إنزيم السليلولاز لصناعة الورق واللب لتحسين الصرف وإزالة الأحبار

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

إنزيم السليلولاز في صناعة الورق واللب هو أداة معالجة حيوية تستهدف السليلوز في سطح الألياف، بما يساعد على تعديل الألياف، تحسين الصرف، ودعم إزالة الأحبار في الورق المعاد تدويره عند إدماجه بصورة مناسبة في خط التشغيل. علميًا، لا يعمل السليلولاز كإنزيم منفرد بالضرورة، بل كمنظومة تضم غالبًا إندوغلوكانازات وسيلوبيوهيدرولازات وبيتا-غلوكوزيدازات تكسر روابط β-1,4 في السليلوز بدرجات مضبوطة [1]. تعرض Enzymes.bio هذا المنتج للبيع المباشر عبر الإنترنت بوحدة 1kg، مع إرفاق CoA وSDS مع الطلب، بصفتها مورّدًا للمنتج وليست جهة تصنيع أو مختبر اختبار.

موقع السليلولاز داخل منظومة إنزيمات اللب والورق

تقوم صناعة الورق على التحكم في بنية الألياف السليلوزية لا على "تحليل" الورق بلا تمييز. لذلك، يختلف استخدام السليلولاز في مصانع الورق عن استخدامه في تحويل الكتلة الحيوية إلى سكريات؛ فالهدف في الورق غالبًا هو تعديل سطح الألياف أو الأجزاء الأكثر قابلية للوصول، وليس تفكيك السليلوز بالكامل. تذكر المراجعات الصناعية أن السليلولازات الميكروبية تُستخدم في قطاعات متعددة تشمل اللب والورق، النسيج، الأغذية، الوقود الحيوي، وإدارة المخلفات، لكن قيمة كل تطبيق ترتبط بدرجة التحكم في الهجوم الإنزيمي على السليلوز [1].

ضمن خطوط اللب والورق، يظهر السليلولاز غالبًا في ثلاثة سياقات مترابطة: معالجة الألياف المعاد تدويرها، دعم إزالة الأحبار، وتحسين قابلية العجينة للصرف أو التكرير. في الألياف الثانوية، تتراكم آثار دورات التجفيف وإعادة الترطيب، وتزداد نسبة المواد الدقيقة والملوثات الغروية، ويصبح التحكم في الترشيح ونزع الماء أكثر صعوبة. لهذا تشير مراجعات إعادة تدوير الورق إلى أن الإنزيمات، ومنها السليلولازات القلوية، طُرحت كمسار لمعالجة مشكلات الألياف المعاد تدويرها مع تقليل الاعتماد على بعض المعالجات الكيميائية الشديدة [2].

منتج **Cellulase Enzyme For Paper And Pulp Industry** المتاح عبر Enzymes.bio يقع ضمن فئة إنزيمات اللب والورق الصناعية. صياغة هذا الاستخدام مهمة: Enzymes.bio مورّد عبر الإنترنت وليست جهة مصنّعة أو مختبرًا، لذلك لا ينبغي قراءة صفحة المنتج على أنها مواصفة تصنيع أو بروتوكول تطوير. يشتري المستخدم المنتج كوحدة 1kg، وتُرفق وثائق CoA وSDS مع الطلب لدعم الاستخدام الصناعي والتعامل الآمن، بينما يبقى ضبط التطبيق مرتبطًا بظروف العملية لدى العميل .

ما الذي يفعله السليلولاز داخل الألياف السليلوزية؟

السليلوز بوليمر خطي من وحدات الغلوكوز المرتبطة بروابط β-1,4، ويتجمع في مناطق بلورية وشبه بلورية وغير منتظمة داخل جدار الليف. السليلولاز يتعامل مع هذه البنية عبر منظومة عمل تكاملية: الإندوغلوكانازات تفتح السلسلة من مواقع داخلية، والسيلوبيوهيدرولازات أو الإكسوغلوكانازات تتقدم من الأطراف أو المناطق المكشوفة، بينما تقوم بيتا-غلوكوزيدازات بتحويل النواتج القصيرة إلى وحدات أصغر عند اكتمال التحلل. هذا التقسيم الوظيفي موثق في دراسات إنزيمات *Trichoderma*، التي تُعد نموذجًا معروفًا لمنظومات السليلولاز الفطرية [3].

في صناعة الورق، تكمن الفائدة في "الهجوم المحدود" لا في الهضم الكامل. عندما يحدث قص جزئي في الطبقات السطحية أو في المواد الدقيقة الغنية بالسليلوز، يمكن أن تتغير قابلية الليف للانتفاخ، وتتحسن حركة الماء خلال شبكة الألياف، أو يصبح الحبر والملوثات السطحية أقل التصاقًا. لكن إذا امتد التحلل بقدر زائد، قد تنخفض سلامة الألياف أو يتغير توزيع الأطوال والمواد الدقيقة بطريقة تؤثر في قوة الورقة؛ لذلك يرتبط نجاح التطبيق بالتوازن بين التعديل الإنزيمي والحفاظ على بنية الليف [4].

تُظهر الأدبيات أيضًا أن مصدر السليلولاز يؤثر في سلوكه الصناعي. فالسليلولازات الفطرية، وخصوصًا من أجناس مثل *Trichoderma*، درست بكثافة بسبب كفاءتها في تفكيك السليلوز وإفراز خليط إنزيمي واسع، بينما تحظى السليلولازات من الكائنات المحبة للحرارة أو المتحملة للقلوية باهتمام خاص للتطبيقات التي تعمل في بيئات تشغيل أكثر قسوة. لا يعني ذلك أن كل سليلولاز مناسب لكل مصنع، بل يعني أن اختيار المنتج يجب أن يرتبط بطبيعة العجينة والمرحلة الصناعية التي سيُضاف فيها الإنزيم [5].

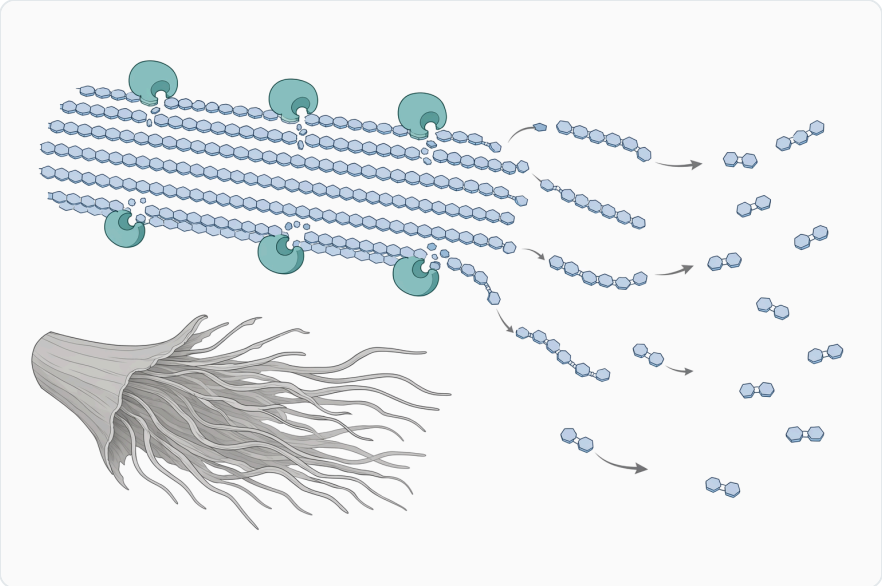

Figure 1. 셀룰라아제는 섬유벽 전체를 균일하게 분해하기보다, 먼저 접근 가능한 셀룰로오스 표면, 피브릴, 미세분, 비정질 영역에 작용한다.

لماذا تحتاج خطوط الورق واللب إلى تعديل إنزيمي للألياف؟

تكرير اللب ميكانيكيًا يهدف إلى زيادة قابلية الألياف للترابط عبر التليف السطحي والانتفاخ، لكنه يستهلك طاقة وقد يزيد توليد المواد الدقيقة إذا تجاوز المستوى المناسب. السليلولاز المساعد للتكرير يمكن أن يغيّر مقاومة السطح الليفي للمعالجة الميكانيكية، بحيث تصبح بعض الألياف أكثر قابلية للتليف أو الانتفاخ تحت نفس نظام القص، مع ضرورة تجنب الإفراط في تقصير الألياف. دراسة مبكرة على لب أوكالبتوس مجفف وغير مجفف تناولت أثر التكرير بمساعدة السليلولاز على خواص اللب، ما يعكس قدم الاهتمام بهذا المسار في تحسين قابلية الألياف للمعالجة [6].

في الألياف المعاد تدويرها، تكون المشكلة أكثر تعقيدًا لأن الليف تعرض للتجفيف السابق، وفقد جزءًا من قدرته على الانتفاخ والمرونة، وتداخل مع أحبار ومواد لاصقة ومواد مالئة. الأدبيات الخاصة بمعالجة الألياف المعاد تدويرها بالإنزيمات تشرح أن الإنزيمات يمكن أن تستهدف مكونات محددة في نظام العجينة بدل الاعتماد الكامل على المعالجات الكيميائية، لكن أداءها يتأثر بنوع الورق الداخل، تركيبة الحبر، ونظام التنظيف أو التعويم اللاحق [4].

الصرف ونزع الماء يمثلان نقطة تشغيلية حاسمة. عندما ترتفع نسبة fines والمواد الغروية، قد تحتجز شبكة الألياف ماءً أكثر، فتتباطأ مرحلة التكوين ويزداد العبء على التجفيف. استخدام السليلولاز قد يغيّر شكل أو سلوك جزء من المواد السليلوزية الدقيقة، فيسهل مرور الماء أو تقل لزوجة النظام الليفي، بشرط ألا يتحول التعديل إلى توليد مفرط لمواد دقيقة جديدة. دراسة حديثة تناولت خفض fines في مياه الورق المعاد تدويره البيضاء باستخدام السليلولاز، ما يبرز صلة الإنزيم بمشكلات الدائرة المائية وليس فقط بالألياف الطويلة [7].

السليلولاز وإزالة الأحبار: تحرير الحبر لا استبدال التعويم

إزالة الأحبار عملية متعددة المراحل تشمل عادة تفكيك الورق، تحرير الحبر من الألياف، ثم إزالته بالغسل أو التعويم أو الفرز. السليلولاز يعمل أساسًا على جزء الألياف السليلوزية الذي يثبت الحبر أو يحيط به، فيضعف بعض نقاط الالتصاق أو يحرر جسيمات الحبر من سطح الليف. لذلك، لا يُفهم السليلولاز كبديل كامل للتعويم أو الغسل، بل كعامل مساعد في مرحلة تحرير الحبر قبل الفصل الفيزيائي اللاحق [2].

الفائدة العملية في إزالة الأحبار تعتمد على حجم جسيمات الحبر بعد التحرير، ونوع الحبر، ووجود مواد رابطة أو طلاءات سطحية. إذا أصبح الحبر في نطاق يمكن فصله بكفاءة، قد تتحسن النظافة البصرية أو تقل بقايا الحبر في العجينة. أما إذا أنتجت المعالجة جسيمات دقيقة جدًا يصعب التقاطها، فقد لا تتحسن النتيجة كما هو متوقع. لهذا تؤكد مراجعات إعادة التدوير أن تأثير الإنزيمات في إزالة الأحبار يجب قراءته ضمن نظام العملية الكامل، وليس كخاصية منعزلة للإنزيم وحده [4].

تكتسب السليلولازات القلوية اهتمامًا خاصًا في إعادة تدوير الورق لأن بعض مراحل إزالة الأحبار تعمل في بيئات قلوية نسبيًا. مراجعة حديثة عن التطبيق الصناعي للسليلولازات القلوية في إعادة تدوير اللب والورق تربط هذه الفئة بتحسين معالجة الألياف، دعم إزالة الأحبار، وتقليل بعض الأعباء الكيميائية عند ملاءمة ظروف التشغيل لطبيعة الإنزيم [2].

جدول مقارنة تطبيقات السليلولاز في صناعة الورق واللب

مجال التطبيق	ما يستهدفه السليلولاز داخل النظام	آلية التأثير الصناعية	الفائدة المتوقعة عند الضبط الصحيح	القيد الفني الرئيسي
تحسين الصرف ونزع الماء	الألياف السطحية والمواد الدقيقة السليلوزية	تعديل محدود للبنية السليلوزية بما يغير احتجاز الماء وحركة السائل خلال الشبكة	تحسين قابلية الترشيح واستقرار الدائرة المائية	المعالجة الزائدة قد تولد fines إضافية أو تغير قوة الورقة [7]
دعم إزالة الأحبار	نقاط التصاق الحبر بسطح الليف أو بالمواد الدقيقة	تحرير جزئي للحبر عبر إضعاف الطبقة السليلوزية السطحية	زيادة قابلية الحبر للفصل بالتعويم أو الغسل	لا يعمل بديلًا عن وحدات الفصل الفيزيائي [4]
المساعدة في التكرير	جدار الليف والسطح القابل للتليف	تسهيل الانتفاخ أو التليف السطحي قبل/أثناء الطاقة الميكانيكية	تحسين استجابة اللب للتكرير وقد يدعم خواص الترابط	الإفراط قد يضعف الألياف أو يقلل العائد الليفي [6]
معالجة الألياف المعاد تدويرها	ألياف فقدت جزءًا من مرونتها بعد دورات الاستخدام	استعادة جزئية لقابلية التفاعل السطحي وتعديل fines	تحسين تشغيل العجينة الثانوية وجودتها	يعتمد على مصدر الورق الداخل ودرجة التلوث [2]
تثمين حمأة الورق أو مخلفات السليلوز	السليلوز المتبقي في الحمأة أو المخلفات الورقية	تحلل إنزيمي أعمق باتجاه سكريات أو مواد قابلة للتخمير في سياقات غير صناعة الورقة نفسها	فتح مسارات لاستخدام المخلفات بدل التخلص منها	هذا التطبيق يختلف عن تعديل الألياف داخل ماكينة الورق [8]

السليلولاز في التكرير: بين تحسين السطح وحماية القوة

التكرير التقليدي يغيّر الليف ميكانيكيًا: يرفع مساحة السطح، يزيد التليف، ويحسن الترابط بين الألياف، لكنه قد يقطع الألياف أو يزيد المواد الدقيقة إذا اشتد. المعالجة بالسليلولاز قبل التكرير أو بجواره يمكن أن تجعل سطح الليف أكثر استجابة للقص الميكانيكي، لأن الإنزيم يضعف مواضع محدودة في السليلوز غير المنتظم أو الأكثر تعرضًا. دراسة حديثة عن أثر السليلولاز في تكرير لب كرافت مبيض من الخشب اللين تؤكد أن هذا الموضوع لا يزال محل تقييم بحثي مباشر، خاصة عند الربط بين بنية الليف وخواص الورق الناتج [9].

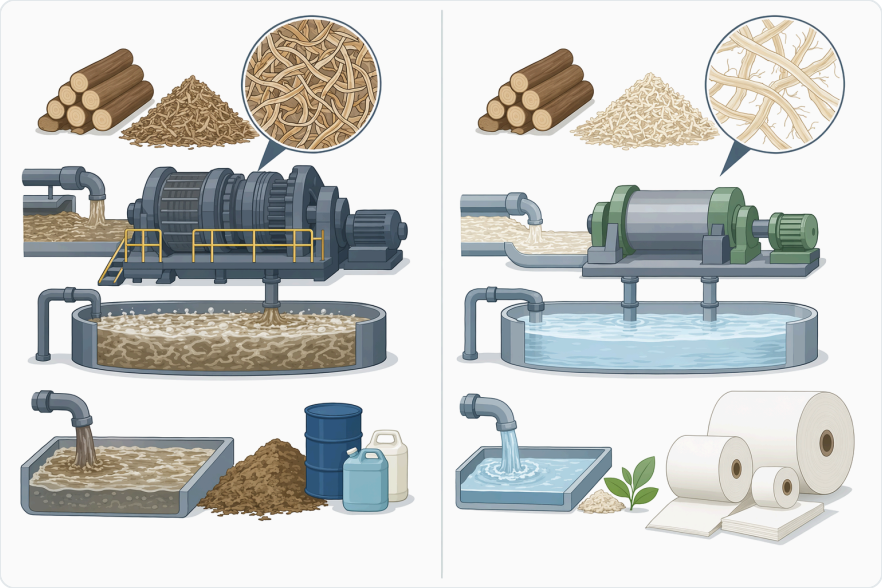

Figure 2. 제지 산업에서 셀룰라아제는 가벼운 섬유 표면 개질부터 당 방출을 위한 강도 높은 가수분해까지 다양하게 사용되며, 각 공정은 목표와 위험 수준이 다르다.

في لب الأوكالبتوس، درس الباحثون تأثير السليلولاز المساعد للتكرير على لب مجفف وآخر غير مجفف، وهي مقارنة ذات معنى صناعي لأن التجفيف السابق يغيّر قابلية الألياف للانتفاخ والارتباط. الألياف المجففة سابقًا تميل إلى ظاهرة "التقرن" أو فقدان جزء من قابلية إعادة الانتفاخ، ولهذا يصبح تعديل السطح الإنزيمي جذابًا عندما يراد تحسين استجابتها دون زيادة مفرطة في مدخلات التكرير [6].

مع ذلك، لا ينبغي تحويل السليلولاز إلى أداة تكرير كيميائي عنيفة. كلما زاد التحلل، اقتربت العملية من تقليل درجة البلمرة أو إضعاف أجزاء من جدار الليف، ما قد ينعكس على مقاومة الشد أو التمزق أو العائد. لذلك، القيمة الصناعية للسليلولاز في التكرير تكمن في نافذة تشغيلية مضبوطة تحقق تعديلًا سطحيًا كافيًا مع حماية البنية الليفية الأساسية [4].

تحسين الصرف والدائرة المائية في الورق المعاد تدويره

الدائرة المائية في مصانع الورق المعاد تدويره تحمل مزيجًا من الألياف الدقيقة، المواد المالئة، النشا، بقايا الأحبار، مواد لاصقة، ومواد غروية. هذا المزيج يمكن أن يسبب بطء الصرف، رغوة، ترسبات، أو تذبذبًا في احتجاز المواد على السلك. السليلولاز لا يعالج كل هذه الملوثات، لكنه يؤثر في الجزء السليلوزي من fines، وقد يساعد في تعديل سلوكها بما ينعكس على الصرف أو قابلية فصل المواد الدقيقة [7].

دراسة خفض fines في مياه الورق المعاد تدويره البيضاء باستخدام السليلولاز تقدم مثالًا على اتجاه بحثي عملي: بدل التركيز فقط على الليف الطويل، تُعامل المياه البيضاء نفسها كموقع لتحسين التشغيل. هذه المقاربة مهمة لأن fines لا تؤثر في الصرف فقط، بل في استهلاك المواد المساعدة، جودة التكوين، وعودة الملوثات إلى النظام المغلق. غير أن التحكم الدقيق مطلوب لأن تحويل الألياف الدقيقة إلى جزيئات أصغر من اللازم قد يزيد الحمل الغروي بدل أن يخففه [7].

في خطوط عالية الإغلاق المائي، يصبح التوازن بين التعديل الإنزيمي والإزالة الفيزيائية للمواد الدقيقة أكثر أهمية. السليلولاز قد يكون مفيدًا عندما تتراكم مواد سليلوزية قابلة للتعديل، لكنه ليس حلًا منفردًا للمواد اللاصقة أو الراتنجية أو الزيوت؛ هذه الفئات تتطلب غالبًا إنزيمات أو كيمياء مختلفة. لذلك، فهم نوع الملوث هو ما يحدد ما إذا كان السليلولاز هو الأداة الرئيسية أم جزءًا صغيرًا من برنامج معالجة أوسع [2].

حمأة الورق والمخلفات: تطبيق قريب لكنه ليس هو نفسه تطبيق ماكينة الورق

تحتوي حمأة الورق المعاد تدويره على سليلوز متبقٍ ومواد مالئة ومكونات عضوية وغير عضوية. في سياقات التثمين الحيوي، تُستخدم السليلولازات لتحليل السليلوز المتبقي بهدف إنتاج سكريات قابلة للتخمير أو مواد وسيطة. أظهرت أعمال حول تثمين حمأة الورق المعاد تدويره لإنتاج الإيثانول أن إعادة تدوير السليلولاز داخل العملية يمكن أن تكون عاملًا مؤثرًا في الكفاءة الاقتصادية، ما يوضح قيمة الإنزيم في مخلفات صناعة الورق خارج خط تكوين الورقة نفسه [10].

أبحاث أخرى درست إنتاج الإيثانول من حمأة الورق مع تدوير السليلولاز، وكذلك نمذجة حركية لإعادة تدوير الإنزيم في هذا النوع من الركائز. هذه الدراسات لا تعني أن تطبيق السليلولاز في ماكينة الورق يهدف إلى إنتاج سكريات، لكنها تثبت أن المواد الورقية والحمأة تحتوي على سليلوز قابل للتفاعل الحيوي، وأن التحكم في إعادة استخدام الإنزيم وكفاءة التحلل يشكل محورًا تقنيًا مهمًا في مسارات التثمين [8].

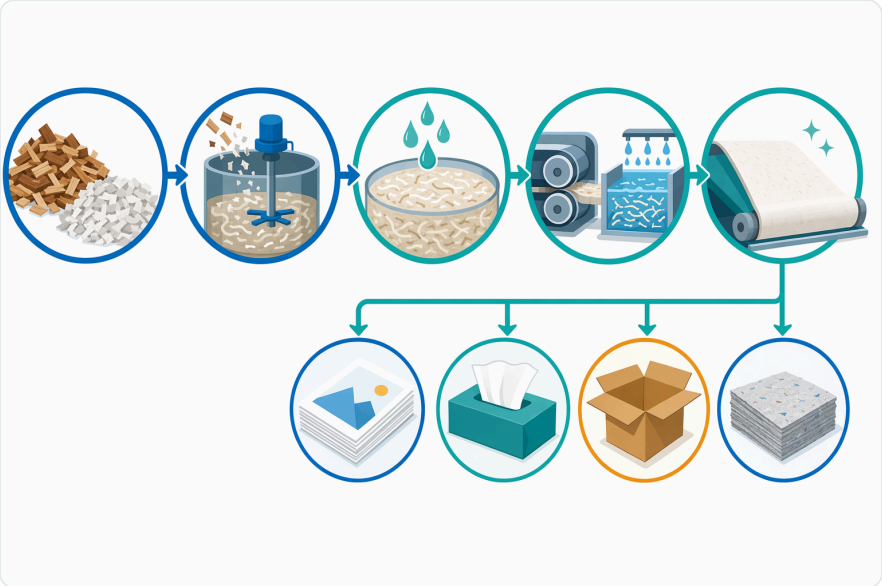

Figure 3. 재생지 탈묵 공정에서 셀룰라아제는 셀룰로오스가 풍부한 잉크 부착 부위를 느슨하게 만든 뒤, 세척이나 부유선별을 통해 떨어져 나온 입자를 제거한다.

تقييم إنزيمات تجارية مختلفة لتحلل حمأة الورق يبيّن أيضًا أن أداء السليلولاز يتغير باختلاف تركيبة المستحضر والركيزة. هذه النقطة مهمة لعملاء اللب والورق: اسم "سليلولاز" وحده لا يكفي للتنبؤ بالنتيجة، لأن الخليط الإنزيمي المصاحب ونسبة الأنشطة الداخلية والخارجية والإنزيمات المساندة تؤثر في عمق التعديل وسرعته [11].

العلاقة بين السليلولاز والهيميسليلولاز والإنزيمات المساندة

الألياف الورقية ليست سليلوزًا نقيًا دائمًا؛ فهي قد تحتوي على هيميسليلوز، لجنين متبقٍ، مواد استخلاصية، نشا، طلاءات، ومضافات. لذلك، يعمل السليلولاز غالبًا ضمن مفهوم أوسع لمعالجة الألياف بالإنزيمات.
الهيميسليلولازات قد تفتح جزءًا من المصفوفة المحيطة بالسليلوز، والزيلانازات تستخدم في بعض سياقات اللب والتبييض، بينما تستهدف إنزيمات أخرى مواد لاصقة أو دهنية لا يعالجها السليلولاز بكفاءة [12].

هذا التفريق ضروري لتجنب توقعات مبالغ فيها. السليلولاز مناسب عندما تكون المشكلة مرتبطة بالسطح السليلوزي، fines السليلوزية، قابلية الصرف، أو تحرير الحبر من الألياف. أما إذا كانت المشكلة الأساسية رواسب لاصقة، مواد راتنجية، أو شوائب غير سليلوزية، فقد يكون دوره ثانويًا أو غير كافٍ. مراجعات إنزيمات إعادة تدوير الورق تؤكد أن حل مشكلات الألياف الثانوية يعتمد على مطابقة نوع الإنزيم مع نوع العائق في النظام [4].

في بعض التطبيقات البحثية الحديثة، تُستخدم السليلولازات مع استراتيجيات تثبيت أو إعادة تدوير لتحسين الاستفادة من الإنزيم. تثبيت السليلولاز على جسيمات مغناطيسية أو منصات قابلة للاسترجاع درس كوسيلة لزيادة قابلية إعادة الاستخدام في عمليات التحلل الحيوي، وهو اتجاه مهم لمستقبل المعالجة الإنزيمية لكنه ليس بالضرورة وصفًا لطريقة استخدام المنتج التجاري في ماكينة الورق [13].

السليلولاز والنانو سليلوز: تشابه في الركيزة واختلاف في الهدف

من المفيد التمييز بين استخدام السليلولاز لتعديل اللب الورقي وبين استخدامه في استخلاص أو تحضير مواد نانوية سليلوزية. في تحضير النانوسليلوز، قد يُستخدم التحلل الميكروبي أو الإنزيمي مع القص للمساعدة في تفكيك البنية الليفية إلى أبعاد أصغر، وقد يؤثر ذلك في خواص الورق إذا أضيفت المواد النانوية لاحقًا. دراسة عن ورق مدعم بنانوسليلوز مستخلص بعملية تحلل ميكروبي مع قص ميكانيكي توضح أن التحكم في البنية السليلوزية يمكن أن ينعكس على خواص الورق النهائية [14].

لكن هدف مصنع الورق عند استخدام السليلولاز لتحسين الصرف أو إزالة الأحبار ليس إنتاج نانوسليلوز داخل النظام. بل إن إنتاج مواد فائقة الدقة داخل العجينة دون ضبط قد يسبب مشكلات احتجاز أو صرف. لذلك، يُقرأ هذا المجال كدليل على حساسية السليلوز للمعالجة الإنزيمية، لا كتوصية بتحويل الألياف في خط الورق إلى جسيمات نانوية [14].

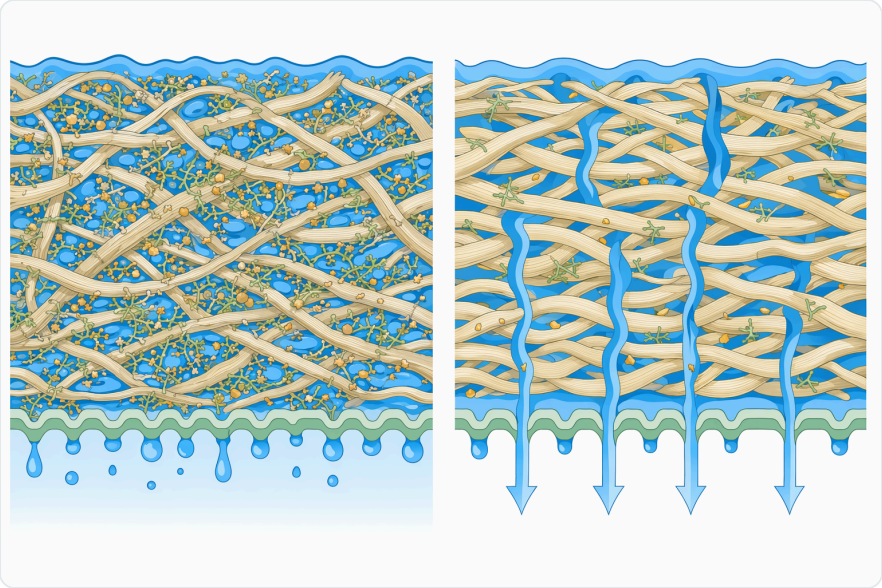

Figure 4. 셀룰라아제는 미세분, 피브릴, 섬유 팽윤, 기공 구조를 변화시켜 배수성과 보수성에 영향을 줄 수 있다.

اعتبارات التشغيل الآمن والملاءمة الصناعية

السليلولاز بروتين إنزيمي، ولذلك يتأثر بالوسط المحيط وبوجود مواد قد تعطل بنيته أو تقلل فعاليته. في خطوط الورق، قد تتعرض العجينة لمؤكسدات، تغيرات حادة في القلوية أو الحموضة، مواد خافضة للتوتر السطحي، مواد احتجاز، أو حرارة تشغيلية مرتفعة. المبدأ العملي هو وضع الإنزيم في نقطة تسمح بتلامس كافٍ مع الألياف قبل المراحل التي قد تعطل النشاط، مع مراعاة أن بيانات السلامة ووثيقة التحليل المرفقة مع الطلب هما المرجعان العمليان للمنتج المورد.

لا تقدم Enzymes.bio المنتج بوصفها جهة تصنيع أو مختبرًا، ولا ينبغي أن تُفهم وثائق المنتج العامة كبديل عن التحقق التشغيلي داخل خط العميل. المنتج يباع مباشرة عبر الإنترنت بوحدة 1kg، وتُرفق معه CoA وSDS، ما يدعم التعرف إلى الهوية التجارية للدفعة ومتطلبات المناولة والسلامة. أما قرار نقطة الإضافة، زمن التلامس، وتوافقه مع كيماويات العملية فيبقى جزءًا من دمج المنتج داخل نظام التشغيل القائم لدى المستخدم الصناعي .

من ناحية السلامة المهنية، يجب التعامل مع الإنزيمات الصناعية على أنها بروتينات فعالة قد تسبب تحسسًا عند الاستنشاق أو التعرض غير المنضبط، حتى عندما تكون مفيدة بيئيًا وتشغيليًا. لذلك، يظل الالتزام بنشرة بيانات السلامة واستخدام ممارسات مناولة مناسبة أمرًا أساسيًا في المخازن ومناطق التحضير والإضافة، خصوصًا عند التعامل مع مساحيق أو مستحضرات قابلة لتكوين غبار.

حدود الفائدة وما لا ينبغي افتراضه

لا توجد نتيجة واحدة مضمونة لكل أنواع اللب. لب الخشب اللين يختلف عن لب الخشب الصلب، واللب البكر يختلف عن OCC أو ONP أو MOW، والألياف المجففة سابقًا تختلف عن الألياف غير المجففة. كما أن الحبر والطلاءات والمواد اللاصقة تغير مسار استجابة العجينة للإنزيم. لذلك، تُفهم الأدلة المنشورة على أنها دعم علمي

لتطبيق السليلولاز، لا كتعهد بأن كل خط إنتاج سيحقق نفس الدرجة من التحسن [9].

كذلك، لا ينبغي استخدام السليلولاز كحل منفرد لمشكلات لا ترتبط بالسليلوز. فإذا كانت المشكلة الأساسية pitch، stickies، دهون، أو رواسب عضوية غير سليلوزية، فقد تكون إنزيمات أخرى أو معالجات منفصلة أكثر صلة. السليلولاز يعالج بنية السليلوز وروابطها، ولذلك تكون قوته في تعديل الألياف والصرف وإزالة الأحبار عندما يكون ارتباط المشكلة بالسطح السليلوزي واضحًا [2].

الحد الآخر هو خطر المعالجة الزائدة. لأن السليلولاز قادر مبدئيًا على كسر روابط السليلوز، فإن زيادة شدة المعالجة قد تغير توزيع أطوال الألياف، أو تزيد المواد الدقيقة، أو تخفض بعض خصائص القوة. هذا هو السبب في أن الأدبيات تركز على التوازن بين فائدة التعديل السطحي ومخاطر التحلل العميق، خصوصًا في عمليات التكرير والمعالجة السابقة للألياف [6].

Figure 5. 제지 및 펄프 분야의 셀룰라아제 활용에는 탈묵, 백수 내 미세분 제어, 배수성 개선 지원, 고해 보조, 바이오표백 보조, 나노셀룰로오스 생산, 슬러지 자원화가 포함된다.

لماذا يظل السليلولاز خيارًا جذابًا لصناعة الورق المعاد تدويره؟

رغم القيود، يظل السليلولاز جذابًا لأنه يعمل بانتقائية حيوية على ركيزة رئيسية في الورق: السليلوز. هذه الانتقائية تسمح بتصميم معالجة ألطف من كثير من البدائل الكيميائية، وقد تساعد في رفع قيمة الألياف الثانوية أو تحسين الصرف أو دعم إزالة الأحبار دون تغيير جذري في البنية العامة للخط. المراجعات الحديثة حول السليلولازات الفطرية تؤكد استمرار الاهتمام الصناعي بها بسبب تنوع تطبيقاتها وقابليتها للتطوير في مجالات تعتمد على المواد السليلوزية [1].

كما أن اقتصاد إعادة التدوير يضغط على المصانع لاستخدام ألياف أقل انتظامًا وأكثر تلوثًا مع الحفاظ على جودة الورق. في هذا السياق، يصبح السليلولاز أداة دقيقة نسبيًا لتحسين تفاعل الألياف داخل النظام، لا مجرد مادة مساعدة عامة. الأدبيات الخاصة بإعادة تدوير الألياف تشير إلى أن الإنزيمات يمكن أن تساعد في معالجة مشكلات الألياف الثانوية عندما تُستخدم وفق فهم واضح للركيزة والعملية [4].

من منظور الاستدامة، ترتبط السليلولازات أيضًا بمسارات تثمين المخلفات الورقية والحمأة، وهي نقطة مهمة لصناعة تواجه تكاليف التخلص من المخلفات وضغوط تقليل الأثر البيئي. دراسات إنتاج الإيثانول من حمأة الورق المعاد تدويره مع إعادة تدوير السليلولاز توضح كيف يمكن للإنزيم أن يكون جزءًا من اقتصاد دائري أوسع حول مخلفات الورق، حتى وإن كان هذا التطبيق مختلفًا عن استخدامه المباشر لتحسين ماكينة الورق [10].

خلاصة تقنية لعملاء Enzymes.bio

Cellulase Enzyme For Paper And Pulp Industry هو منتج إنزيمي صناعي مخصص للتعامل مع المكوّن السليلوزي في عجائن الورق واللب، وخاصة في تطبيقات تحسين الصرف، تعديل الألياف، ودعم إزالة الأحبار في الورق المعاد تدويره. أساسه العلمي واضح: منظومة السليلولاز تكسر روابط β-1,4 في السليلوز عبر آليات متكاملة، ويمكن توجيه هذا التأثير نحو تعديل سطحي محدود بدل التحلل الكامل عند دمجه بعناية في العملية [3].

الأدلة المنشورة تدعم استخدام السليلولاز في مجالات قريبة من صناعة الورق، بما في ذلك التكرير بمساعدة الإنزيم، معالجة الألياف المعاد تدويرها، خفض المواد الدقيقة في المياه البيضاء، وإعادة تثمين حمأة الورق. في الوقت نفسه، تؤكد هذه الأدلة أن الأداء ليس صفة مطلقة للإنزيم وحده، بل نتيجة تفاعل بين نوع اللب، الملوثات، نقطة الإضافة، والعمليات اللاحقة مثل الغسل أو التعويم أو التكرير [7].

بالنسبة للمستخدم الصناعي، القيمة العملية للمنتج تكمن في كونه أداة معالجة حيوية موجّهة للسليلوز يمكن شراؤها مباشرة عبر الإنترنت بوحدة 1kg من Enzymes.bio، مع إرفاق CoA وSDS مع الطلب. وبما أن Enzymes.bio مورّد وليست جهة تصنيع أو مختبرًا، فالأفضل قراءة المنتج كمدخل إنزيمي موثّق للاستخدام الصناعي، بينما يتم دمجه في خط الورق وفق متطلبات التشغيل والسلامة والنتائج المستهدفة لدى العميل .

اطلب Cellulase Enzyme For Paper And Pulp Industry 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 Cellulase Enzyme For Paper And Pulp Industry →

المراجع

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

1. Singh, A., Bajar, S., Devi, A., & Pant, D. (2021). An overview on the recent developments in fungal cellulase production and their industrial applications. *Bioresource Technology Reports*, 14, 100652.

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

3. Tiwari, P., Misra, B. N., & Sangwan, N. (2013). β-Glucosidases from the Fungus Trichoderma: An Efficient Cellulase Machinery in Biotechnological Applications. *BioMed Research International*, 2013.

4. Bajpai, P. (2010). Solving the problems of recycled fiber processing with enzymes. *BioResources*.

5. Li, D., & Papageorgiou, A. (2011). Cellulases from Thermophilic Fungi: Recent Insights and Biotechnological Potential. *Enzyme Research*, 2011.

6. García, O., Torres, A., Colom, J., Pastor, F., Díaz, P., & Vidal, T. (2002). Effect of cellulase-assisted refining on the properties of dried and never-dried eucalyptus pulp. *Cellulose*, 9, 115-125.

7. Jevtović, Đ., Živković, P., Milivojević, A., Bezbradica, D., & Auwera, L. V. D. (2023). Reduction of fines in recycled paper white water via cellulase enzymes. *BioResources*.

8. Gomes, D. G., Domingues, L., & Gama, M. (2016). Valorizing recycled paper sludge by a bioethanol . production process with cellulase recycling.. *Bioresource Technology*, 216, 637-44

9. Park, S. G., Tak, J., Lee, J. Y., Shin, K. S., & Park, S. I. (2024). Evaluation of cellulase effect on the refining process of softwood bleached kraft pulp. *BioResources*.

10. Gomes, D. G., Serna-Loaiza, S., Cardona, C., Gama, M., & Domingues, L. (2018). Insights into the economic viability of cellulases recycling on bioethanol production from recycled paper sludge.. *Bioresource . Technology*, 267, 347-355

11. Rabemanolontsoa, H., Phang, S. T., & Kawamoto, H. (2024). Evaluation of Various Commercial Enzymes for Paper Sludge Saccharification. *IOP Conference Series: Earth and Environment*, 1354.

12. Gupta, V. G. (2016). New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering. *Focus on Catalysts*.

13. Khoshnevisan, K., Vakhshiteh, F., Barkhi, M., Baharifar, H., Poor-Akbar, E., Zari, N., Stamatis, H., ... et al. (2017). Immobilization of cellulase enzyme onto magnetic nanoparticles: Applications and recent advances. *Molecular Catalysis*, 442, 66-73.

14. Adnan, S., Azhar, A., Jasmani, L., & Samsudin, M. F. (2018). Properties of paper incorporated with nanocellulose extracted using microbial hydrolysis assisted shear process. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 368.

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.