الزيلاناز القلوي الصناعي لمعالجة اللب والورق: تعزيز التبييض الحيوي وتقليل العبء الكيميائي

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

الإجابة المباشرة: الزيلاناز القلوي الصناعي هو إنزيم يُستخدم في مصانع اللب والورق كمرحلة مساعدة قبل التبييض أو ضمن برامج تعزيز التبييض الحيوي، إذ يحلل الزيلان والهيميسليلوز السطحيين حول ألياف السليلوز فيجعل اللب أكثر نفاذية لمواد التبييض. لا يعمل الإنزيم كبديل كامل لكيمياء التبييض، بل كعامل انتقائي يحسن قابلية اللب للتبييض وقد يساعد في خفض استهلاك المواد المؤكسدة ومؤشرات الحمل البيئي مثل المركبات العضوية المكلورة في ظروف تشغيل مناسبة [1].

ما هو الزيلاناز القلوي الصناعي في سياق اللب والورق؟

الزيلاناز هو إنزيم كربوهيدرازي يحفّز تفكيك الزيلان، وهو مكوّن رئيسي من الهيميسليلوز في الجدران الخلوية النباتية. في اللب الخشبي لا يوجد الزيلان عادةً كمادة حرة مستقلة، بل يرتبط ببنية ألياف السليلوز وبقايا اللجنين ومكوّنات الجدار الخلوي، ولذلك فإن تأثير الزيلاناز في صناعة اللب والورق يرتبط بتعديل البنية السطحية والداخلية الدقيقة للألياف أكثر من ارتباطه بإزالة كتلة كبيرة من المادة الخام [1].

وصف الإنزيم بأنه "قلوي" يعني أنه موجه للتوافق مع بيئات معالجة اللب التي تميل إلى القلوية أو القريبة من ظروف خطوط اللب الصناعية، بخلاف زيلانازات أخرى تُستخدم في تطبيقات غذائية أو أعلافية أو تخميرية. هذه الخاصية مهمة لأن لب الكرافت ومراحل الغسل والتحضير للتبييض لا تشبه بيئات التطبيقات الغذائية الحمضية، كما أن إدخال إنزيم يحتاج إلى تعديل حاد في ظروف اللب قد يزيد التعقيد التشغيلي بدل أن يقلله [2].

في تطبيقات الورق، لا تكون وظيفة الزيلاناز الأساسية "تبييض" اللب بمعنى أكسدة الكروموفورات مباشرةً، بل "تعزيز التبييض" عبر إزالة أو تفكيك جزء من الزيلان الذي يحدّ من وصول مواد التبييض إلى اللجنين المتبقي والمواد الملونة. لهذا السبب تُستخدم عبارة **bio-bleaching** أو **bleach boosting** لوصف دوره: مرحلة حيوية انتقائية تجعل الكيمياء اللاحقة أكثر كفاءة، لا مرحلة كيميائية مؤكسدة مستقلة [3].

لماذا يعيق الزيلان التبييض في لب الكرافت؟

أثناء طبخ الكرافت وما يليه من غسل، قد يُعاد ترسيب جزء من الزيلان أو يتوزع على أسطح الألياف بطريقة تؤثر في المسامية والنفاذية. هذا الزيلان السطحي يمكن أن يعمل كطبقة حاجزة دقيقة تحدّ من انتشار مواد التبييض إلى مواضع اللجنين المتبقي داخل الجدار الليفي، كما قد يعيق خروج نواتج الأكسدة والتحلل من داخل الألياف إلى

الوسط المحيط [4].

تزداد أهمية هذه المشكلة عندما يكون هدف المصنع الوصول إلى سطوع محدد مع تقليل عبء المواد الكيميائية. فرفع جرعات مواد التبييض ليس دائمًا حلًا مثاليًا؛ لأنه قد يزيد تكلفة التشغيل، ويرفع حمل مياه الصرف، وقد يؤثر في خصائص اللب إذا لم تُدار العملية بدقة. الزيلاناز يقدم مسارًا مختلفًا: لا يهاجم الهدف اللوني مباشرة، بل يحسن البنية التي تتحكم في وصول الكيمياء إلى ذلك الهدف [5].

كما أن بعض البنى المرتبطة بالزيلان، ومنها المجموعات المتكوّنة أثناء الطبخ القلوي، يمكن أن تستهلك مواد مؤكسدة في مراحل التبييض. لذلك فإن تفكيك أجزاء مختارة من الزيلان قد يقلل جزءًا من الطلب الكيميائي غير المنتج، أي الطلب الذي لا يذهب مباشرة إلى إزالة اللون أو اللجنين المرغوب إزالته [1].

آلية العمل: ماذا يفعل الزيلاناز داخل الألياف؟

على المستوى الجزيئي، يقطع الزيلاناز روابط في سلاسل الزيلان، فيحوّل جزءًا من البوليمر الهيميسليلوزي إلى سلاسل أقصر وأكثر قابلية للذوبان أو الإزالة بالغسل. عندما يحدث ذلك في الموضع الصحيح وبدرجة مناسبة، تنخفض كثافة الطبقة الهيميسليلوزية حول الألياف وتتحسن المسارات المجهرية التي تسمح بانتشار مواد التبييض داخل اللب [1].

هذا التأثير يشبه فتح منافذ دقيقة في بنية ليفية كانت محجوبة جزئيًا. فبدل أن تعتمد مواد التبييض على الانتشار خلال سطح مغطى بالزيلان، تصبح قادرة على الوصول بصورة أفضل إلى اللجنين المتبقي والمواد المسببة للون. ولذلك تُسجل دراسات التبييض الحيوي عادةً تحسنًا في قابلية التبييض أو انخفاضًا في الحاجة إلى كيمياء لاحقة عند ملاءمة نوع اللب والظروف التشغيلية [3].

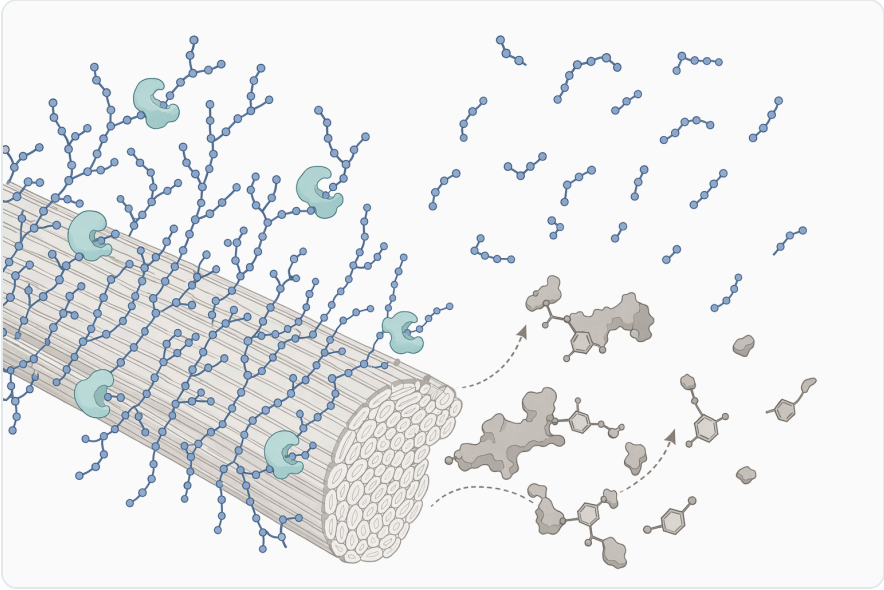

Figure 1. 알칼리성 자일라나아제는 섬유 표면에 결합된 자일란을 가수분해하여, 이후의 표백 또는 세정 화학 처리가 섬유에 결합된 리그닌과 오염물질에 더 효과적으로 접근할 수 있게 합니다.

الميزة الحاسمة هنا هي الانتقائية. في صناعة الورق يراد الحفاظ على السليلوز لأنه العمود البنيوي لقوة الورق، بينما يكون المطلوب تعديل الزيلان والهيميسليلوز بقدر يخدم التبييض. لذلك تُعد مستحضرات الزيلاناز منخفضة النشاط السليولازي، أو الخالية عمليًا من التأثير السليولازي غير المرغوب، أكثر ملاءمة لتطبيقات اللب؛ وقد ركزت دراسات على زيلانازات قلوية خالية من السليولاز أو مناسبة للّب والورق لهذا السبب [2].

لماذا لا يكفي أي زيلاناز عام؟

ليست كل زيلانازات السوق مناسبة لمعالجة اللب. فالتطبيقات الغذائية أو العلفية أو المخبرية قد تتطلب ملفات أداء مختلفة تمامًا من حيث الوسط، الثبات، المكونات المصاحبة، ومدى تحمل الظروف القلوية. أما في اللب والورق، فيجب أن يعمل الإنزيم في وسط غني بالألياف والمواد الذائبة والقلوية المتبقية، وأن يؤدي وظيفة محددة دون إضعاف السليلوز أو إحداث تغير غير مرغوب في خصائص اللب [6].

الزيلاناز القلوي الصناعي المناسب لهذا التطبيق يجب أن يكون متوافقًا مع مرحلة ما قبل التبييض، حيث تكون الألياف قد خرجت من الطبخ والغسل لكنها لم تدخل بعد كامل تسلسل التبييض الكيميائي. كلما كان الإنزيم قادرًا على العمل ضمن نافذة تشغيلية قريبة من ظروف المصنع، انخفضت الحاجة إلى تعديلات كبيرة في خط الإنتاج، مثل تحولات حادة في الحموضة أو خطوات تحضير إضافية قد تزيد استهلاك الماء والطاقة [4].

كذلك، يجب النظر إلى الإنزيم كجزء من نظام وليس كمادة منفردة. فنتيجة الزيلاناز تعتمد على نوع الخشب، نسبة الزيلان، شدة الطبخ، جودة الغسل، اتساق اللب، ترتيب مراحل التبييض، وهدف السطوع النهائي. لهذا السبب قد تكون الاستجابة واضحة في لب معين ومحدودة في لب آخر، حتى عند استخدام إنزيم من الفئة نفسها [5].

موقع الزيلاناز في تسلسل معالجة اللب

يُستخدم الزيلاناز عادةً بعد الطبخ والغسل وقبل مراحل التبييض الكيميائي الأساسية. في هذا الموضع يكون اللب قد احتفظ بجزء من الهيميسليلوز واللجنين المتبقي، كما تكون هناك فرصة لتعديل نفاذية الألياف قبل أن تُستهلك كميات كبيرة من مواد التبييض. لذلك تُعد مرحلة المعالجة الإنزيمية "تحضيرًا وظيفيًا" للّب أكثر من كونها مرحلة تبييض نهائية [7].

في تسلسلات ECF التي تستخدم مواد تبييض قائمة على مركبات غير الكلور العنصري، يمكن للزيلاناز أن يدعم خفض الطلب على المواد المؤكسدة أو تحسين السطوع عند ثبات بقية العوامل. وقد تناولت دراسات تطبيق زيلاناز من مصادر بكتيرية في تبييض لب قش القمح ضمن تسلسلات ECF، وهو مثال على أن التقنية لا تقتصر على لب الأخشاب التقليدية فقط، بل يمكن أن تمتد إلى خامات ليفية مختلفة إذا كانت البنية الهيميسليلوزية مناسبة [3].

أما في لب الورق المعاد تدويره أو لب المخلفات الورقية، فقد دُرست زيلانازات قلوية في سياق تحسين التبييض أو إعادة معالجة الألياف. هنا تكون الخلفية مختلفة عن لب الكرافت البكر، لأن الألياف تعرضت سابقًا لتجفيف وإضافات ومواد طباعة، لكن مبدأ تعديل الهيميسليلوز وتحسين قابلية المعالجة يبقى ذا صلة عندما يكون الزيلان أو مكونات السطح عاملًا مؤثرًا [4].

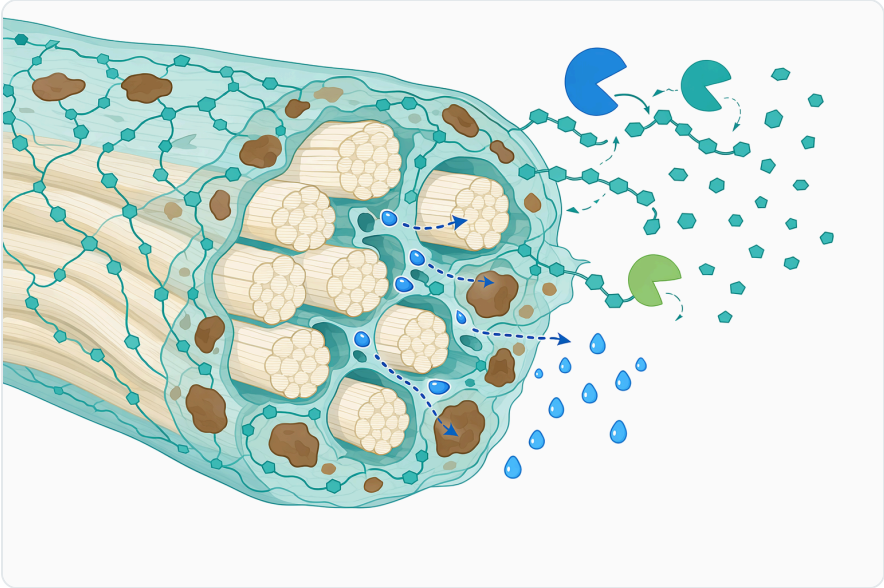

Figure 2. 섬유 수준에서 자일라나아제는 리그닌을 직접 산화하거나 셀룰로 .오스를 분해하는 것이 아니라 헤미셀룰로오스에 작용합니다

مقارنة عملية بين الزيلاناز وخيارات حيوية وكيميائية أخرى

النهج المستخدم في اللب والورق	الهدف المباشر	نقاط القوة	الحدود العملية	موقع الزيلاناز ضمن القرار الفني
الزيلاناز القلوي	تفكيك الزيلان والهيميسليلوز السطحيين لتحسين نفاذية الألياف	انتقائي للزيلان، يدعم تعزيز التبييض، ويمكن أن يقلل العبء الكيميائي عند ملاءمة اللب	لا يؤكسد اللجنين مباشرة ولا يستبدل كامل تسلسل التبييض	مناسب كمرحلة قبل التبييض لتحسين قابلية اللب للمعالجة اللاحقة [1]
كيمياء التبييض المؤكسدة	إزالة اللون وأكسدة اللجنين والكروموفورات	فعالية مباشرة وقابلة للدمج في خطوط قائمة	قد ترفع التكلفة والحمل البيئي إذا زادت الجرعات أو أسيء التحكم	يعمل الزيلاناز على جعل هذه الكيمياء أكثر كفاءة لا على إلغائها [3]
إنزيمات تعديل اللجنين مثل اللاكاز	التأثير في بنى اللجنين والمواد الفينولية	مفيدة في أبحاث الإنتاج الأنظف وتعديل اللجنين	تعتمد على وسطاء وظروف محددة وقد تكون أكثر تعقيدًا	تختلف وظيفيًا عن الزيلاناز؛ الهدف هنا الزيلان لا اللجنين مباشرة [8]
السليولاز	تفكيك السليلوز أو تعديل سطح الألياف	قد يفيد في تطبيقات معينة مثل إزالة الأحبار أو تعديل الألياف	نشاطه غير المرغوب قد يضعف السليلوز ويؤثر في قوة اللب	في التبييض الحيوي للّب البكر يُفضّل تجنب نشاط سليولازي زائد [9]

توضح المقارنة أن الزيلاناز ليس منافسًا مباشرًا لكل أدوات التبييض، بل أداة متخصصة في إزالة عائق بنيوي دقيق. عندما يكون العائق الأساسي مرتبطًا بالزيلان السطحي أو بالهيميسليلوز الذي يحجب النفاذية، يكون الزيلاناز منطقيًا؛ أما عندما تكون المشكلة مرتبطة بلجنين مقاوم أو كروموفورات لا تصلح إلا للأكسدة، فستظل الكيمياء أو إنزيمات أخرى أكثر صلة [8].

الأدلة البحثية على دور الزيلاناز في التبييض الحيوي

تقدم مراجعات الزيلاناز الحديثة أساسًا علميًا واضحًا لتطبيقه كحفاز حيوي في صناعات متعددة، ومنها اللب والورق. وتربط هذه المراجعات بين بنية الزيلان، مصادر الإنزيم، وأنماط عمله وبين قدرته على تحسين عمليات صناعية تعتمد على تفكيك الهيميسليلوز، وهو ما يفسر انتقاله من نطاق البحث إلى تطبيقات صناعية في التبييض الحيوي [1].

أظهرت دراسات على زيلانازات قلوية من كائنات مختلفة، مثل أنواع فطرية وبكتيرية، إمكانية استخدامها في تحسين تبييض اللب أو خفض عبء المواد الكيميائية اللاحقة. فالدراسات التي تناولت زيلاناز من *Trichoderma reesei* في تبييض لب الورق المعاد تدويره، أو زيلاناز من *Trichoderma asperellum* في التبييض الحيوي، تدعم الفكرة العامة بأن إزالة الزيلان يمكن أن تترجم إلى تحسن عملي في قابلية اللب للتبييض [4].

كما أن دراسات أخرى على إنتاج زيلاناز قلوي من مصادر فطرية مثل *Melanocarpus albomyces* أو *Penicillium* ربطت بين إنتاج الإنزيم وتطبيقه في صناعة اللب والورق. أهمية هذه الدراسات ليست في نقل شروطها كما هي إلى كل مصنع، بل في إظهار أن عائلات مختلفة من الزيلاناز يمكن أن تحقق وظيفة صناعية متقاربة عندما تتوفر لها ملاءمة قلوية وانتقائية مناسبة [7].

توجد أيضًا أمثلة بحثية على زيلانازات بكتيرية قلوية مستقرة ومناسبة لصناعة الورق، ومنها زيلاناز من *Bacillus* وُصف بأنه قلوي وخالٍ من السليولاز ومناسب للّب والورق. هذا النوع من النتائج يبرز سبب الاهتمام الصناعي بزيلانازات لا تهاجم السليلوز بصورة مؤذية، لأن جودة الألياف لا تقل أهمية عن السطوع النهائي [2].

ما الفوائد التي يمكن توقعها عند الاستخدام الملائم؟

الفائدة الأولى هي تحسين قابلية اللب للتبييض. عندما يقل حاجز الزيلان السطحي، تصبح مواد التبييض أكثر قدرة على الانتشار داخل الألياف والتفاعل مع اللجنين المتبقي والمواد الملونة. هذا قد يظهر في صورة سطوع أعلى عند تسلسل كيميائي ثابت، أو في صورة قدرة على الحفاظ على السطوع المستهدف مع عبء كيميائي أخف [3].

الفائدة الثانية هي خفض استهلاك بعض مواد التبييض عند توافق نوع اللب والعملية. لا يعني ذلك أن النتيجة مضمونة بنفس المقدار في كل خط، بل إن الإنزيم يخلق فرصة عملية لتقليل الاعتماد على الزيادة الكيميائية كخيار وحيد. لذلك تستخدمه المصانع عادةً ضمن برنامج تحسين تسلسل التبييض لا كإضافة عشوائية منفصلة [6].

الفائدة الثالثة هي تقليل بعض مؤشرات الحمل البيئي المرتبطة بتسلسلات التبييض التي تولّد مركبات عضوية مكلورة. إذا ساعد الزيلاناز في تقليل كمية المواد الكلورية أو تحسين كفاءتها، فقد ينعكس ذلك على حمل مياه الصرف، خصوصًا في مؤشرات مثل AOX. هذا الارتباط يعتمد على التسلسل الكيميائي المستخدم وعلى كيفية

إدارة المخلفات السائلة في المصنع [5].

Figure 3. 산성, 중성, 알칼리성 자일라나아제는 공정 적합성이 서로 다르며, 알칼리성 자일라나아제는 많은 크라프트 공정, 추출 공정, 과산화물 공정 및 재생섬유 환경에 가장 잘 맞습니다.

الفائدة الرابعة هي دعم توجهات الإنتاج الأنظف في صناعة الورق. فالإنزيمات عمومًا حفازات انتقائية تعمل على أهداف محددة، ويمكنها أن تقلل الحاجة إلى شروط معالجة أقسى أو جرعات كيميائية أعلى. في حالة الزيلاناز، تأتي الاستدامة من تحسين كفاءة التبييض لا من الادعاء بأن العملية تصبح "خالية من الكيمياء" [1].

ما الذي لا يفعله الزيلاناز؟

لا يزيل الزيلاناز اللجنين بالطريقة التي تفعلها المؤكسدات الكيميائية، ولا ينبغي تقديمه على أنه بديل كامل لمراحل التبييض. فهو يفتح الطريق أمام التبييض عبر تعديل الزيلان والهيميسليلوز، لكنه لا يحل محل الوظائف المؤكسدة الأساسية المطلوبة لإزالة اللون واللجنين المتبقي في معظم خطوط اللب [8].

كذلك لا يضمن الزيلاناز تحسينًا متساويًا في كل خامة. لب الأخشاب الصلبة، لب الأخشاب اللينة، لب القش، واللب المعاد تدويره تختلف في تركيب الهيميسليلوز، مستوى اللجنين، التاريخ الحراري والكيميائي، وحالة السطح الليفي. لذلك فإن الاستجابة الصناعية ينبغي فهمها كدالة في المادة الخام والتسلسل التشغيلي لا كخاصية مطلقة للإنزيم وحده [3].

ولا ينبغي تجاهل تأثير الأنشطة الإنزيمية المصاحبة. في بعض تطبيقات إعادة تدوير الورق قد يكون للسليولاز أو إنزيمات أخرى أدوار محددة، لكن في تبييض اللب البكر يكون النشاط السليولازي غير المرغوب مصدر قلق لأنه قد يؤثر في السليلوز وقوة الألياف. لذلك يُفضل في هذا السياق استخدام زيلاناز موجه للتطبيق الورقي لا مستحضر كربوهيدرازي عام [9].

العوامل التي تتحكم في الأداء داخل المصنع

يعتمد أداء الزيلاناز على توافقه مع وسط اللب في لحظة الإضافة. فالحموضة أو القلوية، الحالة الحرارية، زمن التماس، اتساق اللب، جودة الخلط، وبقايا المواد الكيميائية من المراحل السابقة كلها عوامل تؤثر في وصول الإنزيم إلى الزيلان وفي استمرار نشاطه أثناء المعالجة. ولهذا السبب لا تكفي معرفة اسم الإنزيم؛ بل يجب فهم موضعه في خط الإنتاج [6].

الغسل قبل المعالجة الإنزيمية عامل مهم لأنه يحدد كمية المواد الذائبة أو القلوية أو المركبات المتبقية التي قد تتداخل مع نشاط الإنزيم أو تحد من اتصاله بالألياف. ومع ذلك، لا يعني ذلك إضافة مرحلة اختبار منفصلة أو تغييرًا جذريًا بالضرورة؛ بل يعني أن الزيلاناز يعمل أفضل عندما تُدار مرحلة ما قبل التبييض كجزء من نظام متكامل [4].

كما أن الخلط ليس تفصيلًا بسيطًا. فالإنزيم يجب أن يتوزع على كتلة ألياف غير متجانسة، وأي مناطق لا يصلها بتركيز مناسب لن تستفيد من تعديل الزيلان. في المقابل، الإفراط غير المدروس في المعالجة لا يضيف بالضرورة فائدة وقد يغير توازن المردود أو الخواص، لذلك يكون الهدف هو معالجة كافية ومحددة لا معالجة أقصى ما يمكن [5].

الزيلاناز في لب الكرافت، لب القش، واللب المعاد تدويره

في لب الكرافت الخشبي، يتركز الاهتمام عادةً على الزيلان المعاد الترسيب واللجنين المتبقي بعد الطبخ. هنا يكون الزيلاناز منطقيًا لأن التبييض اللاحق يحتاج إلى نفاذية جيدة داخل الجدار الليفي، ولأن أي تقليل في العوائق الهيميسليلوزية قد يحسن كفاءة المواد المؤكسدة [2].

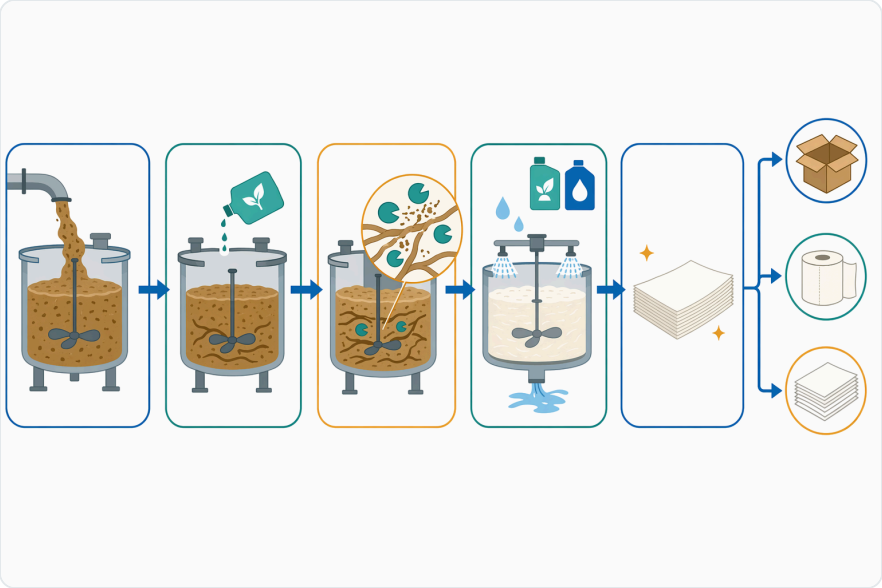

Figure 4. 크라프트 펄프 표백 보조 공정에서 자일라나아제는 일반적으로 주요 산화 표백 단계 전에 투입되어 리그닌 접근성을 높입니다.

في لب القش والمواد غير الخشبية، قد تختلف نسبة الهيميسليلوز وبنية الألياف عن الخشب التقليدي، لكن دور الزيلاناز يبقى قابلًا للتطبيق عند وجود زيلان مؤثر في قابلية التبييض. وقد عُرض تأثير تعزيز التبييض لزيلاناز بكتيري في تبييض لب قش القمح ضمن سياق ECF، ما يوضح مرونة المفهوم خارج لب الأخشاب [3].

في اللب الناتج من الورق المعاد تدويره أو المخلفات الورقية، ترتبط المعالجة بعوامل إضافية مثل الحبر، المواد المالئة، الإضافات السطحية، والتاريخ السابق للألياف. مع ذلك، دُرس الزيلاناز القلوي في تبييض لب الورق المعاد تدويره، ما يشير إلى إمكانية استخدامه عندما يكون تعديل الهيميسليلوز جزءًا من تحسين قابلية المعالجة [4].

العلاقة بين الزيلاناز والاستدامة في صناعة الورق

تُعد صناعة اللب والورق من الصناعات التي تخضع لضغط مستمر لتقليل استهلاك المواد الكيميائية وتحسين خصائص مياه الصرف دون التضحية بالسطوع والجودة. الزيلاناز يخدم هذا الاتجاه لأنه يستهدف عائقًا بنيويًا محددًا، وبالتالي قد يجعل التبييض اللاحق أكثر كفاءة بدل الاعتماد على زيادة جرعات المواد المؤكسدة [1].

لكن الاستدامة هنا يجب أن تُعرض بدقة. فالإنزيم لا يجعل العملية تلقائيًا "خضراء" في كل حالة، ولا يلغي الحاجة إلى إدارة كيميائية ومائية سليمة. قيمته البيئية تظهر عندما يؤدي فعليًا إلى خفض عبء المواد الكيميائية أو تحسين المؤشرات التشغيلية والبيئية ضمن خط محدد، وخصوصًا عندما يكون جزءًا من برنامج تبييض مصمم لتحقيق هذا الهدف [5].

كما أن الاهتمام المتزايد بإنزيمات تعديل اللجنين والزيلاناز يعكس توجهًا أوسع نحو عمليات حيوية مساعدة في إنتاج اللب والورق. ومع ذلك، يظل لكل إنزيم هدف مختلف: الزيلاناز يركز على الزيلان والهيميسليلوز، بينما تستهدف إنزيمات أخرى بنى اللجنين أو مكونات سطحية مختلفة [8].

اعتبارات الجودة: السطوع ليس المؤشر الوحيد

في مصانع الورق، لا يكفي أن يتحسن السطوع إذا تضررت خصائص الألياف. لذلك يجب النظر إلى الزيلاناز من زاوية توازن بين السطوع، المردود، اللزوجة، قوة الورق، وقابلية التشغيل. التحلل الموجه للزيلان مفيد، أما التحلل غير الانتقائي للسليلوز أو الإفراط في تعديل الألياف فقد يكون عكسيًا [9].

لهذا السبب تُعد انتقائية الزيلاناز وانخفاض النشاط السليولازي غير المرغوب من أهم خصائص الملاءمة لتطبيقات التبييض الحيوي. عندما يكون الإنزيم موجّهًا للزيلان، يمكن للمصنع الاستفادة من زيادة النفاذية دون المساس غير الضروري ببنية السليلوز التي تعطي الورق متانته [2].

Figure 5. 자일란이 접근성을 제한할 때, 자일라나아제는 크라프트 펄프 표백, 비목재 펄프 처리, 회수 섬유 탈묵, 더 깨끗한 섬유 가공을 지원할 수 있습니다.

كما ينبغي تقييم تأثير الإنزيم ضمن المنتج الورقي النهائي، لا في مرحلة اللب فقط. بعض التغيرات السطحية قد تكون مفيدة للتبييض لكنها تحتاج إلى اتساق في التشغيل حتى لا تظهر تقلبات في خصائص الورق. لذلك يكون الاستخدام الناجح عادةً مبنيًا على دمج ثابت للإنزيم في خط المعالجة، لا على إضافة متقطعة أو غير مضبوطة [6].

كيف يتوافق المنتج مع احتياجات العملاء الصناعيين؟

Industrial Alkaline Xylanase For Pulp And Paper Processing من Enzymes.bio موجه للعملاء الذين يحتاجون إلى زيلاناز صناعي مناسب لتطبيقات معالجة اللب والورق، وخاصة تعزيز التبييض الحيوي قبل المراحل الكيميائية. Enzymes.bio مورّد للمنتج عبر الإنترنت وليست جهة تصنيع أو مختبر اختبار، ولذلك تُقرأ المعلومات الفنية هنا كدعم تطبيقي عام يساعد على فهم الاستخدام لا كبديل عن نظام التشغيل الداخلي في المصنع.

يُباع المنتج مباشرة عبر الإنترنت بوحدة **1kg**، وتُرفق مع الطلب وثائق **CoA** و**SDS** لدعم التتبع والسلامة والاستخدام المسؤول. هذه الوثائق تساعد المستخدم على ربط الدفعة المورّدة بمتطلبات الاستلام والسلامة، لكنها لا تعني أن Enzymes.bio تقوم بتصنيع الإنزيم أو إجراء اختبارات تشغيلية نيابة عن المصنع.

عمليًا، يناسب المنتج خطوط اللب التي تبحث عن أداة إنزيمية لتحسين قابلية التبييض وتقليل الاعتماد على الزيادة الكيميائية عندما تسمح ظروف المادة الخام والتسلسل بذلك. ويظل القرار التشغيلي النهائي مرتبطًا بخبرة المصنع في نوع اللب، هدف السطوع، مراحل التبييض، وحدود الجودة المطلوبة للورق النهائي.

خلاصة فنية

الزيلاناز القلوي الصناعي لمعالجة اللب والورق هو إنزيم متخصص في تفكيك الزيلان والهيميسليلوز السطحيين، وبذلك يحسن نفاذية الألياف ويعزز كفاءة التبييض اللاحق. قيمته الحقيقية لا تكمن في استبدال الكيمياء المؤكسدة، بل في جعلها أكثر كفاءة عبر إزالة عائق بنيوي دقيق يحد من وصولها إلى اللجنين والمواد الملونة [1].

تدعم الأدبيات العلمية استخدام الزيلاناز في تطبيقات التبييض الحيوي للّب الخشبي وغير الخشبي وبعض أنواع اللب المعاد تدويره، مع تأكيد متكرر على أهمية القلوية، الانتقائية، وانخفاض النشاط السليولازي غير المرغوب. تظهر الفوائد المتوقعة في تحسين قابلية التبييض، تقليل جزء من العبء الكيميائي، ودعم أهداف بيئية مثل خفض بعض مؤشرات حمل مياه الصرف عند تكامل الإنزيم مع تسلسل تبييض مناسب [2].

وبالنسبة للعملاء الصناعيين، فإن استخدام **Industrial Alkaline Xylanase For Pulp And Paper Processing** ينبغي أن يُفهم كإضافة تقنية موجهة لمرحلة ما قبل التبييض، لا كمادة عامة لكل عمليات الورق. عندما يكون اللب غنيًا بزيلان مؤثر في النفاذية، وتكون ظروف المعالجة متوافقة مع نشاط الإنزيم، يصبح الزيلاناز أداة عملية موثوقة لتحسين كفاءة التبييض الحيوي ضمن إطار تشغيل مضبوط [3].

اطلب Industrial Alkaline Xylanase For Pulp And Paper Processing 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.

اشترِ Industrial Alkaline Xylanase For Pulp And Paper Processing →

المراجع

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

1. Abena, T., & Simachew, A. (2024). A review on xylanase sources, classification, mode of action, fermentation processes, and applications as a promising biocatalyst. *BioTechnologia*, 105, 273 - 285.
2. Shrinivas, D., Savitha, G., Raviranjan, K., & Naik, G. (2010). A Highly Thermostable Alkaline Cellulase-Free Xylanase from Thermoalkalophilic Bacillus sp. JB 99 Suitable for Paper and Pulp Industry: Purification and Characterization. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 162, 2049-2057.
3. Xiao-Lin, Han, S., Zhang, N., Hu, H., Zheng, S., Ye, Y., & Lin, Y. (2013). Bleach boosting effect of xylanase A from Bacillus halodurans C-125 in ECF bleaching of wheat straw pulp.. *Enzyme and Microbial Technology*, 52 . 2, 91-8

4. Ma, Q., & Yang, R. (2015). Alkaline Xylanase Produced by Trichoderma reesei: Application in Waste Paper Pulp Bleaching. *Bioresources*, 10, 8048-8057.

5. Sridevi, A., Ramanjaneyulu, G., & Devi, P. S. (2017). Biobleaching of paper pulp with xylanase produced by Trichoderma asperellum. *3 Biotech*, 7, 1-9.

6. Gupta, G. (2014). Studies on Production of Alkaline Xylanase from Melanocarpus albomyces IIS 68 under Submerged Condition and its Application in Pulp and Paper Industry.

7. Sridevi, A., Narasimha, G., & Devi, P. (2019). PRODUCTION OF XYLANASE BY PENICILLIUM SP. AND ITS BIOBLEACHING EFFICIENCY IN PAPER AND PULP INDUSTRY.

8. Buhari, F., Njoku, K., Oboh, B., & Owolabi, F. A. (2025). INVESTIGATING LIGNIN-MODIFYING ENZYMES FOR SUSTAINABLE PULP AND PAPER PRODUCTION. *FUDMA Journal of Sciences*.

9. Yakubu, A., & Vyas, A. (2023). INDUSTRIAL APPLICATION OF ALKALINE CELLULASE ENZYMES IN PULP AND PAPER RECYCLING: A REVIEW. *Cellulose Chemistry and Technology*.

تواصل مع Enzymes.bio

هل لديك أسئلة حول طلب؟ يسرّ فريقنا مساعدتك.

البريد الإلكتروني **wholesale@enzymes.bio** الهاتف (الولايات المتحدة) **+1 (507) 428-6057** **تواصل معنا →**

400+ عملاء B2B **60+** شركاء بحثيون جامعيون **54** نخدم العملاء حول العالم

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