

إنزيم الكاتالاز Catalase Enzyme لمعالجة مياه الصرف وإزالة بيروكسيد الهيدروجين المتبقي

فريق الأبحاث في Enzymes.bio · ويلينغتون، نيوزيلندا · June 21, 2026

إنزيم الكاتالاز لمعالجة مياه الصرف هو أداة إنزيمية متخصصة لتفكيك بيروكسيد الهيدروجين المتبقي بعد التبييض أو التعقيم أو التنظيف المؤكسد أو الأكسدة المتقدمة، حيث يحفز تحويل H_2O_2 إلى ماء وأكسجين. أهميته العملية لا تكمن في كونه حلًا شاملًا لكل ملوثات مياه الصرف، بل في إنهاء الأثر المؤكسد لبقايا البيروكسيد قبل التصريف أو قبل المراحل البيولوجية والحساسة للأكسدة^[1]. يتوفر المنتج عبر Enzymes.bio للشراء المباشر عبر الإنترنت بوحدة 1 kg، وتُرفق شهادة التحليل CoA ونشرة بيانات السلامة SDS مع الطلب.

ما وظيفة الكاتالاز في معالجة مياه الصرف؟

يُستخدم **Catalase Enzyme For Wastewater Treatment** عندما تكون المشكلة التشغيلية المحددة هي وجود بيروكسيد الهيدروجين المتبقي في مياه عملية صناعية أو في تيار صرف بعد مرحلة أكسدة. التفاعل المحوري هو:



وهذا يعني أن الإنزيم لا "ينقل" البيروكسيد إلى شكل ملحي آخر ولا يستهلكه عبر اختزال كيميائي تقليدي، بل يسرع تفككه إلى ناتجين بسيطين هما الماء والأكسجين^[1].

هذا الدور يجعل الكاتالاز مناسبًا كخطوة إنهاء بعد استخدام H_2O_2 في التبييض، إزالة اللون، التعقيم، التنظيف المؤكسد، أو بعض عمليات الأكسدة المتقدمة. في هذه المواضع يكون البيروكسيد مفيدًا أثناء مرحلة الأكسدة نفسها، لكنه يصبح غير مرغوب فيه عندما ينتقل التيار إلى صباغة، معالجة بيولوجية، إعادة استخدام، أو تصريف منظم^[2].

من المهم التمييز بين "معالجة مياه الصرف بالإنزيمات" كحل واسع وبين استخدام الكاتالاز تحديدًا. الإنزيمات المؤكسدة مثل اللاكاز والبيروكسيديازات قد تُدرس لإزالة فينولات أو أصباغ أو ملوثات عضوية دقيقة، بينما الكاتالاز موجه أساسًا إلى إزالة H_2O_2 نفسه؛ لذلك يجب عدم تسويقه كحل عام لإزالة المعادن الثقيلة أو الأملاح أو المغذيات أو كل الحمل العضوي^[3].

النتيجة العملية لهذه الدورة أن الإنزيم يعمل كعامل تحفيزي لا كمادة مستهلكة بالطريقة نفسها التي تُستهلك بها المختزلات الكيميائية. لكن كونه بروتينيًا يعني أن أداءه يعتمد على سلامة بنيته الثلاثية، وتوفر موقعه النشط، وعدم وجود ظروف مدمرة للبروتين أو مثبطة للمركز التحفيزي [7].

يمكن ملاحظة تكون الأكسجين أحيانًا على شكل فقاعات عند وجود بيروكسيد متبقٍ وتلامس كافٍ مع الإنزيم. هذا ليس أثرًا جانبيًا غامضًا، بل هو الناتج المتوقع للتفاعل، ولذلك ينبغي التفكير في إدارة الغاز في الأنظمة المغلقة أو خطوط الأنابيب قليلة التنفيس وفق ممارسات السلامة الصناعية المعتمدة في الموقع [1].

موضع الكاتالاز داخل قطار معالجة مياه الصرف

أفضل موضع للكاتالاز هو بعد انتهاء وظيفة بيروكسيد الهيدروجين، لا قبلها. إذا أُضيف الكاتالاز مبكرًا أثناء خطوة أكسدة تعتمد على H_2O_2 ، فسوف يقلل المؤكسد الذي تحتاجه العملية؛ أما إذا أُضيف بعد اكتمال الأكسدة أو التبييض أو التعقيم، فإنه يساعد على إيقاف النشاط المؤكسد المتبقي وتهيئة الماء للخطوة التالية [2].

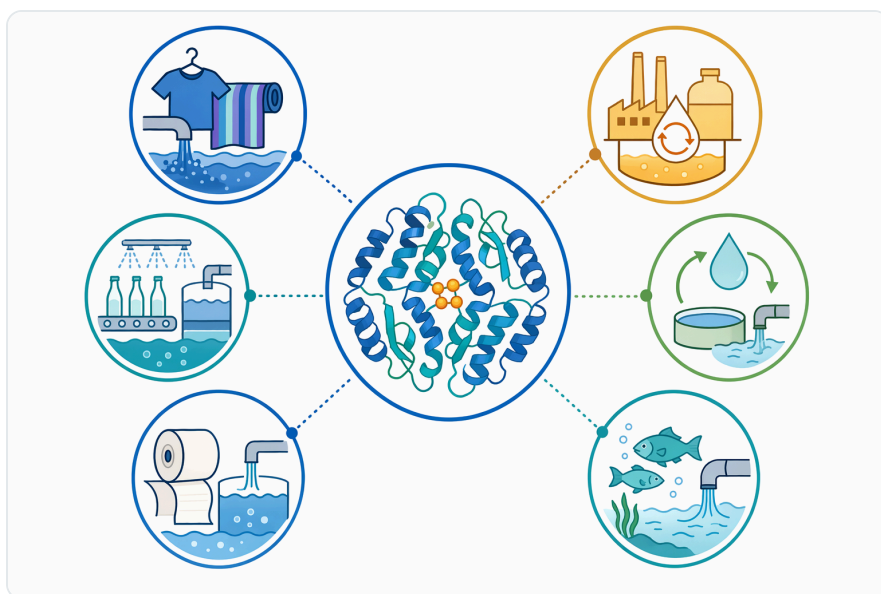


Figure 2. 과산화물이 포함된 폐수는 섬유 표백, 식음료 위생 처리, 유제품 관련 공정수, 펄프·제지 표백, 제약 설비 세정, 병원 소독, 화학적 산화 공정, 산업·용 세정 과정에서 발생할 수 있습니다

في خطوط النسيج، قد يأتي الكاتالاز بعد تبييض الأقمشة بالبيروكسيد وقبل الصباغة أو الشطف النهائي أو إدخال المياه إلى نظام المعالجة. في خطوط الأغذية والمشروبات، قد يظهر الاحتياج بعد استخدام البيروكسيد في تنظيف أو تعقيم مكونات العملية، عندما يلزم تقليل بقايا المؤكسد في ماء الشطف أو مياه الصرف. وفي الصناعات الكيميائية والدوائية، قد يكون دوره بعد تنظيف مؤكسد أو خطوة تفاعل تستخدم H_2O_2 ثم تنتج تيارًا مائيًا يحتاج إلى إزالة المؤكسد قبل المعالجة اللاحقة [8].

في أنظمة الأكسدة المتقدمة، يكون المنطق أكثر حساسية: فالبيروكسيد قد يكون جزءًا من توليد جذور مؤكسدة شديدة الفاعلية، ولذلك لا تُضاف خطوة الكاتالاز إلا بعد أن تؤدي الأكسدة دورها. بهذه الطريقة يصبح الكاتالاز "مفتاح إيقاف" للمؤكسد المتبقي، وليس منافسًا لمرحلة الأكسدة نفسها [9].

مقارنة الكاتالاز بخيارات أخرى لإزالة بقايا H₂O₂

إزالة بيروكسيد الهيدروجين يمكن أن تتم بطرق مختلفة، لكن لكل طريقة أثرها في كيمياء الماء وتشغيل النظام. يوضح الجدول التالي الفروق العملية بين الكاتالاز وبعض البدائل العامة دون الدخول في وصفات تشغيلية أو جرعات محددة.

الموضع الأنسب	القيود العملية	نقاط القوة	آلية العمل العامة	خيار إزالة H ₂ O ₂ المتبقي
بعد التبييض أو التعقيم أو الأكسدة عندما يكون الهدف إزالة البيروكسيد فقط	يتأثر كإنزيم بالظروف القاسية وبعض مثبطات البروتين	لا يضيف أملاحًا ثابتة، ويستهدف البيروكسيد مباشرة	تحفيز تفكك H ₂ O ₂ إلى ماء وأكسجين	الكاتالاز
عند قبول الأثر الكيميائي الإضافي في تصميم المعالجة	قد تضيف أملاحًا أو نواتج ثانوية وتغير كيمياء الصرف	مألوفة في بعض المصانع وسهلة الدمج كيميائيًا	تفاعل اختزال يحول H ₂ O ₂ إلى نواتج أقل أكسدة	المختزلات الكيميائية
عندما تكون بقايا المؤكسد منخفضة والوقت غير حرج	قد يكون بطيئًا أو يستهلك ماءً أو حجم تخزين	بسيط من حيث التجهيز	الاعتماد على التحلل الطبيعي أو خفض التركيز بالتخفيف	الانتظار أو التخفيف
عندما يكون الهدف الأساسي تفكيك ملوثات، لا فقط إزالة H ₂ O ₂	لا تعالج بالضرورة مشكلة البيروكسيد المتبقي كخطوة إنهاء	قد تفيد في تحويل ملوثات أخرى	إدخال المؤكسد ضمن نظام أكسدة أوسع	المعالجة المؤكسدة اللاحقة

توضح المقارنة أن ميزة الكاتالاز ليست أنه "أقوى" من كل البدائل في جميع الحالات، بل أنه أكثر تحديدًا عندما تكون المسألة هي تحييد H₂O₂ دون إضافة عبء ملحي مقصود. هذا يتماشى مع الاتجاه الأوسع في معالجة المياه الصناعية نحو تقليل النواتج الثانوية ودمج العمليات حسب طبيعة الملوث بدل الاعتماد على عملية واحدة لكل الحالات [10].

النسيج والتبييض

في صناعة النسيج، يُستخدم بيروكسيد الهيدروجين على نطاق واسع لتبييض الألياف، خصوصًا عندما يُراد تحقيق بياض مناسب قبل الصباغة أو التشطيب. بعد انتهاء التبييض، تصبح بقايا H_2O_2 غير مرغوبة لأنها قد تؤثر في كيمياء الأصباغ أو في ثبات لون المعالجة اللاحقة، لذلك يُستخدم الكاتالاز كخطوة إزالة للبيروكسيد قبل الانتقال إلى المرحلة التالية [3].

وجود الكاتالاز في هذا السياق يساعد على تقليل الاعتماد على الشطف المطول أو المعادلة الكيميائية الشديدة، مع بقاء القرار التشغيلي مرتبطًا بطبيعة النسيج، وماء العملية، وتسلسل المعالجة. الفكرة التقنية الأساسية هي فصل وظيفة التبييض عن وظيفة الصباغة، بحيث لا يحمل التيار المؤكسد أثرًا متبقيًا إلى مرحلة لا تحتاجه [8].

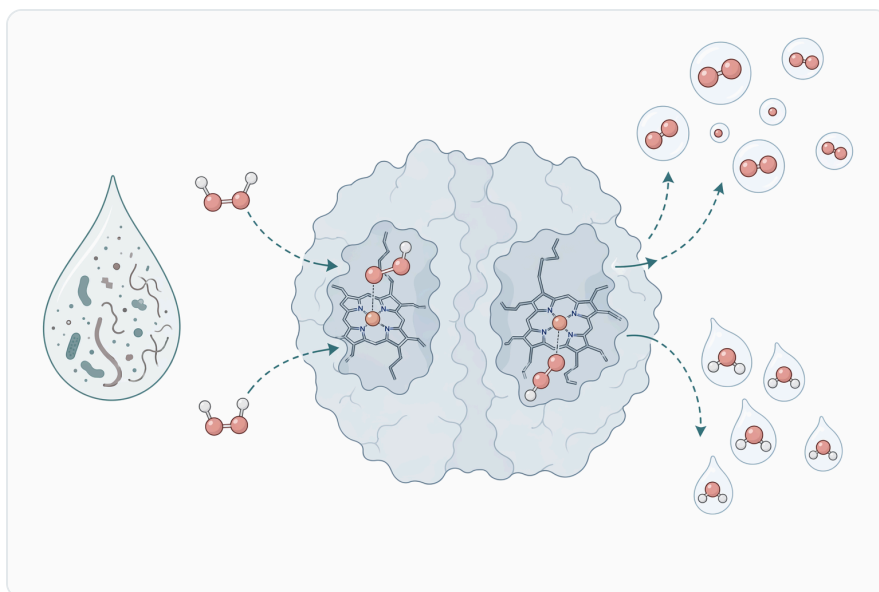


Figure 3. 카탈라아제는 활성 부위를 순환적으로 작동시켜 과산화수소 분자 두 개를 물 분자 두 개와 산소 분자 한 개로 전환합니다.

الأغذية والمشروبات ومياه الشطف

في مصانع الأغذية والمشروبات، قد تظهر بقايا بيروكسيد الهيدروجين في مياه الشطف أو التنظيف أو التعقيم. لا يعني ذلك أن الكاتالاز يُضاف إلى المنتج الغذائي نفسه في هذا السياق، بل إن التركيز هنا على مياه العملية أو مياه الصرف التي تحتاج إلى تقليل المؤكسد قبل تصريفها أو إدخالها إلى معالجة لاحقة [11].

بما أن نظم مياه الصرف في هذه القطاعات غالبًا تعتمد على معالجة بيولوجية أو مزيج من المعالجة الفيزيائية والبيولوجية، فإن إزالة المؤكسد المتبقي قد تساعد في تقليل الضغط التأكسدي غير المرغوب على الكتلة الحيوية. مراجعات تقنيات الأغشية الحيوية والمفاعلات الحيوية تؤكد أن أداء هذه الأنظمة يرتبط باستقرار البيئة الميكروبية وظروف النقل والاختزال داخل النظام [4].

الصناعات الكيميائية والدوائية

في الصناعات الكيميائية والدوائية، قد ينشأ H_2O_2 المتبقي من تنظيف مؤكسد، تعقيم، أو تفاعلات تصنيع تستخدم البيروكسيد كعامل أكسدة. هنا تكون قيمة الكاتالاز في تقليل المؤكسد قبل مراحل مثل المعالجة البيولوجية، الامتزاز، الترشيح الغشائي، أو التصريف ضمن حدود الموقع [12].

لا يحل الكاتالاز محل تقييم السمية أو إزالة المركبات الفعالة دوائيًا أو المذيبات أو الملوثات العضوية الدقيقة. الأدبيات الخاصة بالمعالجة الإنزيمية للملوثات العضوية الدقيقة تبيّن أن تحويل هذه المركبات يحتاج غالبًا إلى إنزيمات أو عمليات أخرى، وأن نواتج التحول والسمية اللاحقة يجب النظر إليها ضمن منظومة المعالجة الكاملة [2].

مياه الصرف بعد الأكسدة المتقدمة

تُستخدم الأكسدة المتقدمة لمعالجة ملوثات مقاومة عبر توليد أنواع تفاعلية قادرة على كسر روابط عضوية معقدة. وعندما يكون H_2O_2 جزءًا من هذا النظام، فإن بقاء جزء منه بعد انتهاء زمن الأكسدة قد يسبب تداخلًا مع معالجة لاحقة أو يغير ميزان الأكسدة في المياه [9].

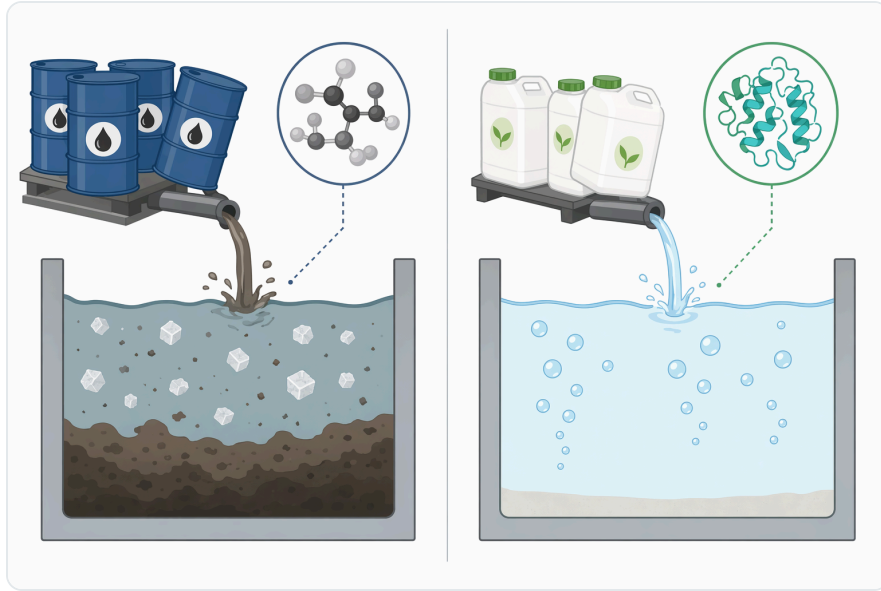


Figure 4. 카탈라아제는 과산화물 제거 반응의 산물이 중화제에서 유래한 용존 잔류물이 아니라 물과 산소라는 점에서 아황산염 계열의 소거 처리와 다릅니다.

في هذا الموضوع، يتيح الكاتالاز إنهاء أثر H_2O_2 بعد اكتمال دور الأكسدة. وهذا مهم خصوصًا عندما تلي الأكسدة مرحلة تعتمد على كائنات دقيقة أو أغشية أو مواد امتزاز قد تتأثر ببيئة مؤكسدة غير مضبوطة [5].

ما الذي يدعمه البحث العلمي فعلاً؟

الدليل الأكثر ثباتًا هو الآلية البيوكيميائية: الكاتالاز إنزيم متخصص في إزالة بيروكسيد الهيدروجين، وتُدرس أنظمتها التحفيزية في سياقات بيولوجية وصناعية بسبب قدرته على التعامل مع H_2O_2 بكفاءة نوعية. كما أن أبحاث هندسة البروتين الحديثة تهتم بتحسين استقرار ونشاط الكاتالاز للتطبيقات الصناعية والحيوية، ما يعكس أهميته العملية خارج السياق الخلوي التقليدي [6].

إلى جانب ذلك، تؤكد مراجعات المعالجة الحيوية الإنزيمية أن الإنزيمات يمكن أن تكون أدوات دقيقة لتفكيك أو تحويل ملوثات معينة، لكنها ليست بديلًا كاملاً عن كل تقنيات معالجة مياه الصرف. قيمة الإنزيم تظهر عندما تُطابق وظيفة الإنزيم مع الملوث أو التفاعل المطلوب، كما هو الحال في مطابقة الكاتالاز مع H_2O_2 [8].

أما في ملوثات مثل الفينولات أو الأصباغ أو المركبات العطرية، فتظهر إنزيمات أخرى مثل اللاكاز والبيروكسيديازات في الأدبيات بشكل أوضح. مراجعات اللاكاز في معالجة مياه الصرف تبيّن قدرة بعض الأكسيديازات على تحويل ملوثات عضوية، لكنها أيضًا تكشف تعقيد مصفوفات المياه الصناعية وحاجة المعالجة إلى تصميم متعدد العمليات [13].

حدود الاستخدام وما لا ينبغي توقعه

لا ينبغي تقديم الكاتالاز كحل لإزالة كل COD أو BOD أو المعادن الثقيلة أو الأملاح أو النيتروجين أو الفوسفور أو الجسيمات الدقيقة. هذه الفئات تحتاج عادةً إلى عمليات مختلفة مثل المعالجة البيولوجية، الترسيب، التخثير، الامتزاز، الأغشية، التحلل الضوئي، أو نظم هجينة حسب طبيعة الصرف [10].

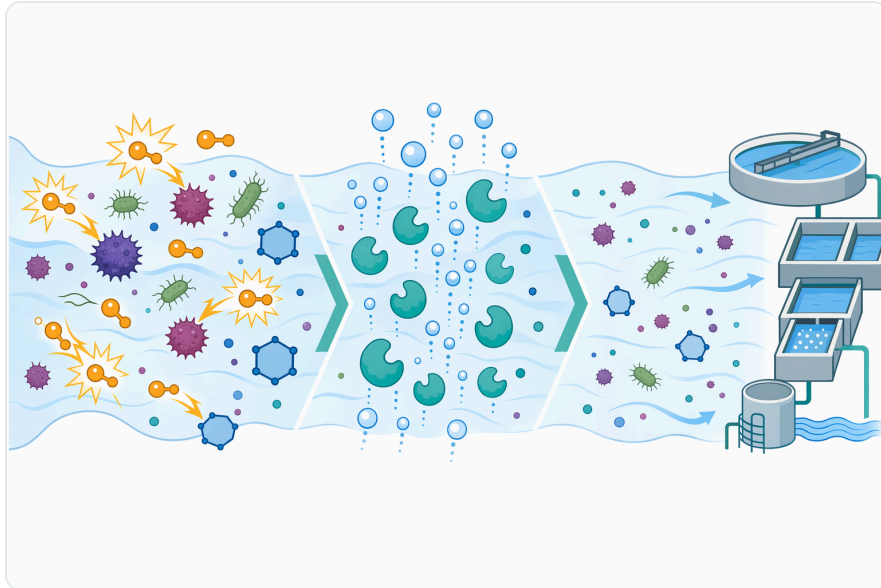


Figure 5. 카탈라아제는 과산화수소의 잔류 산화력을 제거하고 산소를 방출 하지만, 그 자체만으로 다른 폐수 오염물질을 제거하지는 않습니다

كذلك، الكاتالاز ليس مناسبًا إذا كان وجود H_2O_2 مطلوبًا في المرحلة نفسها. فإذا كانت العملية لا تزال تعتمد على البيروكسيد لتفكيك ملوثات أو لتحقيق تعقيم أو تبييض، فإن إضافة الكاتالاز في ذلك الوقت ستعارض هدف العملية. لذلك يكون استخدامه الصحيح بعد اكتمال دور البيروكسيد وليس أثناء الحاجة إليه [2].

من ناحية المصفوفة، يمكن أن تتأثر البروتينات الإنزيمية بالظروف الكيميائية القاسية والمواد التي تغير البنية البروتينية أو تعطل المركز النشط. هذا لا يعني أن كل مياه صرف صناعية تمنع عمل الكاتالاز، بل يعني أن إدخاله يجب أن يتم في نقطة تكون فيها المياه ملائمة نسبيًا لوظيفة إنزيمية، مع تجنب افتراض أداء متماثل في كل تيار صرف [7].

الاعتبارات التشغيلية العامة عند دمج الكاتالاز

أول اعتبار هو التلامس. يحتاج الكاتالاز إلى اختلاط فعلي مع الماء المحتوي على H_2O_2 حتى يصل البيروكسيد إلى المواقع النشطة للإنزيم. ضعف الخلط أو مرور الماء في مناطق ميتة قد يجعل إزالة البيروكسيد غير متجانسة، حتى إذا كان الإنزيم مناسبًا من حيث الوظيفة [1].

ثاني اعتبار هو توقيت الإضافة. في خطوط المعالجة المتتابعة، ينبغي وضع الكاتالاز بعد اكتمال الخطوة المؤكسدة وقبل المرحلة التي لا تتحمل بقايا H_2O_2 . هذا المنطق شائع في تصميم القطارات الهجينة لمعالجة المياه، حيث تُرتب العمليات بحسب الوظيفة: أكسدة، ثم إزالة مؤكسد، ثم معالجة بيولوجية أو فيزيائية أو غشائية [5].

ثالث اعتبار هو إدارة الأكسجين الناتج. تفكك H_2O_2 يحرر O_2 ، وقد يظهر ذلك كفقاعات أو زيادة في الغاز داخل حيز مغلق. لذلك يجب أن تكون المعدات والتهوية وإجراءات السلامة مناسبة لطبيعة النظام، خصوصًا عندما تكون إزالة البيروكسيد في خزان أو خط مغلق [14].

رابع اعتبار هو عدم الخلط بين "إزالة المؤكسد" و"إزالة السمية الكلية". قد تنخفض بقايا H_2O_2 بعد الكاتالاز، لكن الملوثات العضوية أو نواتج الأكسدة أو الأملاح أو المعادن قد تبقى وتتطلب معالجة إضافية. هذا التمييز مهم لأن مراجعات معالجة الملوثات العضوية الدقيقة تشير إلى أن التحول الكيميائي لا يساوي دائمًا إزالة الخطر البيئي بالكامل [2].

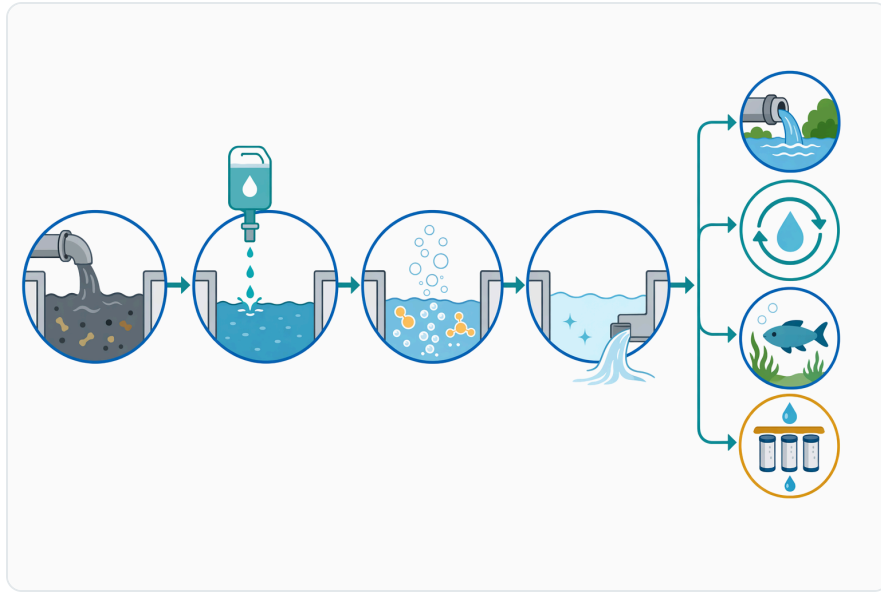


Figure 6. 실제 카탈라아제 처리 단계는 폐수 흐름과의 적합성, 효과적인 혼합, 충분한 접촉 시간, 산소 관리, 잔류 과산화수소 감소 여부 확인에 달려 있습니다.

موقع الكاتالاز ضمن منظومة الاستدامة الصناعية

تتجه معالجة مياه الصرف الصناعية إلى أنظمة مركبة تجمع بين المعالجة البيولوجية، الأغشية، التخثير الكهربائي، الامتزاز، الفقاعات الدقيقة، والعمليات المؤكسدة بحسب طبيعة المياه. لا يوجد مسار واحد يناسب كل المصانع، ولهذا تزداد أهمية الوحدات الوظيفية المتخصصة التي تعالج مشكلة محددة في نقطة محددة [12].

في هذا الإطار، يضيف الكاتالاز قيمة عندما يكون H_2O_2 هو العائق بين مرحلتين. فهو لا يهدف إلى بناء نظام معالجة كامل، بل إلى إزالة مؤكسد متبقّي قد يضعف كفاءة النظام التالي أو يزيد الحاجة إلى شطف وتخفيف. وبما أن ناتج التفاعل هو الماء والأكسجين، فهو خيار متوافق مع مبدأ تقليل الإضافات الكيميائية غير الضرورية عندما تسمح ظروف العملية بذلك [8].

تُظهر مراجعات المعالجة الصناعية الحديثة أيضًا اهتمامًا متزايدًا بالتقنيات الحيوية والأغشية الحيوية والمواد الحيوية، لكن هذه التقنيات تعمل أفضل عندما تكون البيئة الداخلة إليها مستقرة وليست محملة بعوامل مؤكسدة متبقية غير مقصودة. لذلك يمكن أن يكون الكاتالاز خطوة داعمة لهذه الأنظمة بدل أن يكون بديلاً عنها [4].

منتج Enzymes.bio: نطاق الاستخدام وطريقة التوفر

تقدم Enzymes.bio المنتج كموّرد عبر الإنترنت لإنزيم الكاتالاز المخصص لتطبيقات إزالة بيروكسيد الهيدروجين في مياه الصرف ومياه العمليات الصناعية. لا ينبغي فهم ذلك على أنه تصنيع داخلي أو خدمة مختبرية؛ الدور هنا هو توفير المنتج للشراء المباشر عبر منصة إلكترونية، مع معلومات المنتج ووثائق الطلب ذات الصلة.

يُباع المنتج بوحدة 1 kg، وتُرفق شهادة التحليل CoA ونشرة بيانات السلامة SDS مع الطلب. هذه الوثائق تساعد المستخدم الصناعي على إدخال المنتج ضمن نظامه الداخلي للمطابقة والسلامة والتتبع، دون أن تحول صفحة المنتج إلى بروتوكول اختبار أو مواصفة تشغيلية تفصيلية .

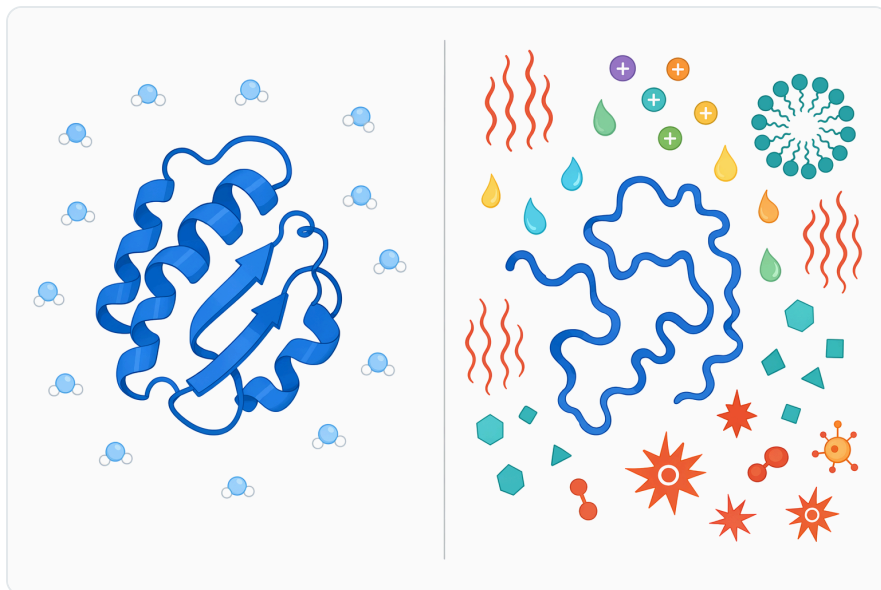


Figure 7. 페수 조건이 단백질 구조를 손상시키거나 효소 활성 부위를 저해하면 카탈라아제의 성능이 저하될 수 있습니다

الاستخدام الأنسب هو عندما يكون لدى الموقع تيار مائي معروف بأنه يحتوي على بقايا H_2O_2 بعد عملية مؤكسدة، وتكون الحاجة هي تقليل هذه البقايا قبل المرحلة التالية. أما إذا كانت مشكلة الصرف الأساسية هي المعادن أو الأملاح أو الملوثات العضوية الدقيقة أو المواد العالقة، فينبغي النظر إلى الكاتالاز كجزء محتمل من منظومة أوسع وليس كحل مستقل [3].

الخلاصة التقنية

إنزيم الكاتالاز لمعالجة مياه الصرف هو حل متخصص لإزالة بيروكسيد الهيدروجين المتبقي عبر تحويله إلى ماء وأكسجين. قوته تكمن في دقة وظيفته: إنهاء الأثر المؤكسد بعد التبييض أو التعقيم أو التنظيف المؤكسد أو الأكسدة المتقدمة، مع تقليل الحاجة إلى إضافة كيمياء مختزلة قد تزيد تعقيد الصرف [1].

الأدبيات العلمية تدعم بوضوح آلية الكاتالاز في تفكيك H_2O_2 ، كما تدعم مراجعات المعالجة الإنزيمية فكرة استخدام الإنزيمات عندما تتطابق وظيفتها مع الملوث أو التفاعل المطلوب. ومع ذلك، لا ينبغي توسيع ادعاء الكاتالاز إلى إزالة كل ملوثات مياه الصرف، لأن المعالجة الصناعية الفعالة غالبًا تحتاج إلى قطار عمليات متكامل [8].

يتوفر Catalase Enzyme For Wastewater Treatment عبر Enzymes.bio للشراء المباشر عبر الإنترنت بوحدة 1 kg، مع إرفاق CoA و SDS مع الطلب. وبذلك يكون مناسبًا للعملاء الذين يحتاجون إلى مدخل إنزيمي واضح الوظيفة لتحديد بقايا بيروكسيد الهيدروجين في مياه الصرف أو مياه العمليات الصناعية ضمن نظام معالجة قائم .

اطلب Catalase Enzyme For Wastewater Treatment عبر الإنترنت

يُباع بوحدة 1 kg، وهو متوفر في المخزون وجاهز للشحن. اطلب مباشرة من متجرنا — ادفع عبر الإنترنت وسنعالج طلبك. تُرفق شهادة التحليل ونشرة بيانات السلامة مع كل طلب.

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

المراجع

مرقمة حسب ترتيب أول اقتباس. مصادر مفتوحة الوصول، تم التحقق من إتاحتها عند النشر؛ وترتبط أرقام الاستشهاد في النص هنا.

1. Gan, J., Ashraf, S., Bilal, M., & Iqbal, H. M. (2022). Biodegradation of environmental pollutants using catalase-based biocatalytic systems. *Environmental Research*, 113914
2. Varga, B., Somogyi, V., Meiczinger, M., Kováts, N., & Domokos, E. (2019). Enzymatic treatment and subsequent toxicity of organic micropollutants using oxidoreductases - A review. *Journal of Cleaner Production*
3. Feng, S., Ngo, H. H., Guo, W., Chang, S. W., Nguyen, D. D., Cheng, D., Varjani, S., ... et al. (2021). Roles and applications of enzymes for resistant pollutants removal in wastewater treatment. *Bioresource Technology*, 335, 125278
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. 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
6. Xu, S., Ya-Chen, Xiang-Meng, Pan, R., Yan, A., Zhi-Li, & Zong-Li (2025). Computational-assisted protein engineering to develop thermostable and highly active catalase for industrial and biocatalytic applications. *Bioresource Technology*, 133081
7. Rakotoarisoa, M., Angelov, B., Espinoza, S., Khakurel, K., Bizien, T., & Angelova, A. (2019). Cubic Liquid Crystalline Nanostructures Involving Catalase and Curcumin: BioSAXS Study and Catalase Peroxidatic Function after Cubosomal Nanoparticle Treatment of Differentiated SH-SY5Y Cells. *Molecules*, 24
8. Kumar, L., & Bharadvaja, N. (2019). Enzymatic bioremediation: a smart tool to fight environmental pollutants. *Smart Bioremediation Technologies*
9. Pichat, P., Guillard, C., Pe'trier, C., & Chopin, T. (1999). Degradation of phenyltrifluoromethylketone in water by separate or simultaneous use of TiO₂ photocatalysis and 30 or 515 kHz ultrasound
10. Shah, A. A., Walia, S., & Kazemian, H. (2024). Advancements in combined electrocoagulation processes for sustainable wastewater treatment: A comprehensive review of mechanisms, performance, and emerging applications. *Water Research*, 252, 121248

- Qiao, L., Han, X., Wang, H., Gao, M., Tian, J., Lu, L., & Liu, X. (2021). Novel alternative for controlling enzymatic browning: Catalase and its application in fresh-cut potatoes. *Journal of Food Science* .11
- 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 .12
- Unuofin, J., Okoh, A., & Nwodo, U. (2019). Aptitude of Oxidative Enzymes for Treatment of Wastewater Pollutants: A Laccase Perspective. *Molecules*, 24 .13
- 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* .14

تواصل مع Enzymes.bio

هل لديك أسئلة حول طلب؟ يسرّ فريقنا مساعدتك.

→ تواصل معنا

الهاتف (الولايات المتحدة) +1 (507) 6057-428

البريد الإلكتروني wholesale@enzymes.bio

54 نخدم العملاء حول العالم

+60 شركاء باحثيون جامعيون

+400 عملاء B2B

© Enzymes.bio 2026 · توريد إنزيمات صناعية & لمعالجة الأغذية · غير مخصص للاستهلاك البشري أو البيع بالتجزئة.