

إنزيم اللاكاز لمعالجة مياه الصرف CAS 80498-15-3: أكسدة الأصباغ والفينولات والملوثات الدقيقة

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

إنزيم اللاكاز لمعالجة مياه الصرف هو محفّز أكسدة-اختزال متعدد النحاس يستخدم الأكسجين الذائب لتحويل طيف من المركبات الفينولية والعطرية وبعض الملوثات الدقيقة إلى نواتج أسهل للمعالجة اللاحقة، لذلك يُستخدم خصوصًا مع مياه الصرف الملونة أو الغنية بالمركبات العضوية الصعبة [1]. تدعم الأدبيات الحديثة تطبيقات اللاكاز في إزالة الأصباغ، وتحويل الفينولات، وتقليل بعض المضادات الحيوية والملوثات العضوية النزرة، مع أفضلية واضحة عند دمجها ضمن منظومة معالجة متكاملة بدل اعتباره حلًا منفردًا لكل أنواع مياه الصرف [2]. يتوفر منتج **Laccase Enzyme For The Treatment Of Wastewater CAS 80498-15-3** عبر Enzymes.bio كمورد للمنتج، ويُباع مباشرة عبر الإنترنت بوحدة 1kg مع إرفاق CoA و SDS مع الطلب .

ما هو إنزيم اللاكاز CAS 80498-15-3 في سياق معالجة مياه الصرف؟

اللاكاز، أو **Laccase enzyme**، هو إنزيم مؤكسيد ينتمي إلى عائلة الأوكسيديزات متعددة النحاس، وتقوم وظيفته الأساسية على نزع إلكترونات من ركائز عضوية قابلة للأكسدة ثم تمريرها إلى الأكسجين الجزيئي. هذه الخاصية تمنحه موقعًا مهمًا في تطبيقات المعالجة البيئية؛ لأن التفاعل لا يعتمد في جوهره على مؤكسد كيميائي قاسٍ، بل على دورة إنزيمية تستخدم الأكسجين كمتقبل نهائي للإلكترونات [3].

في مياه الصرف، لا يُستخدم اللاكاز بوصفه "مادة إزالة عامة"، بل بوصفه محفّزًا حيويًا يستهدف فئات كيميائية محددة، خصوصًا المركبات الفينولية، المشتقات العطرية، بعض الأصباغ الصناعية، وبعض الملوثات الدقيقة ذات البنى القابلة للأكسدة. لذلك يكون أكثر ارتباطًا بتطبيقات مثل معالجة مياه صرف النسيج، تخفيف اللون، معالجة تيارات تحتوي على فينولات أو مركبات مهلجنة، وتحسين قابلية تيارات معينة للترشيح أو الامتزاز أو المعالجة الحيوية اللاحقة [1].

اسم المنتج **Laccase Enzyme For The Treatment Of Wastewater CAS 80498-15-3** يشير إلى تحضير إنزيمي مخصص للاستخدام في معالجة مياه الصرف. وتورد Enzymes.bio هذا المنتج كمورد تجاري عبر الإنترنت، وليست جهة تصنيع أو مختبر تشغيل أو جهة تقدم خدمة اختبار أداء ميداني؛ وتُرفق مستندات CoA و SDS مع الطلب لدعم التوثيق والسلامة في الاستخدام المهني .

لماذا أصبحت معالجة مياه الصرف باللاكاز موضع اهتمام صناعي؟

تزايد الاهتمام باللاكاز لأن كثيرًا من محطات المعالجة التقليدية صُممت أساسًا لتقليل الحمل العضوي القابل للتحلل والمواد العالقة والمغذيات، بينما تظهر اليوم تحديات إضافية مثل الأصباغ الثابتة، بقايا الأدوية، المركبات العطرية، ومركبات العناية الشخصية. هذه الملوثات قد توجد بتركيزات منخفضة لكنها قادرة على إحداث أثر بيئي، وقد لا تزال بكفاءة كافية في المعالجة البيولوجية التقليدية وحدها [4].

في التطبيقات الصناعية، تمثل مياه الصرف الملونة من الصباغة والطباعة والنسيج حالة واضحة؛ إذ تمنح الروابط العطرية والتراكيب الصبغية الجزيئات ثباتًا بصريًا وكيميائيًا يجعل اللون مستمرًا حتى بعد تقليل جزء من الحمل العضوي العام. وقد أظهرت دراسات على معالجة مياه صرف إنتاج الأصباغ المشتتة باستخدام لاکاز فطري أن إزالة اللون قد تتوافق مع خفض السمية البيئية، ما يدعم النظر إلى اللاكاز كخيار نوعي لمعالجة اللون وليس كمجرد إضافة عامة [5].

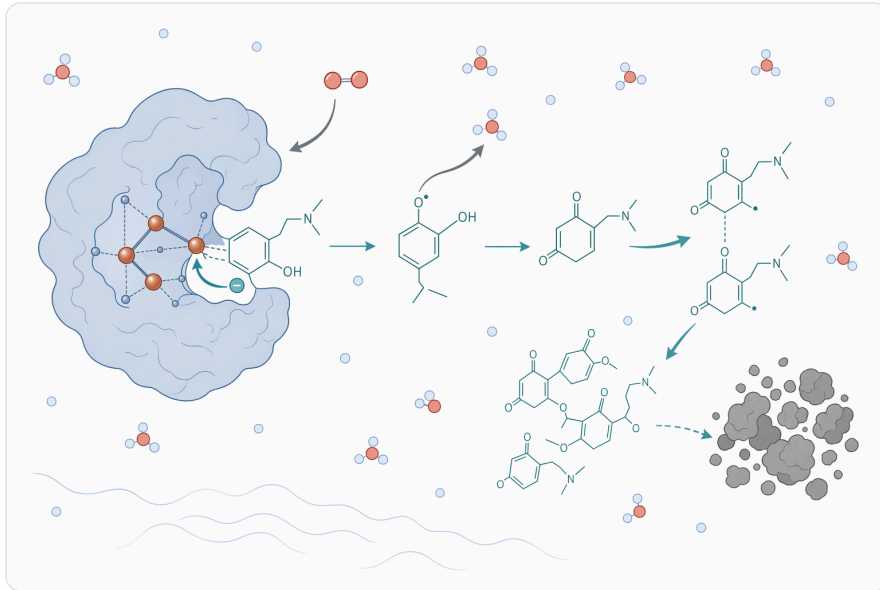


Figure 1. لاکاز هو إنزيم يحفز أكسدة الملوثات العطرية والعضوية في مياه الصرف. أثناء العملية، يتم تحويل الملوثات إلى جزيئات أصغر وأقل سمية، مما يسهل إزالتها من المياه. كما أن الإنزيم يحفز أكسدة الأكسجين، مما يؤدي إلى تكوين أنواع الأكسجين التفاعلية التي تساعد على تكسير الملوثات. هذا يجعل لاکاز خيارًا واعدًا لمعالجة مياه الصرف الصناعية.

تظهر الحاجة أيضًا في تيارات صناعية تحتوي على فينولات ومركبات كلورية عطرية، وهي فئات قد تتسم بالثبات أو السمية أو ضعف القابلية للتحلل. في دراسة تناولت التحول الحيوي لمركب **dichlorophenol-2,4** باستخدام ثقافة بكتيرية مثبتة وإنزيم لاکاز، طُرح اللاكاز ضمن استراتيجية لمعالجة ملوث فينولي مهلجن في مياه الصرف، وهو مثال على توجيه الإنزيم نحو مشكلة كيميائية محددة بدل استخدامه بلا تمييز [6].

أما في مياه الصرف البلدية أو الصحية، فتكمن الأهمية في الملوثات الدقيقة مثل المضادات الحيوية. فقد تناولت دراسة حديثة معالجة **ciprofloxacin** و **norfloxacin** من مياه الصرف باستخدام لاکاز مشتق من مخلفات زراعة الفطر، مع التركيز على مصير المركبات والسمية والنواتج، وهو ما يعكس انتقال البحث من إزالة اللون فقط إلى تقييم تحويل ملوثات دوائية ذات أهمية بيئية [7].

آلية عمل اللاكاز: من مركز النحاس إلى تحويل الملوثات

تبدأ آلية اللاكاز عند موقع نحاسي يستقبل الإلكترونات من الجزيء العضوي القابل للأكسدة. بعد ذلك تنتقل الإلكترونات داخل بنية الإنزيم إلى مجموعة نحاسية أخرى مسؤولة عن اختزال الأكسجين إلى ماء. النتيجة هي تكوين جذور أو نواتج مؤكسدة من الركيزة العضوية، وقد تتفاعل هذه النواتج لاحقًا بالتفكك أو الازدواج أو البلمرة حسب تركيب المركب والوسط المحيط [3].

عند التعامل مع الفينولات، تكون الأكسدة غالبًا أكثر مباشرة؛ إذ يمكن تكوين جذور فينوكسي تتحول إلى ثنائيات أو أوليغومرات أو بوليمرات. من منظور معالجة مياه الصرف، قد يكون ذلك مفيدًا لأن بعض النواتج الأكبر أو الأقل ذوبانية يمكن فصلها لاحقًا بعمليات مثل الترسيب أو الامتزاز أو الترشيح، مع ضرورة تقييم كل حالة لأن التحول لا يعني تلقائيًا اختفاء السمية [1].

المركبات غير الفينولية أو الأصباغ المعقدة قد تحتاج إلى مسارات غير مباشرة. في هذه الحالة تُستخدم أحيانًا أنظمة وسيطة، حيث يؤكسد اللاكاز وسيطًا صغيرًا قادرًا بعد ذلك على أكسدة مركب لا يستطيع الإنزيم الوصول إليه أو أكسدته بكفاءة مباشرة. هذه الفكرة تشرح لماذا قد تختلف نتائج اللاكاز بشدة بين صبغة وأخرى أو بين دواء وآخر؛ فالبنية الإلكترونية وحجم الجزيء وإمكانية وصوله إلى موقع التفاعل كلها عوامل حاسمة [8].

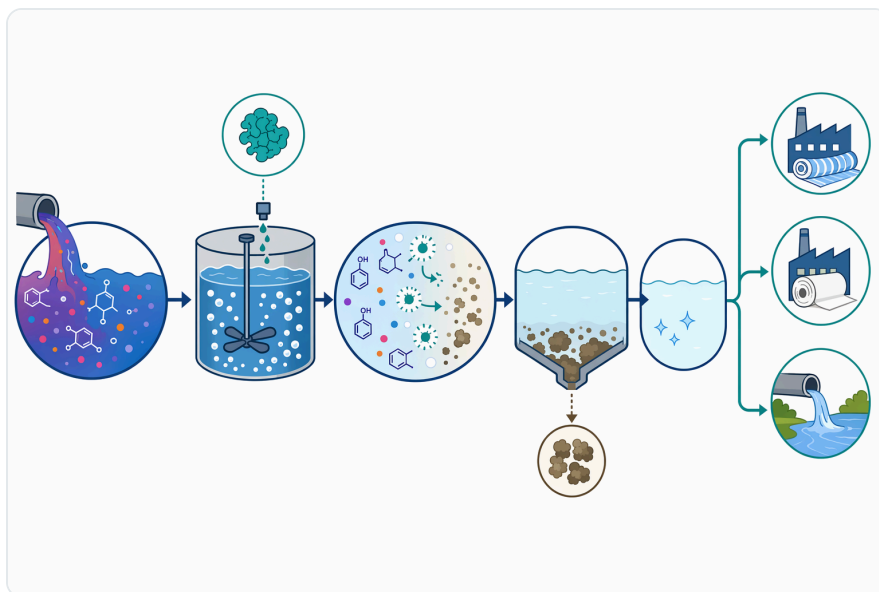


Figure 2. 일반적인 라카아제 폐수 처리 공정에서는 색도와 산화 가능한 유기 오염물질을 줄이기 위해 정화 단계 전에 효소를 투입하고 폭기한다

في المياه الحقيقية، لا يعمل الإنزيم على جزيء منفرد في محلول مثالي، بل يواجه مصفوفة معقدة تحتوي على مواد عضوية طبيعية، أملاح، معادن، مواد سطحية، عوالق، ومركبات قد تنافس الركائز المستهدفة أو تثبط نشاط الإنزيم. لذلك تُظهر الأدبيات اهتمامًا متزايدًا بتثبيت اللاكاز داخل حوامل أو مفاعلات مخصصة لتحسين الاستقرار وإعادة الاستخدام وتقليل فقد الإنزيم في الماء المعالج [2].

الملوثات التي يستهدفها اللاكاز في مياه الصرف

الأصبغ الصناعية ومياه صرف النسيج

الأصبغ، خاصة الأصبغ الآزوية والمشتتة والتفاعلية، تمثل مجالًا قويًا لاستخدام اللاكاز لأن كثيرًا منها يحتوي على بنى عطرية قابلة للتحويل بالأكسدة. في مفاعل غشائي إنزيمي مزود بألياف كهروغزلية، أظهرت المعالجة باللاكاز مع الترشيح الغشائي فعلًا تكامليًا في إزالة أصباغ آزوية، ما يبرز قيمة الجمع بين التحويل الإنزيمي والفصل الفيزيائي بدل الاكتفاء بأحدهما [9].

من الناحية العملية، قد يؤدي اللاكاز إلى تخفيف اللون عبر كسر أو تعديل المجموعات المسؤولة عن الامتصاص اللوني، أو عبر تحويل الجزيئات إلى أشكال أكبر يسهل احتجازها. لكن إزالة اللون لا تكفي دائمًا لإزالة كل الكربون العضوي أو كل السمية؛ لذلك تركز بعض الدراسات الحديثة على السمية البيئية بعد المعالجة، وليس على اللون وحده، كما في معالجة مياه صرف إنتاج الأصبغ المشتتة [5].

الفينولات والمركبات العطرية

الفينولات من الركائز الكلاسيكية للاكاز، ولذلك تظهر في مقدمة التطبيقات البيئية. عندما تحتوي مياه الصرف على فينولات أو مشتقات عطرية قابلة للأكسدة، يمكن للإنزيم توليد نواتج تفاعل تتحول إلى مركبات أقل ذوبانية أو أكثر قابلية للالتقاط في مرحلة لاحقة. هذا مهم في تيارات كيميائية وصناعية لا تستجيب بالضرورة للمعالجة البيولوجية التقليدية بالسرعة المطلوبة [1].

المركبات المهلجنة مثل ثنائي كلوروفينول تطرح تحديًا إضافيًا بسبب ارتباط الثبات الكيميائي بالاستبدالات الكلورية على الحلقة العطرية. لذلك تعد الدراسات التي تجمع اللاكاز مع نظم حيوية أو حوامل تثبيت مهمة لأنها لا تكتفي بإثبات تفاعل مخبري، بل تحاول توجيه التحول الحيوي نحو سيناريو أقرب إلى مياه الصرف المعقدة [6].

المضادات الحيوية والملوثات الدوائية الدقيقة

تظهر المضادات الحيوية في مياه الصرف نتيجة الاستخدام البشري والبيطري والتصريفات الصحية والصيدلانية. وقد حظي اللاكاز باهتمام لأنه يستطيع، في حالات معينة، تعديل بنى دوائية تحتوي على حلقات عطرية أو مجموعات قابلة للأكسدة. دراسة معالجة **ciprofloxacin** و **norfloxacin** باستخدام لأكاز من مخلفات الفطر ركزت على التحلل والسمية، وهي نقطة جوهرية لأن تحويل الدواء لا يكفي وحده إذا بقيت النواتج مؤثرة بيئيًا [7].

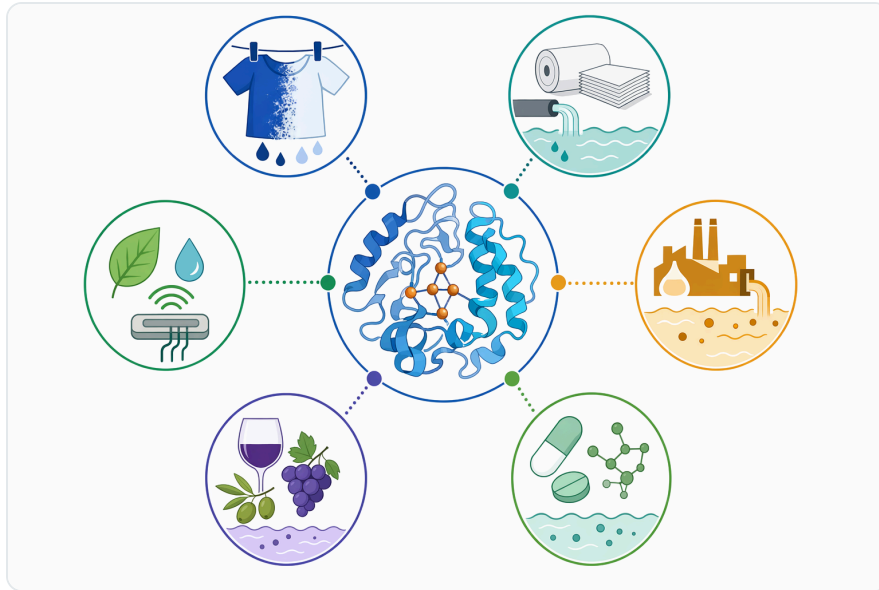


Figure 3. 폐수 처리용 라카아제는 염료, 제지, 페놀성 물질, 농산업 폐수 및 미량 유기 오염물질 처리 등 다양한 분야에 사용된다

كما تناولت مراجعة عن لاکاز فطر **Lentinus edodes** تطبيقه في إزالة تلوث المضادات الحيوية من مياه الصرف، ما يعكس اتساع الاهتمام بمصادر إنزيمية فطرية مختلفة. ومع ذلك، يجب عدم تعميم نتائج المضادات الحيوية على كل الأدوية؛ فكل مركب دوائي يختلف في البنية، وقابلية الأكسدة، ونواتج التحول، والتأثيرات السمية المحتملة^[4].

مركبات ناشئة ومواد عضوية متخصصة

تتوسع تطبيقات اللاكاز إلى ملوثات ناشئة أخرى مثل بعض القنبيدات والمواد العضوية المتخصصة. على سبيل المثال، درست أعمال حول مجاميع إنزيمية متشابكة محسنة استغلال اللاكاز لإزالة **cannabidiol** من مياه الصرف، مع تركيز على تحسين ثبات البنية الإنزيمية، وهو اتجاه يعكس الحاجة إلى حلول أكثر تحملاً في المياه الحقيقية^[10].

في الوقت نفسه، لا تعني قابلية اللاكاز للتعامل مع بعض الملوثات الناشئة أنه مناسب لكل مركب عضوي. فبعض المواد، مثل مركبات معينة عالية القطبية أو ذات بنى لا تتوافق مع آلية الأكسدة، قد تحتاج إلى إنزيمات أخرى أو عمليات مؤكسدة متقدمة أو امتزاز أو أغشية. لذلك يتزايد في الأبحاث مفهوم "سلسلة المعالجة" بدل البحث عن إنزيم واحد يحل كل المشكلات^[11].

اللاكاز الحر واللاكاز المثبت: لماذا يهم شكل التطبيق؟

يمكن استخدام اللاكاز في صورة مذابة أو مثبتة على حامل، ولكل نهج مزايا وقيود. اللاكاز الحر أبسط من حيث الإضافة والخلط، لكنه قد يُفقد مع التيار المعالج، ويتأثر أكثر بالمصفوفة المائية، ويصعب استرجاعه. أما التثبيت فيهدف إلى جعل الإنزيم أكثر قابلية للاحتجاز داخل المفاعل، مع تحسين الاستقرار التشغيلي وإمكانية الاستخدام المتكرر في بعض التصاميم^[2].

تثبيت اللاكاز لا يعني فقط "إلصاق" الإنزيم بسطح؛ فقد يشمل حوامل مغناطيسية، مجاميع إنزيمية متشابكة، أطرًا معدنية عضوية، هياكل نانوية، أو أغشية وظيفية. في دراسة على لاکاز **Trametes versicolor** في صورة مجاميع إنزيمية متشابكة، طُبِق النهج لمعالجة ملوثات عضوية نزره من مياه صرف بلدية، وهو مثال على استخدام التثبيت للتعامل مع تحديات التركيز المنخفض والمصفوفة المعقدة [12].



Figure 4. 더 강한 화학적 산화나 응집 처리와 비교할 때, 라카아제 처리는 더 온화한 조건에서 작동할 수 있으며 색을 유발하는 오염물질을 줄일 수 있다

وتوضح دراسة أخرى تثبيت اللاكاز على جسيمات مغنيتيت نانوية داخل مفاعلات دقيقة مغناطيسية لمعالجة الفينولات والأصبغ ومياه الصرف، ما يبيّن أن التصميم الهندسي للحامل قد يخدم غرضين معًا: زيادة تماس الملوثات مع الإنزيم وتسهيل التحكم بالمحفز داخل النظام [13].

مقارنة تقنية بين صور استخدام اللاكاز في معالجة مياه الصرف

أمثلة بحثية مرتبطة	القيود الفنية المحتملة	نقاط القوة	الفكرة التشغيلية	النهج التطبيقي
مراجعات الجدوى تشير إلى فائده كتحفيز حيوي مع ضرورة ضبط ظروف النظام [1]	صعوبة الاسترجاع، حساسية أعلى للمصفوفة، احتمال فقد الإنزيم مع التصريف	بسيط في الإدخال، مناسب للتقييم الأولي داخل منظومات قائمة	إضافة الإنزيم إلى تيار أو حوض معالجة مع خلط مناسب	اللاكاز الحر
مفاعلات اللاكاز المثبتة طُرحت كاتجاه مهم لمعالجة مياه الصرف [2]	انتقال الكتلة قد يحد الأداء، والحامل قد يؤثر في الوصول إلى الركائز	احتجاز أفضل، إمكانية تحسين الاستقرار وإعادة الاستخدام في بعض التصاميم	ربط الإنزيم أو احتجازه على حامل صلب أو داخل بنية هجينة	اللاكاز المثبت

أمثلة بحثية مرتبطة	القيود الفنية المحتملة	نقاط القوة	الفكرة التشغيلية	النهج التطبيقي
إزالة أصباغ آزوية بمعالجة لأكازية وترشيح غشائي أظهرت أثرًا تكامليًا [9]	قابلية الانسداد، الحاجة إلى توافق بين الغشاء والمياه والإنزيم	يجمع الأكسدة الحيوية مع الاحتجاز أو الفصل	دمج التحويل الإنزيمي مع فصل غشائي للإنزيم أو النواتج	المفاعل الإنزيمي الغشائي
لاكاز مثبت على مغنيتيت لمعالجة الفينولات والأصباغ [13]	تعقيد هندسي أعلى، وضرورة تقييم الحامل بيئيًا وتشغيليًا	تحسين التلامس والتحكم بالمحفز، وتسهيل الفصل في بعض الأنظمة	استخدام حوامل عالية السطح أو قابلة للتحكم المغناطيسي	التثبيت على مواد مغناطيسية أو نانوية
هياكل لأكاز هجينة استخدمت لتحلل مضادات حيوية في مياه صرف حقيقية [14]	تكلفة وتعقيد أعلى، وحاجة لتقييم الأداء في مياه حقيقية	حماية محتملة للإنزيم وزيادة الاستقرار	احتواء الإنزيم داخل بنى غير عضوية/عضوية منظمة	هياكل هجينة مثل MOFs أو nanoflowers

دمج اللاكاز مع تقنيات معالجة أخرى

غالبًا ما تكون أفضل نتائج اللاكاز عندما يُستخدم كجزء من خط معالجة، لا كمرحلة وحيدة. في مياه الصرف الملونة، يمكن أن تأتي المعالجة الإنزيمية قبل الترشيح أو الامتزاز لتعديل الجزيئات الصبغية وجعل احتجازها أسهل. وفي مياه تحتوي على ملوثات دقيقة، قد يُستخدم اللاكاز بعد معالجة أولية تقلل المواد العالقة والحمل العضوي المنافس حتى لا يستهلك الإنزيم على ركائز غير مستهدفة [9].

تُظهر المفاعلات الحيوية المعتمدة على اللاكاز المثبت اتجاهًا عمليًا مهمًا، لأنها تسمح بفصل زمن بقاء الماء عن بقاء المحفز داخل النظام. هذا يعني أن الإنزيم لا يُعامل كمادة تُستهلك بالكامل في كل دفعة، بل كجزء من بنية معالجة قد تُصمم لزيادة الاستفادة منه، مع الانتباه إلى فقد النشاط التدريجي وتراكم المواد على الحامل [2].

يمكن أيضًا دمج اللاكاز مع عمليات أكسدة متقدمة مثل الأوزونة في استراتيجيات متعددة المراحل، لكن وظيفة كل مرحلة تختلف. الأوزونة ذات المحفزات المعدنية تستهدف أكسدة كيميائية قوية للملوثات الصناعية، بينما يقدم اللاكاز أكسدة أكثر انتقائية وحيوية لبعض البنى العضوية. لذلك لا يكون السؤال عادة "أي تقنية أفضل مطلقًا؟"، بل أي ترتيب وتقسيم وظيفي يلائم التيار والمطلوب البيئي [11].

كما ظهرت تقنيات مساعدة مثل الموجات فوق الصوتية لتعزيز المعالجة البيولوجية أو تحسين انتقال الكتلة في المياه. مراجعة حديثة حول تعزيز المعالجة الحيوية للمياه بالموجات فوق الصوتية تُبرز اهتمام المجال بوسائل مساعدة تقلل القيود الفيزيائية والانتقالية، وهي اعتبارات يمكن أن تكون مهمة عند التفكير في أنظمة إنزيمية مدمجة [15].

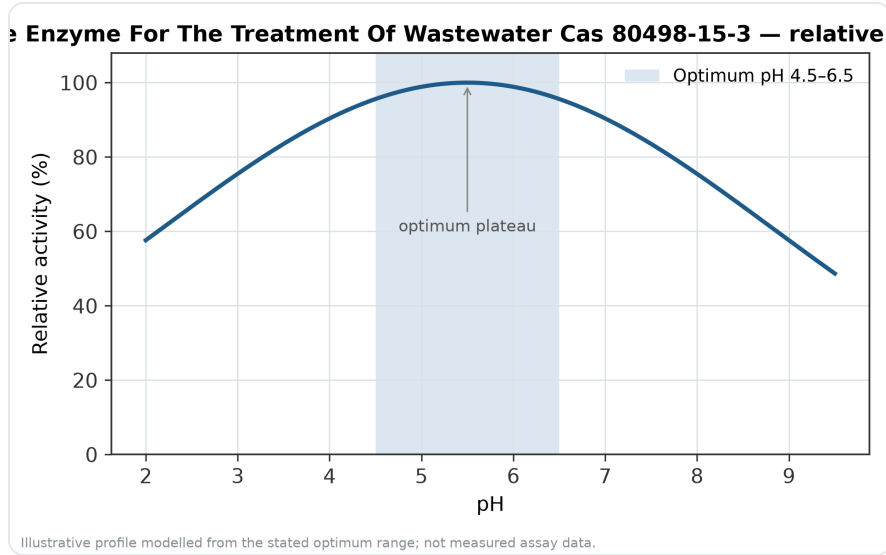


Figure 5. pH에 따른 폐수 처리용 라카아제 효소(CAS 80498-15-3)의 상대 활성으로, pH 4.5~6.5에서 최적 활성 구간이 나타난다

العوامل التي تؤثر في الأداء دون تحويلها إلى وصفة عامة

أول عامل هو طبيعة الملوث نفسه. اللاكاز لا يتفاعل بالطريقة نفسها مع كل مركب عضوي؛ فالفينولات غالبًا أكثر ملاءمة، بينما قد تحتاج الأصباغ والمركبات غير الفينولية إلى وسيط أو إلى زمن تماس أطول أو إلى فصل لاحق. لذلك يجب ربط توقعات الأداء بالبنية الكيميائية وليس باسم فئة الملوث فقط [8].

العامل الثاني هو مصفوفة المياه. وجود مواد عضوية طبيعية أو زيوت أو منظفات أو أملاح أو معادن قد يؤثر في التلامس مع الإنزيم، أو يزاحم الملوث المستهدف، أو يغير مسار النواتج المؤكسدة. مياه الصرف الصناعية خصوصًا تختلف من منشأة إلى أخرى، حتى داخل القطاع نفسه، مما يجعل نتائج الأدبيات مرشدًا علميًا لا ضمانًا تشغيليًا ثابتًا [16].

العامل الثالث هو توفر الأكسجين والتلامس. لأن اللاكاز يستخدم الأكسجين كمستقبل للإلكترونات، فإن تصميم الخلط والتبادل مع الهواء وحجم الجزيئات العالقة يمكن أن يؤثر في كفاءة التحفيز. لكن الحديث هنا يتعلق بالمبدأ التشغيلي العام، لا بتحديد قيم تشغيلية ثابتة؛ فالقيم المناسبة تعتمد على التركيب الفعلي للتيار والتصميم الهندسي للمنظومة [3].

العامل الرابع هو شكل الإنزيم: حر أو مثبت أو محمول على غشاء أو ضمن بنية هجينة. التثبيت قد يحسن الاحتجاز والاستقرار، لكنه قد يضيف مقاومة انتقال كتلة إذا لم تصل الركائز إلى الموقع النشط بكفاءة. لذلك يظهر في الأدبيات اهتمام كبير بمواد مثل الأطر المعدنية العضوية والهياكل النانوية لأنها تحاول تحقيق توازن بين حماية الإنزيم وإتاحة الوصول إلى الملوث [17].

الابتكارات الحديثة: من المخلفات الفطرية إلى المواد الهجينة

من الاتجاهات المهمة استخدام مصادر لاكاز أكثر استدامة، مثل المخلفات الفطرية أو المخلفات الزراعية المرتبطة بزراعة الفطر. دراسة إزالة **ciprofloxacin** و **norfloxacin** باستخدام لاكاز مشتق من مخلفات الفطر توضح هذا الاتجاه؛ إذ يجمع بين valorization لمخلفات حيوية وتطبيق بيئي في معالجة مياه الصرف [7].

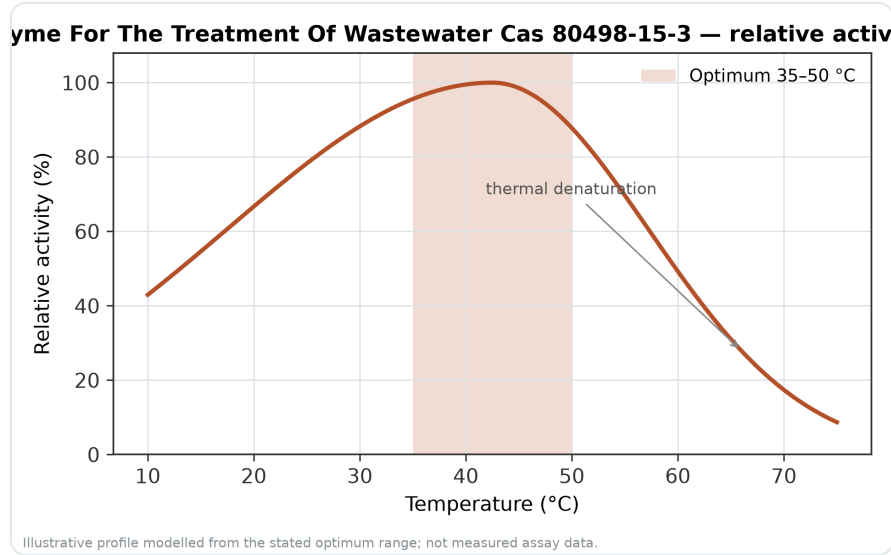


Figure 6. 온도에 따른 폐수 처리용 라카아제 효소(CAS 80498-15-3)의 상대 활성으로, 35~50°C에서 최적 활성을 보이며 최적 온도를 넘으면 열 변성에 따른 전형적인 활성 감소가 나타난다.

اتجاه آخر هو تحسين ثبات اللاكاز عبر التثبيت أو التغليف. فالأطر المعدنية العضوية **enzyme@MOFs** تُدرس على نطاق واسع لأنها تستطيع احتواء الإنزيم داخل بيئة مسامية قد تحميه من الظروف الخارجية وتسمح في الوقت نفسه بمرور الركائز الصغيرة. المراجعات الحديثة حول الإنزيمات المغلفة داخل MOFs تبرز إمكاناتها في التطبيقات الصناعية والصيدلانية والبيئية، مع بقاء الحاجة إلى تقييم الكلفة والاستدامة في التشغيل الحقيقي [17].

هياكل **laccase@Ni₃(PO₄)₂** النانوية الهرمية استُخدمت في تحلل مضادات حيوية مع تطبيق في مياه صرف حقيقية وتقييم للسمية، وهذا مهم لأن كثيرًا من الأدلة القديمة كانت تعتمد على محاليل نموذجية بسيطة. إدخال مياه صرف حقيقية في التقييم يضع الإنزيم أمام مواد متداخلة ومنافسة، وهو ما يقرب النتائج من ظروف الاستخدام الصناعي [14].

كما توسع البحث في اكتشاف لاكازات بكتيرية أو شبيهة باللاكاز عبر التحليل الحاسوبي والميتاجينوميات من بيئات مياه الصرف الصناعية. هذا الاتجاه مهم لأن الإنزيمات الفطرية ليست الخيار الوحيد؛ فقد تقدم الإنزيمات البكتيرية خصائص تشغيلية مختلفة، ويمكن أن تساعد في تصميم تحضيرات أكثر ملاءمة لتيارات صناعية محددة [18].

متى يكون استخدام اللاكاز منطقيًا؟

يكون اللاكاز منطقيًا عندما تكون المشكلة الأساسية مرتبطة بمركبات قابلة للأكسدة الإنزيمية: لون مستمر، فينولات، حلقات عطرية، أو ملوثات دقيقة لها مواقع إلكترونية مناسبة للتحويل. في هذه الحالات، قد يقدم اللاكاز مرحلة انتقائية تساعد على تخفيف الملوث أو تغيير خواصه قبل الفصل أو المعالجة اللاحقة [1].

ويكون منطقيًا أيضًا عندما يراد تقليل الاعتماد على مسارات أكسدة كيميائية شديدة في كل مراحل المعالجة. اللاكاز لا يلغي الحاجة إلى تقنيات أخرى، لكنه يقدم مسارًا حيويًا يمكن أن يعمل في موضع محدد من سلسلة المعالجة، خاصة عندما يكون الهدف تعديل مركبات عضوية معينة لا إزالة كل مكونات التيار دفعة واحدة [8].

في المقابل، لا يكون اللاكاز خيارًا كافيًا إذا كان التحدي الأساسي هو مواد عالقة خشنة، زيوت كثيفة، ملوحة شديدة التأثير، حمل عضوي عام غير محدد، أو ملوثات لا تحتوي على مواقع قابلة للأكسدة المناسبة. هذه الحالات قد تحتاج إلى فصل أولي، معالجة فيزيائية-كيميائية، ترسيب، امتزاز، أغشية، أو عمليات حيوية أخرى قبل التفكير في مرحلة إنزيمية [16].

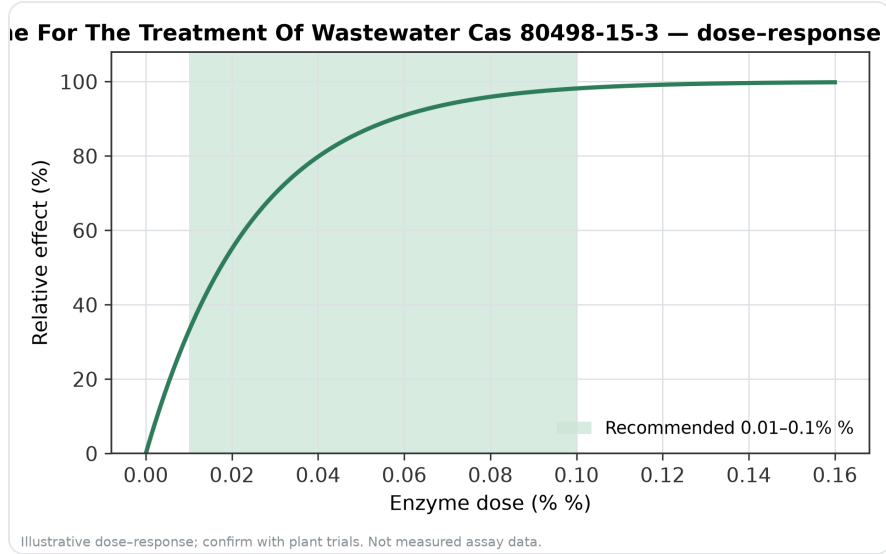


Figure 7. 권장 사용 범위(0.01~0.1%)에서 폐수 처리용 라카아제 효소(CAS 80498-15-3)의 예시적 용량-반응 관계

حدود الاستخدام وما يجب عدم افتراضه

أهم حد يجب توضيحه هو أن اللاكاز لا "يزيل" كل شيء ولا يحوّل مياه الصرف المعقدة تلقائيًا إلى ماء آمن للتصريف. الإنزيم يحفز تفاعلات محددة، وقد يحول الملوث إلى نواتج مختلفة؛ لذلك يجب النظر إلى النتيجة من زاوية اللون، السمية، القابلية للفصل، والقابلية للتحلل، وليس من زاوية اختفاء المركب الأصلي فقط [5].

كما أن نتائج دراسة على صبغة واحدة أو مضاد حيوي واحد لا تعني أداءً مماثلًا مع كل الأصباغ أو كل الأدوية. المركبات الدوائية على سبيل المثال شديدة التنوع من حيث الشحنة، القطبية، الثبات، ومواضع الأكسدة، ولذلك تتعامل المراجعات الحديثة مع اللاكاز كأداة واحدة ضمن صندوق أدوات أكبر لمعالجة ملوثات مياه الصرف، لا كحل

ومن المهم أيضًا الانتباه إلى أن استخدام الوسطاء قد يوسع نطاق تفاعل اللاكاز، لكنه يضيف مادة ووظيفة جديدة إلى النظام. اختبار وسيط غير ملائم قد يغير السمية أو الكلفة أو قابلية التطبيق، ولذلك لا ينبغي افتراض أن كل نظام لاكاز-وسيط مناسب بيئيًا لمجرد أن الإنزيم نفسه محفز حيوي [8].

اعتبارات التوريد والاستخدام المهني عبر Enzymes.bio

تُورد Enzymes.bio منتج **Laccase Enzyme For The Treatment Of Wastewater CAS 80498-15-3** عبر الإنترنت بوحدة **1kg**، مع إرفاق **Certificate of Analysis (CoA)** و **Safety Data Sheet (SDS)** مع الطلب. هذا التوصيف يضع المنتج في سياقه الصحيح: تحضير إنزيمي للاستخدام المهني في تطبيقات معالجة مياه الصرف، وليس خدمة تصنيع مخصصة أو اختبار مخبري أو تصميم محطة معالجة من جهة Enzymes.bio.

من وجهة الاستخدام الصناعي، ينبغي التعامل مع اللاكاز كمكوّن ضمن منظومة تشغيلية. أي أن قرار إدخاله يرتبط بطبيعة مياه الصرف، والملوثات المستهدفة، وشكل المعالجة الحالي، ووجود مراحل لاحقة قادرة على التعامل مع نواتج الأكسدة. وهذا يتوافق مع اتجاه الأدبيات الحديثة التي تركز على المفاعلات الإنزيمية، التثبيت، الأغشية، والهياكل الهجينة بدل الاكتفاء بإضافة الإنزيم إلى ماء صرف معقد دون تصميم [2].

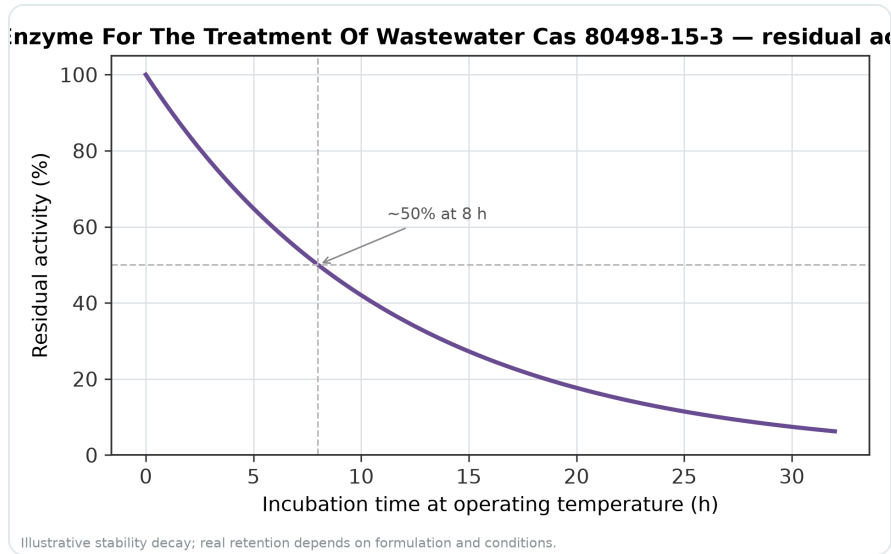


Figure 8. 폐수 처리용 라카아제 효소(CAS 80498-15-3)의 예시적 열 안정성 감소 곡선 — 운전 온도에서 시간이 지남에 따라 잔존 활성이 감소한다

وتساعد وثائق مثل **CoA** و **SDS** في إدارة التوثيق والسلامة وسلسلة الاستلام داخل المنشآت، لكنها لا تعني أن الأداء سيكون موحدًا في كل تيار صرف. الأداء الفعلي يبقى نتيجة لتفاعل خصائص التحضير الإنزيمي مع كيمياء المياه والتصميم التشغيلي والملوثات المستهدفة.

إنزيم اللاكاز لمعالجة مياه الصرف **CAS 80498-15-3** هو محفز حيوي مؤكسد مناسب خصوصًا لتطبيقات الأصباغ، الفينولات، والمركبات العطرية وبعض الملوثات الدقيقة القابلة للأكسدة. قوته تأتي من آلية متعددة النحاس تستخدم الأكسجين لتحويل الركائز العضوية، ومن إمكانية دمجها مع التثبيت أو الأغشية أو الامتزاز أو الأكسدة المتقدمة ضمن سلسلة معالجة أوسع [3].

أقوى مواضع الاستخدام هي تلك التي تكون فيها المشكلة محددة كيميائيًا: لون صناعي مستمر، مركبات فينولية، أو ملوثات دقيقة مدروسة مثل بعض المضادات الحيوية. أما في المياه المختلطة المعقدة، فيجب النظر إلى اللاكاز كمرحلة مساعدة مصممة بعناية، مع تقييم النواتج والسمية والتكامل مع الفصل أو المعالجة اللاحقة [7].

بالنسبة لعملاء B2B، يقدم المنتج عبر Enzymes.bio خيارًا تجاريًا مباشرًا لوحدة **1kg** مع مستندات **CoA** و **SDS** المرفقة بالطلب. وتبقى القيمة التقنية الحقيقية للاكاز في وضعه داخل تطبيق مناسب: أكسدة إنزيمية انتقائية تدعم معالجة مياه الصرف عندما تكون الملوثات المستهدفة متوافقة مع آلية عمله ومتكاملة مع منظومة معالجة مصممة بشكل صحيح .

اطلب 3- عبر الإنترنت Laccase Enzyme For The Treatment Of Wastewater Cas 80498-15-3

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.

→ [اشتر 3- Laccase Enzyme For The Treatment Of Wastewater Cas 80498-15-3](#)

المراجع

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

1. Sutaoney, P., Pandya, S., Gajarwar, D., Joshi, V., & Ghosh, P. (2022). Feasibility and potential of laccase-based enzyme in wastewater treatment through sustainable approach: A review. *Environmental science and pollution research international*, 29, 86499 - 86527.
2. Rodríguez-Couto, S. (2023). Immobilized-laccase bioreactors for wastewater treatment. *Biotechnology Journal*, 19.
3. Sodhi, A. S., Bhatia, S., & Batra, N. (2024). Laccase: Sustainable production strategies, heterologous expression and potential biotechnological applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 135745.

- Reza, M. A. S., Rasouli, A., & Darvish, A. (2023). A Brief Review on Laccase Enzyme From the Edible Mushroom *Lentinus edodes* and its Applications in Decontamination of Antibiotics from Wastewater. *Archives of Hygiene Sciences*
- Wang, B., Chen, Y., Guan, J., Ding, Y., He, Y., Zhang, X., Shukurov, N., ... et al. (2022). Biodecolorization and Ecotoxicity Abatement of Disperse Dye-Production Wastewater Treatment with *Pycnoporus* Laccase. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19
- Farag, A. M., El-Naggar, M. Y., & Ghanem, K. (2022). 2,4-Dichlorophenol biotransformation using immobilized marine halophilic *Bacillus subtilis* culture and laccase enzyme: application in wastewater treatment. *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*, 20
- Ghose, A., Nuzelu, V., Gupta, D., Kimoto, H., Takashima, S., Harlin, E. W., Ss, S., ... et al. (2024). Micropollutants (ciprofloxacin and norfloxacin) remediation from wastewater through laccase derived from spent mushroom waste: Fate, toxicity, and degradation. *Journal of Environmental Management*, 366, 121857
- Younus, H., Khan, M. A., Khan, A., & Alhumaydhi, F. (2025). Eco-Friendly Biocatalysts: Laccase Applications, Innovations, and Future Directions in Environmental Remediation. *Catalysts*
- Jankowska, K., Su, Z., Zdarta, J., Jesionowski, T., & Pinelo, M. (2022). Synergistic action of laccase treatment and membrane filtration during removal of azo dyes in an enzymatic membrane reactor upgraded with electrospun fibers. *Journal of Hazardous Materials*, 435, 129071
- Ariste, A., Haroune, L., Saibi, S., & Cabana, H. (2021). Enzyme polymer engineered structure strategy to enhance cross-linked enzyme aggregate stability: a step forward in laccase exploitation for cannabidiol removal from wastewater. *Environmental science and pollution research international*, 28, 44051 - 44063
- 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
- George, J., Rajendran, D., Venkataraman, S., Rathankumar, A., Saikia, K., Muthusamy, S., Singh, I., ... et al. (2022). Insolubilization of *Trametes versicolor* laccase as cross-linked enzyme aggregates for the remediation of trace organic contaminants from municipal wastewater. *Environmental Research*, 112882
- Peñaranda, P. A., Noguera, M. J., Florez, S., Hussler, J., Ornelas-Soto, N., Cruz, J., & Osma, J. (2022). Treatment of Wastewater, Phenols and Dyes Using Novel Magnetic Torus Microreactors and Laccase Immobilized on Magnetite Nanoparticles. *Nanomaterials*, 12
- Jafari-Nodoushan, H., Fazeli, M., Faramarzi, M., & Samadi, N. (2023). Hierarchically-structured laccase@Ni₃(PO₄)₂ hybrid nanoflowers for antibiotic degradation: Application in real wastewater effluent and toxicity evaluation. *International Journal of Biological Macromolecules*, 123574
- Wen, H., Cheng, D., Chen, Y., Yue, W., & Zhang, Z. (2024). Review on ultrasonic technology enhanced biological treatment of wastewater. *Science of the Total Environment*, 171260
- Mishra, B., Kallem, P., Yadavalli, R., Mandal, S. K., Reddy, C. N., Sumithra, B., Lakshmayya, N., ... et al. (2025). Industrial wastewater treatment using extracellular polymer substances/bioflocculants: a review. *Applied Water Science*, 15
- Jaividhya, P., Pandian, M., Uthra, K. T., Chitra, V., & Pazhani, G. P. (2025). Encapsulated enzyme with metal-organic frameworks (enzyme@MOFs): unlocking potential in pharmaceutical and industrial applications.

Cui, T., Kushmaro, A., Barak, H., Poehlein, A., Daniel, R., & Mägert, H. (2025). Enhanced discovery of bacterial laccase-like multicopper oxidase through computer simulation and metagenomic analysis of industrial wastewater. *FEBS Open Bio*, 15, 1090 - 1102

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.