

*Innovative application of big data models in sludge treatment***Innowacyjne zastosowanie modeli *big data* w oczyszczaniu osadów ściekowych**

DOI: 10.15199/62.2025.4.2

Wykorzystanie modelu technologicznego *big data* w celu usprawnienia procesu oczyszczania osadów komunalnych zaowocowało zwiększeniem jego wydajności operacyjnej, zmniejszeniem zużycia energii i śladu ekologicznego oraz spełnieniem współczesnych wymagań. Proces został zoptymalizowany, a wskaźnik oczyszczania osadu znacznie wzrósł z 57,5% do 99%. Optymalna temperatura reakcji wynosiła 70°C, dawka utleniacza 300 mg, stężenie katalizatora 300 mg/L, a czas reakcji 2 h.

Słowa kluczowe: Chiny, oczyszczanie osadów, planowanie systemu, technologia *big data*

Use of a big data technol. model for improving the process for municipal sludge treatment resulted in increasing its operational efficiency, reducing the energy consumption and ecolog. footprint, and meeting the contemporary requirements. The process was optimized and the sludge treatment rate was significantly increased from 57.5% to 99%. The optimal reaction temp. was 70°C, oxidant dosage 300 mg, catalyst concn. 300 mg/L and reaction time 2 h.

Keywords: China, sludge treatment, system planning, big data technology

Oczyszczalnia osadów ściekowych jest niezbędnym elementem infrastruktury miejskiej. Obecnie oczyszczanie osadów ściekowych w większości miast w Chinach opiera się na mikrobiologicznej biodegradacji materii organicznej zawartej w osadach. W ten sposób zanieczyszczenia stają się źródłem energii.

Wraz z ciągłym ulepszaniem miejskich systemów odprowadzania ścieków oraz budową i eksploatacją oczyszczalni ścieków w Chinach, produkcja osadów komunalnych gwałtownie wzrosła. W ciągu ostatnich kilku dziesięcioleci chiński rząd wdrożył rygorystyczne i skuteczne zarządzanie oczyszczaniem ścieków i osiągnął znaczące sukcesy. W procesie oczyszczania ścieków niektóre zanieczyszczenia zawarte w ściekach są przekształcane w osady komunalne. Ze względu na dużą ilość osadów komunalnych generowanych w historycznych obszarach Chin, wydajne przetwarzanie i usuwanie osadów komunalnych są nadal uważane za ważny punkt przełomowy w poprawie wydajności oczyszczania ścieków¹⁾. Wraz z rozwojem chińskiej gospodarki społecznej i urbanizacji, wydajność i głębokość oczyszczania ścieków miejskich była stale poprawiana, a ilość wytwarzanych osadów wzrastała. Ponad 80% z nich nie zostało odpowiednio przetworzonych^{2, 3)}. Osad zawiera dużą ilość wody, trud-

Sludge treatment is an indispensable element of the urban infrastructure. At present, the sludge treatment in most cities in China is based on microbial biodegradation of sludge-contained organic matter. This way, the pollutants become an energy source.

With the continuous improvement of urban sewage collection systems and the construction and operation of sewage treatment facilities in China, the production of municipal sludge has increased sharply. In the past few decades, the Chinese government has implemented strict and effective management in sewage treatment and achieved significant successes. In the process of sewage treatment, some pollutants in the sewage were converted into urban sludge. Due to the large amount of urban sludge generated in China historical areas, the efficient treatment and disposal of urban sludge is still considered an important breakthrough point in improving sewage treatment efficiency¹⁾. With the development of China's social economy and urbanization, the efficiency and depth of urban sewage treatment was continuously improved, and the amount of sludge generated increased. More than 80% of it has not been properly treated^{2, 3)}. The sludge contains a large amount of water, recalcitrant organic matter, heavy metals, and pathogenic microorganisms⁴⁾. The discharge of large amount of untreated sludge results in new and secondary pollution of the environment. The harmless treatment of sludge and solve the pollution problems is currently an important challenge for sewage treatment plants in China.

* Address for correspondence/Adres do korespondencji:

Heilongjiang Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang Province, 150050;
e-mail: liuyongxian2005@hotmail.com

no poddającą się konwersji materię organiczną, metale ciężkie i mikroorganizmy patogenne⁴⁾. Zrzut dużej ilości nieprzetworzonego osadu powoduje wtórne zanieczyszczenie środowiska. Nieszkodliwe przetwarzanie osadów ściekowych i rozwiązywanie problemów związanych z zanieczyszczeniem jest obecnie ważnym wyzwaniem dla oczyszczalni ścieków w Chinach.

Obecnie główne technologie przetwarzania osadów ściekowych w kraju i za granicą obejmują fermentację beztlenową, fermentację tlenową i spalanie na sucho. Fermentacja beztlenowa stopniowo przyciągała uwagę naukowców ze względu na małe zużycie energii, sterylizację i dezynfekcję oraz możliwość recyklingu biomasy z osadów ściekowych, i stała się główną technologią wykorzystania istniejących osadów ściekowych⁵⁾. Materia organiczna w osadach składa się głównie z materiału komórkowego mikroorganizmów, który może być z trudem przetwarzany przez mikroorganizmy z powodu bariery ścian komórkowych. Etap hydrolizy stał się głównym etapem ograniczającym w beztlenowej fermentacji osadów, co wydłuża czas retencji osadu⁶⁻⁹⁾. Aby poprawić szybkość fermentacji beztlenowej, należy zastosować odpowiednią obróbkę wstępną w celu zniszczenia ścian komórkowej drobnoustrojów i umożliwienia wypływu substancji wewnątrzkomórkowych, zwiększając w ten sposób dostępność materii organicznej dla drobnoustrojów¹⁰⁻¹⁶⁾.

Wraz z przyspieszeniem urbanizacji i industrializacji, oczyszczanie osadów ściekowych stało się jednym z ważnych wyzwań stojących przed dzisiejszym społeczeństwem. Chociaż tradycyjne metody oczyszczania osadów mogą skutecznie usuwać zanieczyszczenia, często wymagają dużej ilości energii i środków chemicznych, a proces oczyszczania generuje odpady wtórne, które mają negatywny wpływ na środowisko. Dlatego też znalezienie bardziej przyjaznych dla środowiska i wydajnych metod przetwarzania osadów stało się pilnym zadaniem. W tym kontekście zastosowanie technologii *big data* przyniosło nowe nadzieje w zakresie przetwarzania osadów ściekowych, ponieważ technologia ta może analizować i przetwarzać duże ilości danych w celu optymalizacji i kontroli procesów technologicznych.

Część badawcza

Procedura badawcza

W badaniu wykorzystano metodę oczyszczania osadów opartą na technologii *big data*. Metoda ta składała się z 3 etapów: (i) zbieranie w czasie rzeczywistym danych o jakości wody z punktów oczyszczania ścieków, (ii) przesyłanie zebranych danych o jakości wody do platformy *big data* oraz (iii) przetwarzanie, analizowanie i wydobywanie zebranych danych, w tym modelowanie czyszczenia danych, w celu monitorowania, przewidywania i optymalizacji różnych wskaźników procesu oczyszczania osadów. W przypadku przekroczenia normy wydawane były

At present, the main sludge treatment technologies at home and abroad include anaerobic digestion, aerobic fermentation, and dry incineration. Among them, anaerobic digestion has gradually attracted widespread attention from scholars due to its low energy consumption, sterilization and disinfection, and recyclable sludge biomass energy, and has become the main technology for the resource utilization of existing sludge⁵⁾. The organic matter in sludge consists mainly in cellular material of microorganisms, which can be hardly processed by microorganisms under the wrapping of cell walls. The hydrolysis stage has become the main limiting step in anaerobic digestion of sludge resulting in such problems as prolonged sludge retention time⁶⁻⁹⁾. To improve the rate of anaerobic digestion, a suitable pretreatment has to be adopted to destroy the microbial cell wall, and to allow the intracellular substances to flow out, thereby enhancing the microbial availability of organic matter¹⁰⁻¹⁶⁾.

With acceleration of urbanization and industrialization, the sludge treatment has become one of the important challenges facing today's society. Although traditional sludge treatment methods can effectively remove pollutants, they often require a large amount of energy and chemical agents, and the treatment process generates secondary waste, which has a negative impact on the environment. Therefore, finding more environmentally friendly and efficient sludge treatment methods has become an urgent task. In this context, the application of big data technology has brought new hope for sludge treatment as the big data technology can analyze and process large amounts of data to optimize and control the technological processes.

Research

Research procedure

A sludge treatment method based on big data technology was used in the study. The method comprised 3 steps: (i) real time collection of water quality data from sewage treatment points, (ii) transferring the collected water quality data to the big data platform, (iii) processing, analyzing, and mining the collected data, including data cleaning modeling, to monitor, predict, and optimize the various indicators in the sludge treatment process. If it exceeded the standard, the warning notifications were issued, to determine the parameter in the water quality data which exceeded the standard.

Four parameters were chosen for the analysis: reaction temperature (A), concentration of catalyst (B), oxidant dosage (C) and reaction time (D). L_9 (3^4) orthogonal array was shown in Table.

Through the range analysis, it was concluded that the primacy sequence was reaction temperature, oxidant dosage, concentration of catalyst and reaction time.

The k of each factor was compared in order to determine its level. For A (reaction temperature), $k_3 > k_2 > k_1$, A_3 was chosen. For B (concentration of catalyst), $k_3 > k_2 > k_1$, B_3 was chosen. For C, $k_3 > k_2 > k_1$, C_3 was chosen. For D, $k_2 > k_1$

powiadomienia ostrzegawcze w celu określenia parametru w danych dotyczących jakości wody, który przekroczył normę.

Do analizy wybrano cztery parametry: temperaturę reakcji (A), stężenie katalizatora (B), dawkę utleniacza (C) i czas reakcji (D). Zastosowano ortogonalną matrycę $L_9(3^4)$ przedstawioną w tabeli.

W ramach analizy zakresu badań stwierdzono, że do nadrzędnej sekwencji czynników należała temperatura reakcji, dawka utleniacza, stężenie katalizatora i czas reakcji.

Wartości k każdego z czynników zostały porównane w celu określenia ich poziomu. Dla A (temperatura reakcji), $k_3 > k_2 > k_1$, wybrano A_3 . Dla B (stężenie katalizatora), $k_3 > k_2 > k_1$, wybrano B_3 . Dla C, $k_3 > k_2 > k_1$, wybrano C_3 . Dla D, $k_2 > k_1 > k_3$, wybrano D_2 . Optymalnym parametrem technologicznym do oczyszczania osadu okazała się sekwencja $A_3B_3C_3D_2$, czyli temperatura reakcji 70°C , dawka utleniacza 300 mg, stężenie katalizatora 300 mg/L i czas reakcji 2 h.

Wyniki badań i ich omówienie

Aby lepiej przeanalizować efekty, opracowano model analizy powierzchni odpowiedzi z 3 czynnikami i 3 poziomami. Równanie modelu regresji między każdym czynnikiem a wartością odpowiedzi zostało opisane wzorem (1).

$$R = 254,41176 + 15,875A - 10,375B + 3C - 14,75AB + 11AC - 0,0002BC - 5,625A27,375B2 - 9,375C2 \quad (1)$$

Wartość P modelu wynosiła 0,0148, a zatem model regresji ustalony tą metodą był znaczący. Współczynnik determinacji ustalonego modelu regresji wyniósł 0,733, co wskazuje, że za pomocą tego modelu można przewidzieć wpływ różnych elementów testu na jego dokładność. Wpływ każdego czynnika na wartość odpowiedzi został oceniony za pomocą wartości F w analizie wariancji. Im większa była wartość F , tym bardziej znaczący był wpływ na wartość odpowiedzi.

Wnioski

Zbadano system oczyszczania osadów oparty na technologii *big data*. Zaproponowana technologia *big data* okazała się mieć duże zalety, ze znacznie poprawioną szybkością reakcji i wskaźnikiem dokładności przekraczającym 99%. Wykorzystanie modeli *big data* zapewniło ważne wsparcie dla oczyszczalni ścieków, pomagając im ocenić miejskie warunki ekologiczne i jakość środowiska przy użyciu zaawansowanej technologii *big data*. Przyjmując naukową technologię przetwarzania osadów ściekowych, oczyszczalnie ścieków mogą poprawić swoją wydajność operacyjną, zmniejszyć ślad ekologiczny i skutecznie sprostać współczesnym wyzwaniom.

$> k_3$, D_2 was chosen. The optimal technological parameter for sludge treatment is $A_3B_3C_3D_2$, namely reaction temperature 70°C , oxidant dosage 300 mg, concentration of catalyst 300 mg/L and reaction time 2 h.

Results and discussion

In order to better analyze the effects, a response surface analysis model with 3 factors and 3 levels was established. The regression model equation between each factor and response value was described by the formula (1).

$$R = 254.41176 + 15.875A - 10.375B + 3C - 14.75AB + 11AC - 0.0002BC - 5.625A^2 - 7.375B^2 - 9.375C^2 \quad (1)$$

The P value of the model was 0.0148, hence the regression model established by this method was significant. The determination coefficient of the established regression model was 0.733, what indicated that the influences of different test locations on test accuracy could be predicted by this model. The influence of each factor on the response value was evaluated by the F value in the variance analysis. The larger was the F value, the more significant was the influence on the response value.

Conclusions

A sludge treatment system based on big data technology was studied. The big data technology proposed proved to have big advantages, with significantly improved response speed and an accuracy rate exceeding 99%. The use of big data models has provided important support for sludge treatment plants, helping them evaluate urban ecological conditions and environmental quality using advanced big data technology. By adopting scientific sludge treatment technology, sewage treatment plants can improve their

Table. $L_9(3^4)$ orthogonal experiment table and results

Tabela. Matryca i wyniki eksperymentu ortogonalnego $L_9(3^4)$

Number/L.p.	A, °C	B, mg/L	C, mg	D, h	COD removal/ Zmniejszenie ChZT, %
1	30	100	100	1	57.5
2	30	200	200	2	63.5
3	30	300	300	3	71.5
4	50	100	200	3	68.5
5	50	200	300	1	95.0
6	50	300	100	2	92.5
7	70	100	300	2	99.0
8	70	200	100	3	86.5
9	70	300	200	1	97.5
k_1	192.5	225	218.5	250	
k_2	256	247	229.5	255	
k_3	285	261.5	265.5	228.5	
R	92.5	36.5	47	26.5	

W przyszłości, wraz z ciągłym rozwojem technologii, takich jak Internet rzeczy, *big data* i sztuczna inteligencja, cyfryzacja i inteligentna modernizacja technologii oczyszczania osadów będą się nadal pogłębiać. Z jednej strony, cyfrowe i inteligentne technologie jeszcze bardziej poprawią poziom automatyzacji i wydajność przetwarzania osadów ściekowych, zmniejszając zużycie energii i koszty, ale z drugiej strony, cyfrowe i inteligentne technologie będą napędzać innowacje i rozwój technologii oczyszczania osadów, przynosząc więcej możliwości i wyzwań dla tej branży.

operational efficiency, reduce ecological footprint, and effectively address contemporary challenges.

In the future, with the continuous development of technologies such as the Internet of Things, big data, and artificial intelligence, the digitization and intelligent upgrading of sludge treatment technology will continue to deepen. On the one hand, digital and intelligent technologies will further improve the automation level and processing efficiency of sludge treatment, reduce energy consumption and costs. On the other hand, digital and intelligent technologies will drive innovation and development in sludge treatment technology, bringing more opportunities and challenges to the sludge treatment industry.

Received/Otrzymano: 22-12-2024

Reviewed/Zrecenzowano: 14-03-2025

Accepted/Zzaakceptowano: 27-03-2025

Published/Opublikowano: 18-04-2025

REFERENCES/LITERATURA

- [1] M. Kuosa, R. Kopra, *Nordic Pulp Paper Res. J.* 2019, No. 1, 128.
- [2] L. Zhu, *Environ. Eng. Geosci.* 2022, No. 3, 28.
- [3] L. Li, J. He, Z. Gan, *Chemosphere* 2021, **272**, No. 1–3, 129730.
- [4] H. Han, L. Guo, J. Zhang, *Ecol. Indic.* 2021, **127**, No. 8, 1.
- [5] K. Chojnacka, K. Moustakas, A. Witek-Krowiak, *Bioresour. Technol.* 2020, **295**, 122223.
- [6] S.K. Teoh, L.Y. Li, *J. Clean. Prod.* 2020, **247**, 119495.
- [7] F. Corradini, P. Meza, R. Eguiluz, *Sci. Total Environ.* 2019, **671**, No. 6, 411.
- [8] Y. Hu, Y. Fan, F. Chen, *Waste Manag.* 2018, **75**, No. 5, 340.
- [9] A. Marszałek, *Probl. Drobnych Gospodarstw Roln.* 2018, **4**, 51.
- [10] L.F. Wang, C. Qian, J.K. Jiang, *Environ. Pollut.* 2017, **231**, No. 2, 1388.
- [11] K.P. Law, K.R. Pagilla, *J. Clean. Prod.* 2021, **290**, No. 2, 125874.
- [12] H. Zhang, L. Rigamonti, S. Visigalli, *J. Clean. Prod.* 2019, **210**, No. 2, 1180.
- [13] J. Filipiak, C. Przybyta, M. Jakobsze, *Zesz. Probl. Postępów Nauk Roln.* 2008, **532**, 101.
- [14] Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach, *Dz.U.* 2013, poz. 21.
- [15] J. Malik, R. Pasela, M. Szymczak, M. Chalamoński, *Rocznik Ochr. Środ.* 2016, **18**, 579.
- [16] H. Bauman-Kaszubska, M. Sikorski, *Inż. Ekolog.* 2011, **25**, 20.

KALENDARZ WYDARZEŃ W 2025 R.

Miesiąc	Data	Wydarzenie	Miejsce	Organizator
Maj	11–15.05.	5. Konferencja „Fizykochemia granic faz – metody instrumentalne”	Lublin	UMCS
	27.05.	XIV Międzynarodowa Konferencja Przemysłu Detergentowego	Warszawa	EPS Media
	28.05.	I Międzynarodowa Konferencja Przemysłu Kosmetycznego	Warszawa	EPS Media
	29–30.05.	XII Kongres Polska Chemia	Kraków	PIPC
Czerwiec	9–11.06.	Spotkanie Polonijnych i Polskich Inżynierów VI Światowy Zjazd Inżynierów Polskich XXVIII Kongres Techników Polskich	Poznań	NOT, Politechnika Poznańska
	3–5.06.	18. Międzynarodowe Targi Wynałazków i Innowacji INTARG® Międzynarodowe Targi Ekologii i Ochrony Środowiska INTARG® EKO	Katowice	Eurobusiness – Haller
Lipiec	1–4.07.	Konferencja PoKoCha	Gdańsk	Politechnika Gdańska
Grudzień	3–5.12.	Konferencja Przemysł Chemiczny 2025 Konkurs o tytuł „Inżynier Przemysłu Chemicznego” 2025	Warszawa	SITPCChem