

Application of green chemical technology in chemical engineering and technology. Contributions to sustainable development and the “dual-carbon” goal in China

Zastosowanie zielonej technologii chemicznej w inżynierii chemicznej i technologii. Wkład w zrównoważony rozwój i cel koncepcji „dual-carbon” w Chinach



DOI: 10.15199/62.2025.4.4

Przegląd podstawowych pojęć i wymogów zrównoważonego rozwoju w warunkach chińskich wraz z 12 odniesieniami literaturowymi. Przeanalizowano konkretne zastosowania, funkcjonalność i wartości zielonej technologii chemicznej. Uwzględniono również dobór surowców i katalizatorów, czystą produkcję, optymalizację procesów biotechnologicznych i ochronę środowiska.

Słowa kluczowe: zielona technologia chemiczna, inżynieria chemiczna, optymalizacja procesów, zrównoważony rozwój, zastosowania przyjazne dla środowiska

A review, with 12 refs., of fundamental concepts and requirements of sustainable development under Chinese conditions. Specific applications, functionalities, and values of green chem. technol. were examd. Selection of raw materials and catalysts, clean prodn., biotechnol. process optimization and environmental protection were also taken into consideration.

Keywords: green chemical technology, chemical engineering, optimization, sustainability, environment-friendly applications

Szybki rozwój gospodarki społecznej oraz nauki i technologii spowodował znaczny postęp w przemyśle chemicznym. Jednak duże zużycie energii i wysoki poziom zanieczyszczeń sprawiają, że ten przemysł w znacznym stopniu przyczynia się do degradacji środowiska. Aby złagodzić presję na środowisko, zmniejszyć zużycie energii i osiągnąć zrównoważony rozwój, nieuniknionym wyborem dla przemysłu chemicznego stało się przyjęcie zielonej technologii chemicznej¹⁾.

Zielona technologia chemiczna odgrywa kluczową rolę we wspieraniu zrównoważonego rozwoju przemysłu chemicznego poprzez optymalizację procesów produkcyjnych, zmniejszenie emisji zanieczyszczeń i lepsze wykorzystanie zasobów²⁾. Niniejszy artykuł ma na celu kompleksowe przedstawienie konkretnych zastosowań zielonej technologii chemicznej w inżynierii chemicznej i procesach, przeanalizowanie jej wartości środowiskowych i przemysłowych oraz przedstawienie praktycznych zaleceń dotyczących jej powszechnego stosowania. Dodatkowo, przeanalizowano ścieżki, dzięki którym zielona technologia chemiczna może przyczynić się do osiągnięcia neutralności węglowej, dosto-

The rapid advancement of social economy and science and technology has driven remarkable progress in the chemical industry. However, the industry's high-energy consumption and high-pollution characteristics have made it a major contributor to environmental degradation. To mitigate environmental pressures, reduce energy consumption, and achieve sustainable development, the adoption of green chemical technology has emerged as an inevitable choice for the chemical industry¹⁾.

Green chemical technology plays a pivotal role in supporting the sustainable development of the chemical industry by optimizing production processes, reducing pollutant emissions, and enhancing resource utilization²⁾. This paper aims to comprehensively investigate the specific applications of green chemical technology in chemical engineering and processes, analyze its environmental and industrial values, and provide actionable recommendations for its widespread adoption. Additionally, this study explores the pathways through which green chemical technology can contribute to achieving carbon neutrality, aligning with the “dual-carbon” goal and offering a novel perspective on sustainable development³⁾.

* Address for correspondence/Adres do korespondencji:

Nanjing Polytechnic Institute, Nanjing 210048, China; e-mail: xiaoyunwu2020@163.com

sowując się do celu koncepcji „dual-carbon” i oferując nową perspektywę zrównoważonego rozwoju³⁾.

Koncepcje zielonej technologii chemicznej i inżynierii chemicznej

Zielona technologia chemiczna integruje koncepcje ochrony środowiska z procesem produkcji chemicznej, koncentrując się na redukcji źródeł zanieczyszczeń, optymalizacji procesów produkcyjnych i recyklingu odpadów⁴⁾. Jej głównym celem jest zminimalizowanie zużycia zasobów i emisji zanieczyszczeń, a tym samym osiągnięcie przyjaznej dla środowiska produkcji chemicznej.

Łącząc technologię struktur chemicznych z zasadami ochrony środowiska i optymalizując procesy chemiczne, zielona technologia chemiczna skutecznie zmniejsza lub eliminuje zanieczyszczenie środowiska spowodowane produkcją chemiczną. Ta technologia zwiększa również wskaźniki recyklingu odpadów, zmniejsza ogólną emisję i napędza przemysł chemiczny w kierunku bardziej zrównoważonej ścieżki. Jej rola w kontrolowaniu emisji szkodliwych substancji i optymalizacji recyklingu materiałów chemicznych dodatkowo ułatwia transformację i modernizację struktury przemysłu chemicznego⁵⁾.

Przykładowo, w produkcji biodegradowalnych tworzyw sztucznych naukowcy wykorzystali jako surowiec odnawialną biomasę w połączeniu z przyjaznymi dla środowiska katalizatorami i warunkami reakcji, a także wdrożyli precyzyjną kontrolę procesu. Takie podejście nie tylko zmniejsza zależność od nieodnawialnych zasobów, ale także znacznie obniża wytwarzanie szkodliwych produktów ubocznych, pokazując innowacyjne zastosowanie zielonej technologii chemicznej.

Inżynieria chemiczna jest nauką techniczną, która stosuje teorie chemiczne i metody inżynierskie do badania i optymalizacji procesów produkcyjnych w przemyśle chemicznym. Jej zakres obejmuje różne sektory, w tym petrochemię, *fine chemicals* i biofarmację⁶⁾. Głównym celem inżynierii chemicznej jest projektowanie i optymalizacja procesów produkcyjnych w celu osiągnięcia wydajnej, bezpiecznej i przyjaznej dla środowiska produkcji chemicznej.

Wraz z rosnącym naciskiem na ochronę środowiska, inżynieria chemiczna coraz częściej przyjmuje ekologiczne zasady. Integracja zielonej technologii chemicznej zwiększa efektywność wykorzystania zasobów i zmniejsza emisję zanieczyszczeń, promując w ten sposób zrównoważony rozwój przemysłu chemicznego.

Wymogi dotyczące badań i rozwoju

Wybór surowców

Wybór surowców ma fundamentalne znaczenie dla zastosowania zielonej technologii chemicznej w produkcji chemicznej⁷⁾. Naukowe podejście do wyboru ekologicznych surowców minimalizuje wytwarzanie zanieczyszczeń i zmniejsza wpływ przemysłu na środowisko. Na przykład,

Concepts of green chemical technology and chemical engineering

Green chemical technology integrates environmental protection concepts into the chemical production process, focusing on reducing pollution sources, optimizing production processes, and recycling waste⁴⁾. Its core objective is to minimize resource consumption and pollutant emissions, thereby achieving environmentally friendly chemical production.

By combining chemical construction technology with environmental protection principles and optimizing chemical processes, green chemical technology effectively reduces or eliminates environmental pollution caused by chemical production. This technology also enhances waste recycling rates, reduces overall emissions, and drives the chemical industry toward a more sustainable trajectory. Its role in controlling harmful substance emissions and optimizing chemical material recycling further facilitates the transformation and upgrading of the chemical industry structure⁵⁾.

For example, in the production of biodegradable plastics, researchers have utilized renewable biomass as raw materials, coupled with specific environmentally friendly catalysts and reaction conditions, and implemented precise process control. This approach not only reduces reliance on non-renewable resources but also significantly decreases the generation of harmful by-products, showcasing the innovative application of green chemical technology.

Chemical engineering is a technical science that applies chemical theory and engineering methods to study and optimize the production processes of the chemical industry. Its scope encompasses various sectors, including petrochemicals, fine chemicals, and biopharmaceuticals⁶⁾. The primary objective of chemical engineering is to design and optimize production processes to achieve efficient, safe, and environmentally friendly chemical manufacturing.

With the growing emphasis on environmental protection, chemical engineering is increasingly adopting green principles. The integration of green chemical technology enhances resource efficiency and pollutant reduction, thereby promoting the sustainable development of the chemical industry.

Research and development requirements

Raw material selection

The selection of raw materials is fundamental to the application of green chemical technology in chemical production⁷⁾. Scientifically choosing eco-friendly raw materials minimizes pollutant generation and reduces environmental impact. For instance, in sulfuric acid production, prioritizing zero-pollution or low-pollution raw

w produkcji kwasu siarkowego priorytetowe traktowanie surowców o zerowym lub niskim poziomie zanieczyszczeń, takich jak odpady roślinne, może znacznie zmniejszyć obciążenie dla środowiska. Badania wykazały, że surowce oparte na biomase mogą obniżyć ślad węglowy produkcji kwasu siarkowego w porównaniu z tradycyjnymi metodami.

Wybór katalizatora

Katalizatory mają kluczowe znaczenie w produkcji chemicznej, a zielona technologia chemiczna nakazuje stosowanie nietoksycznych i nieszkodliwych katalizatorów w celu zminimalizowania zanieczyszczenia środowiska. Katalizatory alkilacji w fazie stałej są preferowane ze względu na ich właściwości przyjazne dla środowiska. Racjonalny dobór katalizatorów nie tylko poprawia wydajność reakcji, ale także zmniejsza ryzyko zanieczyszczenia środowiska. Na przykład, w konkretnej reakcji chemicznej zastosowanie katalizatorów alkilacji w fazie stałej zwiększyło szybkość reakcji, jednocześnie znacznie zmniejszając szkodliwe emisje.

Wybór reakcji chemicznej

Przy wyborze reakcji chemicznych niezbędna jest kompleksowa ocena wydajności reakcji, kosztów ekonomicznych i wpływu na środowisko. Reakcje przyjazne dla środowiska powinny być traktowane priorytetowo, a warunki reakcji powinny być zoptymalizowane w celu zminimalizowania wytwarzania produktów ubocznych i emisji zanieczyszczeń. Aby promować powszechne przyjęcie zielonej technologii chemicznej, należy porzucić tradycyjny sposób myślenia „korzyści ponad środowiskiem”. Zastosowanie metody oceny cyklu życia (LCA) do oceny reakcji pomaga wskazać te, które mają najmniejszy wpływ na środowisko w całym ich cyklu życia⁸⁾.

Funkcje zastosowania zielonej technologii chemicznej

Czysta produkcja

Czysta produkcja, kamień węgielny zielonej technologii chemicznej, zapewnia produkcję wolną od zanieczyszczeń poprzez przetwarzanie zanieczyszczeń i odpadów podczas procesu produkcyjnego⁹⁾. Zastosowanie technologii płynów nadkrytycznych i technologii przetwarzania odpadów w branżach takich jak produkcja opon i gazyfikacja węgla znacznie zmniejszyło emisję zanieczyszczeń. Przykładowo, zastosowanie technologii płynów nadkrytycznych w przetwarzaniu gumy w zakładzie produkującym opony doprowadziło do znacznej redukcji emisji lotnych związków organicznych (VOC).

Produkty przyjazne dla środowiska naturalnego

Zielona technologia chemiczna przyczyniła się do rozwoju i produkcji produktów przyjaznych dla środowiska, które generują mniej zanieczyszczeń podczas produkcji i powodują minimalne szkody dla środowiska. Innowacje

materials, such as crop waste, can significantly reduce the environmental burden. Studies have demonstrated that biomass-based raw materials can lower the carbon footprint of sulfuric acid production compared to traditional methods.

Catalyst selection

Catalysts are critical in chemical production, and green chemical technology mandates the use of non-toxic and harmless catalysts to minimize environmental pollution. Solid-phase alkylation catalysts are preferred due to their eco-friendly properties. The rational selection of catalysts not only improves reaction efficiency but also reduces the risk of pollution. For example, in a specific chemical reaction, the use of solid-phase alkylation catalysts increased the reaction rate while significantly reducing harmful emissions.

Chemical reaction selection

When selecting chemical reactions, a comprehensive evaluation of reaction efficiency, economic costs, and environmental impacts is essential. Environmentally friendly reactions should be prioritized, and reaction conditions should be optimized to minimize by-product generation and pollutant emissions. The traditional “benefits-over-environment” mindset must be replaced to promote the widespread adoption of green chemical technology. Applying the life-cycle assessment (LCA) method to evaluate reactions helps identify those with the least environmental impact throughout their entire life cycle⁸⁾.

Application functions of green chemical technology

Clean production

Clean production, a cornerstone of green chemical technology, achieves pollution-free production by treating pollutants and waste during the production process⁹⁾. Applications of supercritical fluid technology and waste treatment technology in industries such as tire manufacturing and coal gasification have significantly reduced pollutant emissions. For example, the adoption of supercritical fluid technology in rubber processing at a tire-manufacturing facility led to a substantial reduction in volatile organic compound (VOC) emissions.

Environment-friendly products

Green chemical technology has driven the development and production of environment-friendly products, which generate fewer pollutants during manufacturing and cause minimal environmental damage. Innovations in non-toxic coatings and green energy-saving equipment not only meet market demands but also contribute to resource conservation and environmental protection. Market data indicates a growing market share for eco-friendly coatings in recent

w zakresie nietoksycznych powłok i ekologicznego sprzętu energooszczędnego nie tylko spełniają wymagania rynku, ale także przyczyniają się do ochrony zasobów i środowiska. Dane rynkowe wskazują na rosnący udział ekologicznych powłok w rynku w ostatnich latach, odzwierciedlając rosnące preferencje dla zrównoważonych produktów.

Biotechnologia

Biotechnologia odgrywa kluczową rolę w rozwoju zielonej chemii, oferując rozwiązania dla zrównoważonej produkcji chemicznej. Technologia bioenzymów, charakteryzująca się wysoką wydajnością katalizy i kompatybilnością ze środowiskiem, zwiększa szybkość konwersji substancji chemicznych, zmniejsza marnotrawstwo zasobów i promuje recykling chemiczny. W produkcji chemikaliów na bazie biologicznej technologia z wykorzystaniem enzymów zwiększa wydajność produktu przy jednoczesnym obniżeniu zużycia energii, co dodatkowo zmniejsza ryzyko zanieczyszczenia środowiska.

Optymalizacja procesu

Optymalizacja procesów ma kluczowe znaczenie dla poprawy wskaźników wykorzystania energii i zmniejszenia marnotrawstwa zasobów¹⁰. Zastąpienie tradycyjnej technologii o stałej częstotliwości technologią o zmiennej częstotliwości może znacznie zmniejszyć straty energii. Ponadto recykling i ponowne wykorzystanie cennych substancji ze ścieków zwiększa efektywność wykorzystania zasobów, jednocześnie zmniejszając zanieczyszczenie środowiska. Na przykład, zakład chemiczny, który zastosował technologię zmiennej częstotliwości w swoim systemie pompowania, odnotował zmniejszone zużycie energii, podczas gdy oczyszczanie ścieków pozwoliło uzyskać cenne substancje, co przyniosło większe korzyści ekonomiczne.

Ochrona środowiska

Zielona technologia chemiczna chroni środowisko naturalne poprzez redukcję emisji zanieczyszczeń. Zastosowanie zaawansowanej zielonej technologii odsalania chemicznego w projektach odsalania wody morskiej na dużą skalę zmniejszyło zużycie energii na jednostkę odsolonej wody i zmniejszyło emisję zanieczyszczeń, skutecznie radząc sobie z niedoborami zasobów wodnych przy jednoczesnym zminimalizowaniu szkód dla środowiska¹¹.

Korzyści gospodarcze i społeczne

Powszechne zastosowanie zielonej technologii chemicznej przekształciło przemysł chemiczny, zwiększając korzyści ekonomiczne i wspierając poczucie odpowiedzialności społecznej. Produkty przyjazne dla środowiska nie tylko spełniają wymagania rynku, ale także wzmacniają wizerunek marki przedsiębiorstwa. Badania pokazują, że przedsiębiorstwa chemiczne aktywnie rozwijające i promujące produkty przyjazne dla środowiska zwiększyły swój udział w rynku i poprawiły reputację marki.

years, reflecting the increasing preference for sustainable products.

Biotechnology

Biotechnology plays a pivotal role in advancing green chemistry, offering solutions for sustainable chemical production. Bio-enzyme technology, characterized by high-efficiency catalysis and environmental compatibility, enhances chemical substance conversion rates, reduces resource waste, and promotes chemical recycling. In bio-based chemical production, bio-enzyme technology increases product yields while lowering energy consumption, further reducing the risk of environmental pollution.

Process optimization

Process optimization is crucial for improving energy utilization rates and reducing resource waste¹⁰. Replacing traditional fixed-frequency technology with variable-frequency technology can significantly reduce energy losses. Additionally, recycling and reusing valuable substances from wastewater enhances resource efficiency while reducing environmental pollution. For example, a chemical plant that adopted variable-frequency technology for its pumping system experienced reduced energy consumption, while wastewater recovery yielded valuable substances, resulting in increased economic benefits.

Environmental protection

Green chemical technology protects the ecological environment by reducing pollutant emissions. The application of advanced green chemical desalination technology in large-scale seawater desalination projects has decreased energy consumption per unit of desalinated water and reduced relevant pollutant emissions, effectively addressing water resource shortages while minimizing environmental damage¹¹.

Economic and social benefits

The widespread application of green chemical technology has transformed the chemical industry, enhancing economic benefits and fostering a sense of social responsibility. Environment-friendly products not only meet market demands but also bolster the enterprise brand image. Surveys reveal that chemical enterprises actively developing and promoting eco-friendly products have experienced increased market share and enhanced brand reputation.

Contribution to the “dual-carbon” goal and sustainable development

In the context of the “dual-carbon” goal, green chemical technology is instrumental in achieving carbon neutrality. Certain green chemical processes enable the

Wkład w realizację celu koncepcji „dual-carbon” i zrównoważonego rozwoju

W kontekście koncepcji „dual-carbon” zielona technologia chemiczna odgrywa kluczową rolę w osiągnięciu neutralności pod względem emisji ditlenku węgla. Niektóre zielone procesy chemiczne umożliwiają wychwytywanie i utylizację ditlenku węgla, przekształcając go w cenne produkty chemiczne. Takie podejście zmniejsza emisję gazów cieplarnianych, generując jednocześnie wartość ekonomiczną. Na przykład projekty pilotażowe wykorzystujące zieloną technologię chemiczną do przekształcania ditlenku węgla w metanol stworzyły nową drogę dla przemysłu chemicznego do osiągnięcia neutralności pod względem emisji ditlenku węgla.

Wnioski

Zastosowanie zielonej technologii chemicznej ma fundamentalne znaczenie dla osiągnięcia zrównoważonego rozwoju^[2]. Optymalizując procesy produkcyjne, zmniejszając zużycie zasobów i obniżając emisję zanieczyszczeń, kładzie podwaliny pod ekologiczny rozwój gospodarki społecznej.

Zielona technologia chemiczna, charakteryzująca się zerowym zanieczyszczeniem, przyjazna dla środowiska przyrodniczego i zmniejszająca szkody środowiskowe, staje się kluczowym sposobem na zmniejszenie zużycia zasobów i energii przy jednoczesnym promowaniu stabilnego i zrównoważonego rozwoju gospodarki społecznej. Ponieważ świadomość ekologiczna stale rośnie, ciągle doskonalenie i promowanie zielonej technologii chemicznej ma zasadnicze znaczenie dla osiągnięcia zrównoważonego rozwoju, ochrony środowiska naturalnego i ograniczenia marnotrawstwa zasobów. Patrząc w przyszłość, konieczne są dogłębne badania i innowacje, aby jeszcze bardziej poprawić wydajność i rozszerzyć zakres zastosowań zielonej technologii chemicznej, szczególnie w kontekście koncepcji „dual-carbon” i globalnych wysiłków na rzecz zrównoważonego rozwoju.

Podziękowania

Niniejszy artykuł jest wspierany przez Specjalny projekt badawczy 2001 Chińskiej Federacji Przemysłu Naftowego i Chemicznego dotyczący odpowiedzialnej troski – Badania nad ścieżką Odpowiedzialnej Troski Promującej Neutralność Emisyjną.

capture and utilization of carbon dioxide, converting it into valuable chemical products. This approach reduces greenhouse gas emissions while generating economic value. For example, pilot projects utilizing green chemical technology to convert carbon dioxide into methanol have provided a new pathway for the chemical industry to achieve carbon neutrality.

Conclusions

The application of green chemical technology is fundamental to achieving sustainable development^[12]. By optimizing production processes, reducing resource consumption, and lowering pollution emissions, it lays the groundwork for the green development of the social economy.

Green chemical technology, characterized by zero pollution, environmental friendliness, and harm reduction, is increasingly becoming a critical mean of reducing resource and energy consumption while promoting the stable and sustainable development of the social economy. As environmental awareness continues to grow, the continuous improvement and promotion of green chemical technology are essential for achieving sustainable development, protecting the natural environment, and reducing resource waste. Looking ahead, in-depth research and innovation are required to further enhance the performance and expand the application scope of green chemical technology, particularly in the context of the “dual-carbon” goal and global sustainability efforts.

Acknowledgments

This paper is supported by 2021 China Petroleum and Chemical Industry Federation Responsibility Care Special Research Project – Research on Responsibility Care Promoting Carbon Neutrality Pathway.

Received/Otrzymano: 23-02-2025

Reviewed/Zrecenzowano: 04-03-2025

Accepted/Zaaceptowano: 20-03-2025

Published/Opublikowano: 18-04-2025

REFERENCES/LITERATURA

- [1] H.H. Chen, *Modern Chem. Res.* 2021, No. 20, 144.
- [2] L. Qinfang, Tuhuanhuan, L. Haifeng, *Yunnan Chem. Ind.* 2022, **49**, No. 3, 110.
- [3] M. Ya, *China Petroleum Chem. Std. Quality* 2021, **41**, No. 15, 190.
- [4] L. Jingjing, *Chem. Fiber Textile Technol.* 2021, **50**, No. 7, 21.
- [5] H. Xin, D. Yi, H. Xidong, *Chem. Fiber Textile Technol.* 2021, **50**, No. 3, 52.
- [6] X.F. Yao, *Chem. Eng. Manage.* 2021, No. 6, 170.
- [7] R. Weifeng, Y.P. Pan, *Chem. Eng. Manage.* 2021, No. 5, 158.
- [8] H.J. Zhou, *Ind. Technol. Forum* 2022, **21**, No. 6, 38.
- [9] Y. Xiaodong, *Chem. Eng. Equip.* 2023, No. 10, 37.
- [10] Z. Liwang, X.U. Zhen, *China Petroleum Chem. Std. Quality* 2021, **41**, No. 22, 135.
- [11] S. Chong, *Shandong Chem. Ind.* 2023, **52**, No. 13, 131.
- [12] L. Wei, Z. Yumin, *Modern Chem. Res.* 2020, No. 16, 141.