

# Catalase Enzyme for Wastewater Treatment: rimozione del perossido di idrogeno residuo, protezione dei processi biologici e integrazione nei trattamenti ossidativi

Team di ricerca Enzymes.bio · Wellington, Nuova Zelanda · June 20, 2026

La catalasi per il trattamento delle acque reflue è un enzima usato per decomporre il perossido di idrogeno residuo in acqua e ossigeno, soprattutto dopo ossidazione avanzata, disinfezione o processi che impiegano  $H_2O_2$ . Il suo valore non è la rimozione universale di contaminanti, ma il controllo selettivo dell'ossidante residuo che può interferire con biomasse, biofilm, misure biologiche e fasi successive di trattamento.

## Che cos'è la catalasi per wastewater treatment

**Catalase Enzyme for Wastewater Treatment** indica l'impiego della catalasi come enzima funzionale nei processi di trattamento delle acque reflue in cui il problema operativo è la presenza di perossido di idrogeno residuo. La catalasi è un enzima antiossidante associato alla risposta biologica allo stress ossidativo: nei sistemi viventi contribuisce a controllare l'accumulo di  $H_2O_2$ , una specie reattiva dell'ossigeno che, se non regolata, può danneggiare componenti cellulari e alterare funzioni biologiche [1].

La reazione centrale è la dismutazione del perossido di idrogeno:



In termini applicativi, questo significa che la catalasi converte un ossidante residuo in due prodotti semplici: acqua e ossigeno molecolare. Nel trattamento delle acque reflue, tale funzione è rilevante quando  $H_2O_2$  è stato introdotto intenzionalmente come reagente ossidante, come componente di processi avanzati di ossidazione o come supporto a fasi di sanificazione e abbattimento di contaminanti organici [2].

Enzymes.bio rende disponibile questo prodotto come fornitore online, in unità da **1 kg**. Enzymes.bio non è un produttore né un laboratorio di analisi; il prodotto è acquistabile direttamente online e il **certificato di analisi (CoA)** e la **scheda di dati di sicurezza (SDS)** sono forniti insieme all'ordine .

## Perché il perossido residuo è un problema nelle acque reflue

Il perossido di idrogeno è utile perché partecipa a reazioni ossidative capaci di trasformare composti organici difficili da trattare con soli processi convenzionali. Le tecnologie di ossidazione avanzata per wastewater treatment sfruttano specie reattive dell'ossigeno per rompere legami chimici, modificare strutture molecolari e aumentare la trattabilità di contaminanti persistenti; tuttavia, la stessa reattività che rende efficace il processo può diventare problematica se l'ossidante rimane in eccesso a valle del trattamento [3].

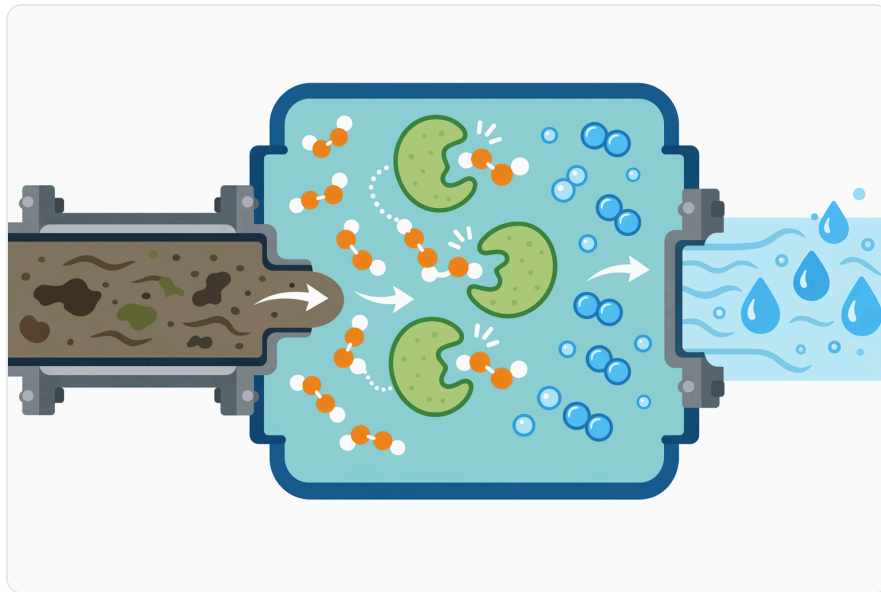


Figure 1. 카탈라아제는 산업 폐수에 남아 있는 과산화수소를 화학량론적 중화제를 추가하지 않고 물과 산소로 분해한다.

Il residuo di  $H_2O_2$  può interferire con trattamenti biologici successivi, perché molte fasi depurative dipendono da comunità microbiche sensibili allo stress ossidativo. La letteratura sui sistemi a biofilm per il trattamento delle acque reflue industriali evidenzia il ruolo delle comunità microbiche organizzate su superfici nella degradazione e trasformazione di inquinanti; un ambiente con ossidanti residui non controllati può compromettere la stabilità di questi consorzi biologici [4].

Il problema non riguarda solo la sopravvivenza microbica, ma anche la lettura del processo. Quando una fase ossidativa è seguita da valutazioni biologiche o da un trattamento biologico, il perossido residuo può far apparire il refluo meno compatibile con la biomassa di quanto sarebbe dopo neutralizzazione dell'ossidante. Per questo la catalasi è spesso concettualmente utile come passaggio di “quenching” enzimatico: non elimina il contaminante originario, ma rimuove l'eccesso di  $H_2O_2$  che potrebbe falsare o disturbare la fase successiva.

## Meccanismo: come la catalasi decompone $H_2O_2$

---

La catalasi agisce su un substrato molto specifico: il perossido di idrogeno. Il suo ruolo biologico è legato alla difesa antiossidante, insieme ad altri sistemi enzimatici come la superossido dismutasi; studi su organismi esposti a contaminanti ambientali mostrano che catalasi e superossido dismutasi partecipano a vie di risposta allo stress ossidativo quando composti xenobiotici alterano l'equilibrio redox cellulare <sup>[1]</sup>.

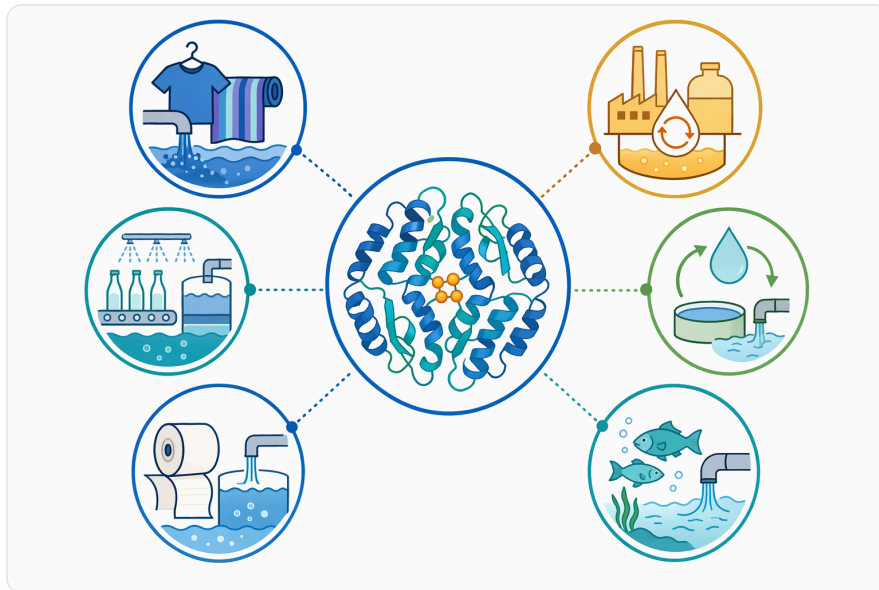
Nel sito attivo della catalasi, il perossido viene trasformato attraverso un ciclo redox in cui una molecola di  $H_2O_2$  contribuisce all'ossidazione del centro catalitico e un'altra molecola consente il ritorno dello stato catalitico, con formazione complessiva di acqua e ossigeno. Questa specificità distingue la catalasi da enzimi ossidativi come laccasi o perossidasi, che possono partecipare alla trasformazione di composti organici più ampi ma non hanno come funzione principale la rimozione selettiva del perossido residuo.

Dal punto di vista del processo, la catalasi non deve essere considerata un reagente stechiometrico tradizionale. Un enzima, finché resta strutturalmente attivo e non viene inattivato dalla matrice, può catalizzare molte conversioni successive; tuttavia, la sua prestazione dipende da pH, temperatura, composizione del refluo, presenza di metalli, tensioattivi, solventi, ossidanti concorrenti e contatto effettivo con il substrato. Studi spettroscopici sull'interazione tra nanoplastiche di polistirene e catalasi mostrano che materiali colloidali o particellari possono interagire con la struttura dell'enzima, un aspetto rilevante per reflui complessi che contengono micro- e nanoplastiche o superfici adsorbenti <sup>[5]</sup>.

## Dove si inserisce nella filiera di trattamento

---

La catalasi trova il suo spazio soprattutto **dopo** processi che hanno impiegato o generato perossido di idrogeno. Nei processi di ossidazione avanzata, il trattamento può puntare alla degradazione di inquinanti organici attraverso specie radicaliche e non radicaliche; review recenti evidenziano l'evoluzione di queste tecnologie per acque reflue complesse, ma anche la necessità di controllare costi, sottoprodotti, compatibilità con matrici reali e integrazione con trattamenti successivi <sup>[2]</sup>.



**Figure 2.** 과산화물이 포함된 폐수는 섬유 표백, 식음료 위생 처리, 유제품 관련 공정, 펄프·제지 표백, 제약 설비 세정, 병원 소독, 화학적 산화, 산업 세정 등에서 발생할 수 있다.

Un caso tipico è l'integrazione dopo processi tipo Fenton o foto-Fenton, nei quali  $H_2O_2$  viene usato insieme a specie metalliche per generare ossidanti forti. La catalasi non sostituisce la fase Fenton e non partecipa alla degradazione radicalica del contaminante; serve invece a ridurre il perossido rimasto quando la reazione ossidativa è terminata o quando il refluo deve essere trasferito a una fase biologica.

La catalasi può essere utile anche dopo trattamenti di disinfezione o ossidazione che impiegano combinazioni di ossidanti. Le tecnologie di ozonazione catalitica, ad esempio, vengono studiate per il trattamento avanzato di reflui industriali e richiedono attenzione ai meccanismi di generazione delle specie reattive, alla selettività e alla compatibilità con le fasi a valle <sup>[6]</sup>. Se nel treno di trattamento sono presenti passaggi basati su perossido, la decomposizione selettiva del residuo può migliorare il controllo complessivo del processo.

## Confronto con altri approcci di trattamento

La catalasi è una soluzione mirata, non una tecnologia completa di depurazione. Per inquadrare correttamente il suo ruolo, è utile confrontarla con alcune famiglie di trattamento comunemente discusse per reflui industriali e municipali.

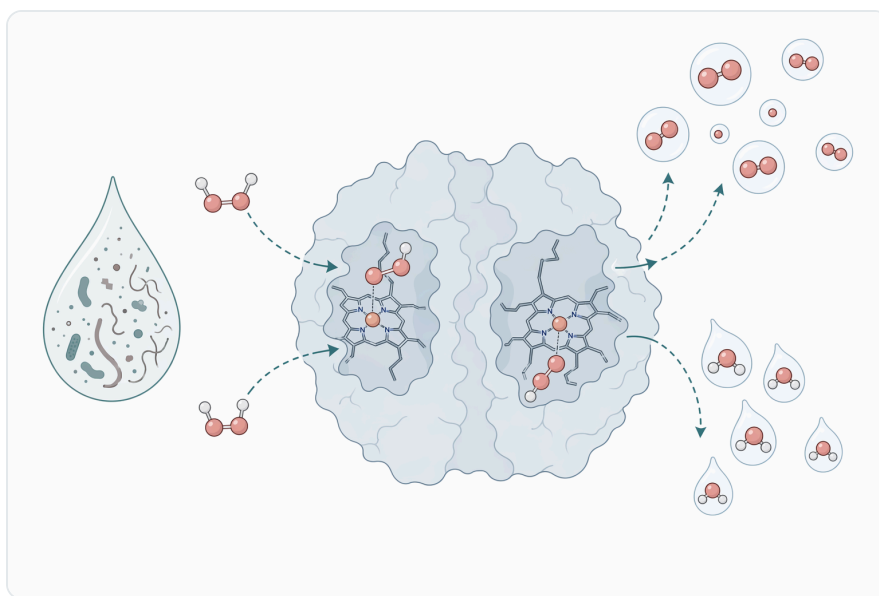
Approccio	Funzione principale	Rapporto con il perossido di idrogeno	Limite da considerare
Catalasi	Decomposizione selettiva di $H_2O_2$ in acqua e ossigeno	Rimuove il perossido residuo dopo trattamenti ossidativi	Non rimuove direttamente metalli, nutrienti, oli o tutti i contaminanti organici
Ossidazione avanzata	Trasformazione di contaminanti tramite specie reattive dell'ossigeno	Può usare o generare $H_2O_2$	Può lasciare ossidanti residui e sottoprodotti da gestire [2]
Biofilm e processi biologici	Biodegradazione e trasformazione microbica	Sensibili a ossidanti residui	Richiedono condizioni compatibili con la biomassa [4]
Membrane e bioreattori a membrana	Separazione fisica e trattamento biologico integrato	Il perossido può incidere sulla biomassa o sui materiali se presente a monte	Fouling, gestione operativa e compatibilità della matrice restano critici [7]
Coagulazione/flocculazione	Aggregazione e rimozione di particelle e colloidali	Non è progettata per decomporre selettivamente $H_2O_2$	Produce fanghi e dipende dalla chimica del refluo [8]
Adsorbenti e fotocatalizzatori	Rimozione o degradazione di contaminanti su superfici attive	Possono essere combinati con ossidanti	Prestazioni dipendenti da matrice, rigenerazione e trasferimento di massa [9]

Questo confronto chiarisce un punto tecnico essenziale: la catalasi ha senso quando il collo di bottiglia è il **perossido residuo**, non quando l'obiettivo primario è la separazione di solidi, la rimozione di metalli o la mineralizzazione completa di composti organici. Le tecnologie basate su adsorbimento, fotocatalisi e materiali compositi stanno evolvendo rapidamente, ma rispondono a obiettivi diversi rispetto al quenching enzimatico del perossido [9].

## Applicazioni pratiche nel trattamento delle acque reflue

### Dopo processi di ossidazione avanzata

Nei reflui industriali, gli advanced oxidation processes sono utilizzati quando i contaminanti sono scarsamente biodegradabili, tossici o resistenti ai trattamenti convenzionali. Le review su biochar combinato con ossidazione avanzata mostrano che materiali carboniosi e ossidanti possono essere integrati per aumentare la degradazione di inquinanti acquatici, ma questi sistemi richiedono una gestione attenta delle specie reattive generate durante il processo [10].



**Figure 3.** 카탈라아제는 활성 부위를 순환적으로 작동시켜 과산화수소 분자 두 개를 물 분자 두 개와 산소 분자 하나로 전환한다.

In questo scenario, la catalasi può essere introdotta come fase successiva alla reazione ossidativa per decomporre  $H_2O_2$  non consumato. Il beneficio tecnico è la separazione funzionale tra due obiettivi: prima l'ossidazione del contaminante, poi la rimozione dell'ossidante residuo. Questa distinzione riduce il rischio di attribuire alla catalasi un effetto di degradazione che in realtà appartiene alla fase AOP.

### Prima di trattamenti biologici

Molti impianti usano una sequenza in cui una fase chimico-ossidativa aumenta la biodegradabilità o riduce la tossicità iniziale, seguita da una fase biologica. I membrane aerated biofilm reactors, i biofilm reactor e altri sistemi biologici avanzati sono studiati per il trattamento di reflui industriali proprio perché combinano trasferimento di ossigeno, crescita microbica e trasformazione di contaminanti in configurazioni compatte [11].

Se  $H_2O_2$  residuo entra in una fase biologica senza controllo, può esercitare pressione ossidativa sulla biomassa. La catalasi può aiutare a rendere il refluo più compatibile con fanghi attivi, biofilm, bioreattori a membrana o altre tecnologie biologiche, purché la matrice non contenga condizioni che inattivino rapidamente l'enzima.

### **In linee che alternano sanificazione, ossidazione e riuso**

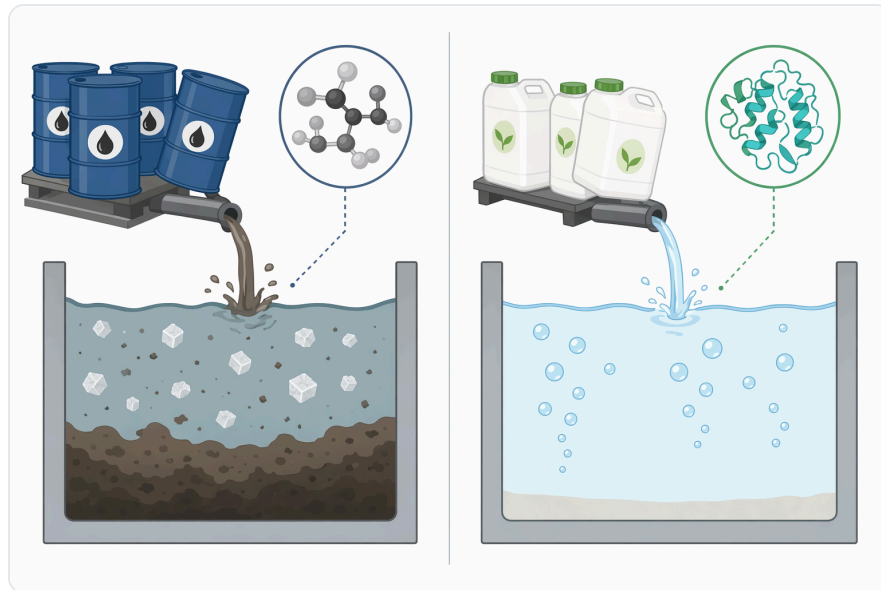
In diversi contesti industriali, l'acqua di processo può essere sottoposta a sanificazione o ossidazione prima del riuso interno o dello scarico. La ricerca sulle micro- e nano-bolle, ad esempio, evidenzia l'interesse verso tecnologie che migliorano trasferimento di gas, ossidazione, flottazione e prestazioni nei trattamenti di acque domestiche e industriali <sup>[12]</sup>. In linee complesse, la catalasi può svolgere una funzione circoscritta: riportare il residuo di perossido a un livello più compatibile con la fase successiva.

Questa applicazione non elimina la necessità di controllare il resto del processo. Se il refluo contiene tensioattivi, solventi, metalli, particelle, polimeri o contaminanti emergenti, la sola decomposizione del perossido non garantisce che l'acqua sia idonea al riuso o allo scarico. La catalasi è una fase di controllo chimico-biologico, non un trattamento completo.

### **Catalasi, contaminanti emergenti e limiti della rimozione diretta**

---

La presenza di farmaci, pesticidi, composti fenolici, microplastiche e altri contaminanti emergenti rende il wastewater treatment sempre più complesso. Le review sulla bioremediation sottolineano il ruolo di funghi, batteri e microalghe nella trasformazione di pesticidi, metalli pesanti e farmaceutici, ma mostrano anche che la degradazione dipende da vie metaboliche, condizioni ambientali e interazioni tra contaminante e organismo <sup>[13]</sup>.



**Figure 4.** 카탈라아제는 과산화물 제거 반응이 중화제에서 유래한 용존 잔류물을 만들지 않고 물과 산소를 생성한다는 점에서 아황산염계 소거 방식과 다르다.

La catalasi non è l'enzima principale per degradare direttamente queste classi di contaminanti. Per esempio, la rimozione di farmaci o pesticidi può richiedere ossidazione avanzata, adsorbimento, biodegradazione specializzata, fotocatalisi o combinazioni ibride. La catalasi interviene quando, all'interno di queste strategie, è necessario controllare  $H_2O_2$  residuo.

Anche le microplastiche e nanoplastiche possono complicare l'impiego di enzimi in acque reali. Studi sull'adsorbimento di inquinanti su microplastiche invecchiate mostrano che le particelle plastiche possono modificare la distribuzione dei contaminanti e creare superfici reattive o adsorbenti nel sistema <sup>[14]</sup>. In parallelo, l'interazione tra polistirene nanoplastico e catalasi suggerisce che particelle molto piccole possono influire sulla struttura o sul comportamento dell'enzima <sup>[5]</sup>.

## Condizioni operative: cosa influenza la prestazione enzimatica

La catalasi richiede contatto effettivo con il perossido di idrogeno. In un reffluo reale, questo implica miscelazione adeguata, distribuzione omogenea dell'enzima e assenza di zone in cui il perossido resti isolato da particelle, fasi separate o flussi non miscelati. Il trasferimento di massa è spesso decisivo nei sistemi acquosi, specialmente quando il trattamento coinvolge superfici, biofilm, adsorbenti o materiali porosi.

Il pH è un fattore critico per molte tecnologie catalitiche e biocatalitiche. La letteratura sui nanozimi evidenzia come la dipendenza dal pH sia un limite importante per catalizzatori biomimetici e sistemi catalase-like, perché l'efficienza catalitica può cambiare drasticamente al variare dell'ambiente chimico

[15]. Anche per un enzima naturale, condizioni troppo acide o troppo alcaline possono alterare conformazione, accesso al sito attivo e stabilità.

La temperatura influenza sia la velocità di reazione sia la stabilità strutturale. Un aumento moderato può accelerare il contatto molecolare, ma temperature eccessive possono denaturare l'enzima. Nei reflui industriali, questo aspetto è rilevante perché alcune correnti arrivano da lavaggi, processi termici o reazioni esotermiche; l'impiego della catalasi è più ragionevole quando la corrente è in una finestra compatibile con la stabilità enzimatica.

La matrice può contenere inibitori o interferenti. Metalli, solventi, salinità elevata, ossidanti diversi dal perossido, solidi sospesi, tensioattivi e superfici adsorbenti possono ridurre l'attività disponibile. Gli studi su sistemi di adsorbimento e materiali compositi per reflui tossici mostrano che le superfici solide possono sequestrare contaminanti, ma in una matrice enzimatica potrebbero anche adsorbire proteine o modificarne la disponibilità [16].

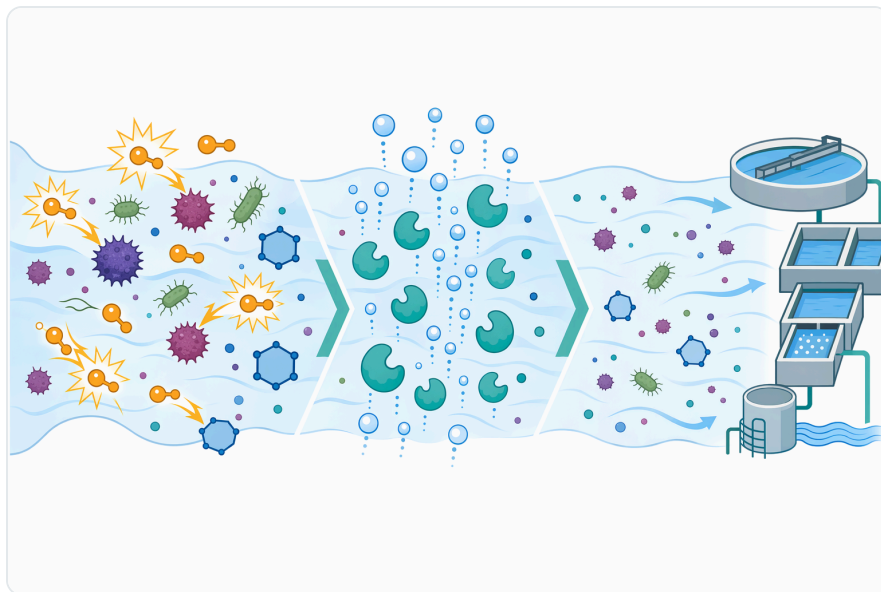


Figure 5. 카탈라아제는 과산화수소의 잔류 산화력을 제거하고 산소를 방출하지만, 그 자체로 다른 폐수 오염물질을 제거하지는 않는다.

## Benefici tecnici della catalasi nel wastewater treatment

Il primo beneficio è la **selettività**. La catalasi indirizza il perossido di idrogeno verso una decomposizione semplice, senza introdurre intenzionalmente riducenti chimici che possono aumentare salinità, carico ionico o sottoprodotti. Questo è particolarmente interessante quando il trattamento ossidativo ha già raggiunto il suo scopo e il residuo di  $H_2O_2$  è diventato un ostacolo operativo.

Il secondo beneficio è la **compatibilità con processi biologici a valle**. Le tecnologie biologiche, incluse quelle a biofilm e i bioreattori a membrana, sono considerate rilevanti per reflui industriali perché sfruttano comunità microbiche capaci di trasformare contaminanti e gestire carichi organici in modo continuo <sup>[7]</sup>. Ridurre un ossidante residuo prima dell'ingresso in queste fasi può contribuire a una transizione più controllata tra trattamento chimico e trattamento biologico.

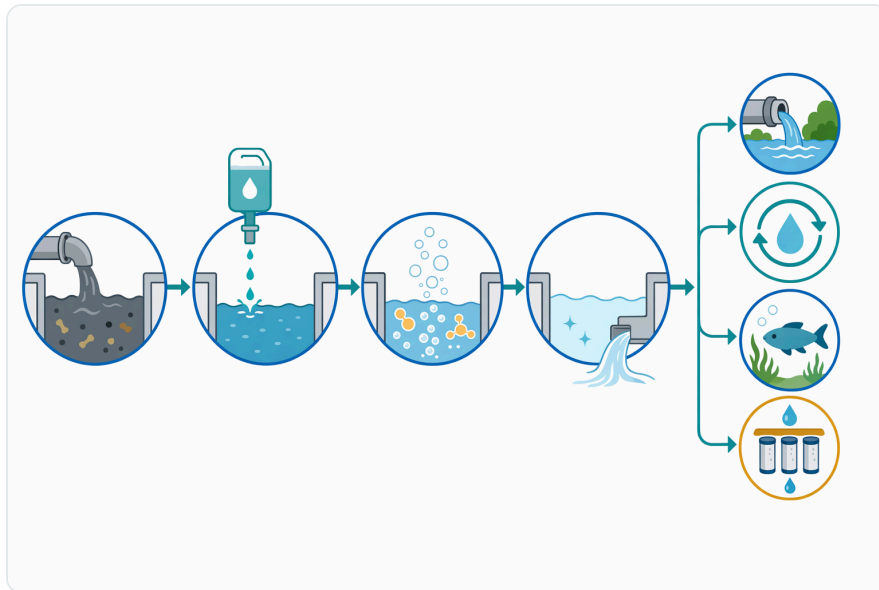
Il terzo beneficio è la **riduzione del rischio di interpretazioni errate**. Se il perossido residuo rimane nel campione o nella corrente, può continuare a reagire dopo la fase principale, modificare la tossicità apparente o influenzare osservazioni basate sull'attività biologica. La catalasi aiuta a definire meglio il punto di arresto della chimica ossidativa.

Il quarto beneficio è l'integrazione in strategie a minore impatto chimico. Le review sui coagulanti e flocculanti naturali mostrano un interesse crescente per soluzioni più sostenibili nel trattamento industriale delle acque, anche se ogni tecnologia ha limiti specifici e non può essere sostituita in modo automatico da alternative "green" <sup>[8]</sup>. La catalasi rientra in questo orientamento come strumento biologico mirato, non come sostituto generalizzato dei trattamenti esistenti.

## Limiti tecnici e aspettative realistiche

---

La catalasi non rimuove direttamente COD, TOC, colore, azoto, fosforo, metalli pesanti o microinquinanti in modo generalizzato. Se dopo un processo ossidativo il COD rimane elevato, la catalasi può eliminare il perossido residuo ma non completare da sola la mineralizzazione. Per contaminanti recalcitranti, le tecnologie di ossidazione avanzata, adsorbimento, fotocatalisi, processi biologici specializzati o trattamenti ibridi restano le opzioni da considerare nel disegno complessivo del processo <sup>[2]</sup>.



**Figure 6.** 실제 카탈라아제 처리 단계는 폐수 흐름과의 적합성, 효과적인 혼합, 충분한 접촉 시간, 산소 관리, 잔류 과산화수소 감소 확인에 달려 있다.

La catalasi non sostituisce un progetto di trattamento. Nei reflui industriali reali, la composizione può variare nel tempo, con picchi di carico organico, salinità, pH, solidi sospesi o composti inibitori. Le tecnologie biofilm-based sono promettenti proprio perché possono offrire maggiore stabilità rispetto a colture disperse, ma anche questi sistemi richiedono gestione delle condizioni operative <sup>[4]</sup>.

L'enzima può essere inattivato. Un eccesso di ossidanti, temperature non compatibili, pH estremi o interazioni con particelle e superfici possono ridurre l'attività disponibile. Questo limite è particolarmente importante in reflui che contengono nanomateriali, microplastiche o adsorbenti, perché l'interazione enzima-superficie può modificare la conformazione o sequestrare parte della proteina <sup>[5]</sup>.

Infine, non bisogna confondere catalasi naturale, catalizzatori inorganici e nanozimi catalase-like. La ricerca sui nanozimi cerca di imitare attività enzimatiche e superare alcuni limiti, inclusa la dipendenza dal pH, ma questi materiali hanno meccanismi, rischi applicativi e requisiti di validazione diversi da un enzima commerciale per uso di processo <sup>[15]</sup>.

## Ricerca emergente: enzimi, materiali e processi ibridi

La direzione più interessante per il futuro non è la catalasi come soluzione isolata, ma la sua integrazione in sistemi ibridi. La ricerca su materiali a base di biochar combinati con ossidazione avanzata dimostra come superfici carboniose, radicali e ossidanti possano essere combinati per migliorare la degradazione di contaminanti acquatici; in tali processi, il controllo dell'ossidante residuo resta una questione pratica <sup>[10]</sup>.

Anche i compositi a base di zeoliti, fotocatalizzatori e adsorbenti vengono studiati per il trattamento di reflui tossici. Questi materiali possono offrire siti di adsorbimento, supporto catalitico e proprietà fotoreattive, ma la loro efficacia dipende da rigenerazione, competizione tra contaminanti e trasferimento di massa [9]. In un sistema di questo tipo, la catalasi potrebbe avere senso solo come fase separata o compatibile dedicata al perossido residuo.

Le tecnologie biologiche avanzate, come bioreattori aerati a membrana, biofilm e sistemi ibridi con controllo digitale, stanno ricevendo attenzione per reflui industriali complessi [11]. La catalasi può inserirsi in queste architetture come elemento di protezione della biomassa quando a monte sono presenti ossidazioni chimiche.

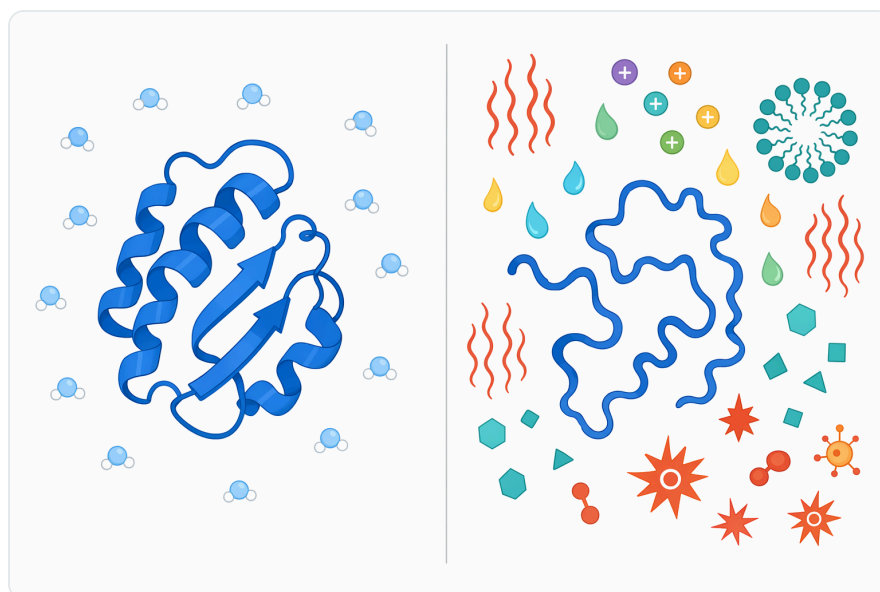


Figure 7. 폐수 조건이 단백질 구조를 손상시키거나 효소 활성 부위를 억제하면 카탈라아제의 성능이 저하될 수 있다.

## Posizionamento del prodotto Enzymes.bio

Per una pagina tecnica B2B, **Catalase Enzyme for Wastewater Treatment** deve essere presentato come enzima per la decomposizione del perossido di idrogeno residuo in processi di trattamento acque. Il messaggio più accurato è: utile dopo trattamenti ossidativi che impiegano \$H\_2O\_2\$, utile prima di fasi biologiche sensibili agli ossidanti, utile quando è necessario ridurre la persistenza del perossido nella corrente trattata.

Enzymes.bio fornisce il prodotto direttamente online in confezione da **1 kg**. Il ruolo di Enzymes.bio è quello di fornitore; non va descritto come produttore, sviluppatore di formulazioni o laboratorio di prova. CoA e SDS accompagnano l'ordine, in modo che l'utilizzatore riceva la documentazione pertinente insieme al prodotto acquistato .

## Sintesi tecnica

---

La catalasi è un enzima specializzato nella decomposizione del perossido di idrogeno in acqua e ossigeno. Nel trattamento delle acque reflue, il suo impiego è più pertinente come fase di controllo del  $H_2O_2$  residuo dopo ossidazione avanzata, disinfezione o processi che usano perossido, soprattutto quando a valle sono presenti biomasse, biofilm, membrane biologiche o valutazioni sensibili agli ossidanti <sup>[1]</sup>.

Il valore operativo della catalasi deriva dalla selettività: non promette la rimozione universale dei contaminanti, ma agisce su un punto critico preciso della filiera. In processi ben progettati, questa funzione può migliorare la compatibilità tra trattamento chimico e biologico, ridurre interferenze da ossidante residuo e rendere più controllabile la transizione tra fasi ossidative e fasi successive <sup>[2]</sup>.

La prestazione reale dipende dalla matrice: pH, temperatura, solidi, metalli, microplastiche, superfici adsorbenti e altri ossidanti possono influenzare l'attività enzimatica. Per questo la catalasi deve essere considerata uno strumento tecnico mirato all'interno di un processo di wastewater treatment più ampio, non una soluzione autonoma per tutti i reflui industriali.

### Ordina Catalase Enzyme For Wastewater Treatment online

Venduto in unità da 1 kg, disponibile a magazzino e pronto per la spedizione. Ordina direttamente dal nostro store: paga online e noi elaboriamo il tuo ordine. Un Certificato di Analisi e una Scheda Dati di Sicurezza sono inclusi in ogni ordine.

[Acquista Catalase Enzyme For Wastewater Treatment →](#)

## Riferimenti

---

Numerati in ordine di prima citazione. Fonti open access, ciascuna verificata come raggiungibile al momento della pubblicazione; i numeri di citazione nel testo rimandano qui.

1. Cui, Z., He, F., Li, X., Li, Y., Huo, C., Wang, H., Qi, Y., ... et al. (2022). Response pathways of superoxide dismutase and catalase under the regulation of triclocarban-triggered oxidative stress in Eisenia foetida: Comprehensive mechanism analysis based on cytotoxicity and binding model. *Science of the Total Environment*, 158821 .
2. Satyam, S., & Patra, S. (2025). The Evolving Landscape of Advanced Oxidation Processes in Wastewater Treatment: Challenges and Recent Innovations. *Processes*.
3. Zhang, M., Ruan, J., Wang, X., Shao, W., Chen, Z., Chen, Z., Gu, C., ... et al. (2023). Selective oxidation of organic pollutants based on reactive oxygen species and the molecular structure: Degradation behavior and mechanism

analysis. *Water Research*, 246, 120697 .

4. Maurya, A., Kumar, R., & Raj, A. (2023). Biofilm-based technology for industrial wastewater treatment: current technology, applications and future perspectives. *World Journal of Microbiology & Biotechnology*, 39.
5. Hu, S., Xu, M., Cui, Z., Xiao, Y., Liu, C., Liu, R., & Zhang, G. (2023). Probing the molecular mechanism of interaction between polystyrene nanoplastics and catalase by multispectroscopic techniques. *Chemico-Biological Interactions*, 110648 .
6. Wen-An, Li, X., Ma, J., & Ma, L. (2023). Advanced treatment of industrial wastewater by ozonation with iron-based monolithic catalyst packing: From mechanism to application. *Water Research*, 235, 119860 .
7. Chang, H., Liu, Y., Keng, C., Jiang, H., & Hu, J. (2024). Challenges of industrial wastewater treatment: utilizing Membrane bioreactors (MBRs) in conjunction with artificial intelligence (AI) technology. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 41, 422 - 427.
8. Badawi, A., Salama, R., & Mostafa, M. (2023). Natural-based coagulants/flocculants as sustainable market-valued products for industrial wastewater treatment: a review of recent developments. *RSC Advances*, 13, 19335 - 19355.
9. Liaquat, I., Munir, R., Abbasi, N. A., Sadia, B., Muneer, A., Younas, F., Sardar, M. F., ... et al. (2024). Exploring zeolite-based composites in adsorption and photocatalysis for toxic wastewater treatment: Preparation, mechanisms, and future perspectives. *Environmental Pollution*, 123922 .
10. Kong, F., Liu, J., Xiang, Z., Fan, W., Liu, J., Wang, J., Wang, Y., ... et al. (2024). Degradation of Water Pollutants by Biochar Combined with Advanced Oxidation: A Systematic Review. *Water*.
11. Dicataldo, G., Desmond, P., Al-Maas, M., & Adham, S. (2025). Feasibility and application of membrane aerated biofilm reactors for industrial wastewater treatment. *Water Research*, 280, 123523 .
12. Sakr, M., Mohamed, M., Maraqa, M., Hamouda, M., Hassan, A. A., Ali, J., & Jung, J. (2021). A critical review of the recent developments in micro–nano bubbles applications for domestic and industrial wastewater treatment. *Alexandria Engineering Journal*.
13. Chakraborty, S., Talukdar, A., Dey, S., & Bhattacharya, S. (2025). Role of fungi, bacteria and microalgae in bioremediation of emerging pollutants with special reference to pesticides, heavy metals and pharmaceuticals. *Discover Environment*, 3.
14. Chen, L., Hai-Shao, Ren, Y., Mao, C., Chen, K., Wang, H., Jing, S., ... et al. (2024). Investigation of the adsorption behavior and adsorption mechanism of pollutants onto electron beam-aged microplastics. *Science of the Total Environment*, 170298 .
15. Feng, K., Wang, G., Wang, S., Ma, J., Wu, H., Ma, M., & Zhang, Y. (2024). Breaking the pH Limitation of Nanozymes: Mechanisms, Methods, and Applications. *Advances in Materials*, 36.
16. Ma, J., Ma, Y., Yu, F., & Dai, X. (2018). Rotating Magnetic Field-Assisted Adsorption Mechanism of Pollutants on Mechanically Strong Sodium Alginate/Graphene/l-Cysteine Beads in Batch and Fixed-Bed Column Systems. *Environmental Science and Technology*, 52 23, 13925-13934 .

## Contatta Enzymes.bio

Hai domande su un ordine? Il nostro team è lieto di aiutarti.


EMAIL [wholesale@enzymes.bio](mailto:wholesale@enzymes.bio)

TELEFONO (USA) **+1 (507) 428-6057**

[Contattaci →](#)

 **400+** Clienti B2B

 **60+** partner di ricerca universitari

 **54** serviti in tutto il mondo

© 2026 Enzymes.bio · Fornitura di enzimi industriali e per la lavorazione alimentare · Non destinato al consumo umano né alla vendita al dettaglio.