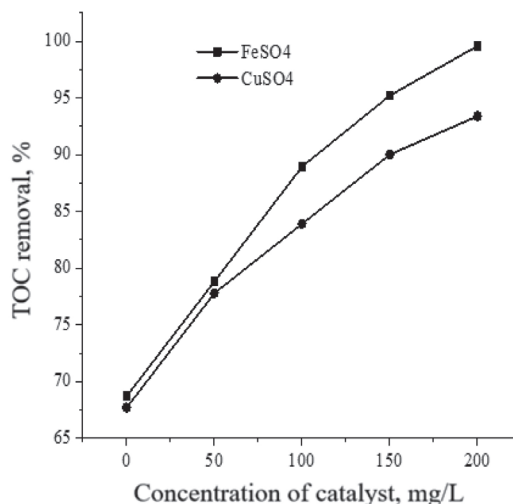


Fig. 5. Effect of catalyst on WO of sewage sludge

Rys. 5. Wpływ katalizatora na skuteczność WO osadu ściekowego

(CuSO<sub>4</sub>), co wskazuje na pozytywny wpływ rozpuszczalnych soli metali przejściowych na proces utleniania.

W warunkach doświadczalnych maksymalna skuteczność usuwania TOC osiągnęła 98,6% w ciągu 9 min przy zastosowaniu CuSO<sub>4</sub> jako katalizatora, co stanowiło wyraźny kontrast w stosunku do zaledwie 68,7% w układzie bez katalizatora (bez dodatku CuSO<sub>4</sub>). Podobnie, dodanie FeSO<sub>4</sub> pozwoliło osiągnąć maksymalną skuteczność usuwania TOC wynoszącą 93,4% w ciągu 9 min, w porównaniu z 68,7% odnotowanym w przypadku braku FeSO<sub>4</sub>.

Stwierdzono, że zarówno FeSO<sub>4</sub>, jak i CuSO<sub>4</sub> są skutecznymi katalizatorami homogenicznymi, zdolnymi do bezpośredniego przyspieszania utleniania znacznej części TOC w osadach ściekowych, a tym samym do znacznego zwiększenia ogólnej wydajności procesu WO.

Zjawisko to można przypisać kilku czynnikom. Po pierwsze, wysoka aktywność katalityczna FeSO<sub>4</sub> i CuSO<sub>4</sub> może sprzyjać reakcji z tlenem, poprawiając w ten sposób wydajność jego wykorzystania. Po drugie, zwiększenie dawki katalizatora przyspieszyło powstawanie rodników hydroksylowych, co z kolei sprzyjało reakcji między rodnikami hydroksylowymi a produktami pośrednimi powstającymi podczas rozkładu osadu ściekowego.

## Wnioski

Stwierdzono, że CWO jest skuteczną metodą oczyszczania osadów ściekowych o wysokim stężeniu. Wyniki wykazały, że dzięki procesowi CWO można osiągnąć ponad 90-proc. zmniejszenie zawartości TOC w osadach ściekowych. Katalizatory homogeniczne zawierające FeSO<sub>4</sub> i CuSO<sub>4</sub> wykazały doskonałą skuteczność w przetwarzaniu osadów ściekowych. Technologia CWO stanowi zatem wysoce skuteczne rozwiązanie w zakresie usuwania zanieczyszczeń organicznych z osadów ściekowych.

(FeSO<sub>4</sub>) and copper sulfate (CuSO<sub>4</sub>) catalysts, indicating the positive catalytic effect of the soluble transition metal salts on the oxidation process.

Under the experimental conditions, the maximum TOC removal efficiency reached 98.6% within 9 min when CuSO<sub>4</sub> was used as the catalyst, in sharp contrast to only 68.7% in the non-catalytic system (without CuSO<sub>4</sub> addition). Similarly, the addition of FeSO<sub>4</sub> resulted in a maximum TOC removal efficiency of 93.4% over 9 min, compared to the same 68.7% observed in the absence of FeSO<sub>4</sub>.

Both FeSO<sub>4</sub> and CuSO<sub>4</sub> were found effective homogeneous catalysts, capable of directly promoting the oxidation of a substantial fraction of TOC in sewage sludge and thereby significantly enhancing the overall degradation efficiency of the WO process.

This phenomenon might be attributed to several factors. First, the high catalytic activity of FeSO<sub>4</sub> and CuSO<sub>4</sub> could facilitate the reaction of O<sub>2</sub>, thereby improving its utilization efficiency. Second, increasing the catalyst dosage accelerated the generation of hydroxyl radicals, which in turn promoted the reaction between hydroxyl radicals and the intermediates produced during sewage sludge degradation.

## Conclusion

The catalytic wet oxidation (CWO) was found as an effective method for purification of highly concentrated sewage sludge. The results demonstrated that more than 90% of TOC removal from sewage sludge could be achieved via the CWO process. Homogeneous catalysts including FeSO<sub>4</sub> and CuSO<sub>4</sub> exhibited excellent performance for the treatment of sewage sludge. The CWO represents hence a highly efficient approach for the removal of organic contaminants from sewage sludge.

## Podziękowania

Praca została przeprowadzona dzięki wsparciu Narodowej Fundacji Nauk Przyrodniczych Chin w projekcie „Badania nad rzemiosłem budowlanym w tradycyjnej architekturze na tybetańskich terenach Amdo” (nr 51668030).

## Acknowledgements

This study was supported by National Natural Science Foundation of China: The research on the wooden Construction crafts of traditional architectures in Amdo Tibetan areas (51668030).

Received/Otrzymano: 05-03-2026

Accepted/Zaakceptowano: 09-04-2026

Reviewed/Zrecenzowano: 03-04-2026

Published/Opublikowano: 27-04-2026

## REFERENCES/LITERATURA

- [1] A. Pathak, M.G. Dastidar, T.R. Sreerishnan, *J. Environ. Manage.* 2009, **90**, No. 8, 2343.
- [2] D. Fytili, A. Zabaniotou, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2008, **12**, No. 1, 116.
- [3] M. Bernardi, D. Cretenot, S. Deleris, C. Descorme, J. Chauzy, M. Besson, *Catal. Today* 2010, **157**, No. 1–4, 420.
- [4] T. Lendormi, C. Prevot, F. Doppenberg, J.N. Foussard, H. Debellefontaine, *Water Sci. Technol.* 2001, **44**, No. 5, 161.
- [5] F. Luck, *Catal. Today* 1999, **53**, No. 1, 81.
- [6] J. Levec, A. Pintar, *Catal. Today* 2007, **124**, No. 3–4, 172.
- [7] F. Larachi, *Topics Catal.* 2005, **33**, No. 1–4, 109.
- [8] Y. Kojima, T. Fukuta, T. Yamada, M.S. Onyango, E.C. Bernardo, H. Matsuda, K. Yagishita, *Water Res.* 2005, **39**, No. 1, 29.
- [9] A. Cybulski, *Ind. Eng. Chem. Res.* 2007, **46**, No. 12, 4007.
- [10] E. Castillejos-López, A. Maroto-Valiente, D.M. Nevskaja, V. Muñoz, I. Rodríguez-Ramos, A. Guerrero-Ruiz, *Catal. Today* 2009, **143**, No. 3–4, 355.
- [11] S. Collado, A. Laca, M. Díaz, *J. Hazard. Mater.* 2010, **177**, No. 1–3, 183.
- [12] A. Pintar, J. Batista, T. Tišler, *Appl. Catal. B: Environ.* 2008, **84**, No. 1–2, 30.
- [13] J. Gaálóvá, J. Barbier Jr., S. Rossignol, *J. Hazard. Mater.* 2010, **181**, No. 1–3, 633.
- [14] K.H. Kim, S.K. Ihm, *J. Hazard. Mater.* 2011, **186**, No. 1, 16.
- [15] G.W. Wang, D. Wang, X.C. Xu, L.F. Liu, F.L. Yang, *J. Hazard. Mater.* 2012, **217**, 366.
- [16] G.L. Jing, M.M. Luan, C.J. Han, T.T. Chen, H.Y. Wang, *J. Ind. Eng. Chem.* 2012, **18**, No. 4, 1446.
- [17] S.X. Yang, Z.Q. Liu, X.H. Huang, B.P. Zhang, *J. Hazard. Mater.* 2010, **178**, No. 1–3, 786.

WYDAWNICTWO SIGMA-NOT



160 lat czasopisma

# PRZEGLĄD TECHNICZNY

Od początku istnienia *Przeгляд Techniczny* poruszał problemy odpowiedzialności inżynierskiej, środowiskowe i społeczne skutki wdrażania rozwiązań technicznych i tak jest do dnia dzisiejszego.

