

Xilanasi alcalina industriale per bio-sbianca, bleaching ECF/TCF e lavorazione della pasta di cellulosa e carta

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

La **xilanasi alcalina industriale** è un enzima usato nella lavorazione pulp & paper per idrolizzare selettivamente lo xilano dell'emicellulosa, aumentando l'accessibilità della pasta alla successiva fase di sbiancamento. In cartiera viene considerata soprattutto come ausilio di **bio-sbianca**: non sostituisce automaticamente l'intera chimica di bleaching, ma può ridurre la severità del trattamento chimico, migliorare la risposta della fibra e contribuire a un profilo ambientale più favorevole degli effluenti quando integrata correttamente nel processo [1].

Che cos'è la xilanasi alcalina per pulp & paper

La xilanasi è un enzima idrolitico che agisce sullo **xilano**, un polisaccaride emicellulosico presente nelle pareti cellulari vegetali insieme a cellulosa e lignina. Nel contesto della carta e della cellulosa, l'interesse tecnico non è degradare la fibra cellulosica portante, ma modificare in modo controllato la frazione emicellulosica che può schermare o trattenere lignina residua dopo la cottura e il lavaggio della pasta [2].

Il termine **alcalina** indica che l'enzima è destinato a operare in condizioni compatibili con ambienti di processo a pH alcalino o moderatamente alcalino, tipici di molte fasi industriali della lavorazione della pasta. La ricerca su varianti di xilanasi migliorate per alcalofilia e termostabilità mostra perché questi due requisiti siano centrali: un enzima per cartiera deve mantenere funzionalità in un ambiente chimicamente più impegnativo rispetto a un'applicazione alimentare o analitica [3].

Nel settore pulp & paper, la xilanasi alcalina viene utilizzata soprattutto come **pretrattamento enzimatico prima del bleaching**. L'obiettivo è rendere la matrice della fibra più permeabile e facilitare l'azione dei trattamenti successivi, incluse sequenze ECF, TCF o sistemi a base di perossido, a seconda della configurazione dell'impianto e del tipo di pasta [4].

Perché lo xilano è importante nella pasta di cellulosa

La pasta lignocellulosica è una struttura composita. La cellulosa forma il principale scheletro fibroso; l'emicellulosa, inclusi xilani e altri polisaccaridi, contribuisce alla rete di interazioni tra fibre; la lignina è la componente aromatica responsabile di gran parte del colore residuo e della richiesta di sbiancamento. Durante la cottura, parte della lignina viene rimossa, ma una quota residua resta associata alla fibra e può essere resa più difficile da eliminare dalla presenza di emicellulose superficiali o ridepositate ^[1].

Le xilanasi tagliano i legami β -1,4 dello xilano, frammentando catene emicellulosiche senza dover aggredire direttamente la cellulosa. Questa distinzione è cruciale: un'azione troppo ampia sulla cellulosa può compromettere proprietà meccaniche o resa fibrosa, mentre un'azione mirata sullo xilano mira a migliorare l'accesso della chimica di sbiancamento alla lignina residua ^[5].

Dal punto di vista di processo, lo xilano può essere visto come una "barriera funzionale" e, allo stesso tempo, come un componente utile della fibra. Per questo la xilanasi non va interpretata come un agente di rimozione indiscriminata dell'emicellulosa: l'applicazione industriale corretta cerca un equilibrio tra apertura della matrice, mantenimento delle proprietà della pasta e compatibilità con la sequenza di sbiancamento esistente ^[2].

Meccanismo d'azione nella bio-sbianca della pasta

Idrolisi selettiva dello xilano

La xilanasi agisce come **endo- β -1,4-xilanasi**, cioè taglia internamente le catene di xilano in punti accessibili della struttura polisaccaridica. Questo genera frammenti più corti e solubili, riducendo la capacità dello xilano di trattenere o schermare lignina residua e rendendo la fibra più accessibile ai trattamenti successivi ^[5].

In pratica, l'effetto utile non deriva da una "sbianca" enzimatica diretta nel senso ossidativo del termine. La xilanasi non ossida la lignina come farebbe un agente chimico di bleaching; piuttosto, modifica l'architettura emicellulosica della pasta in modo che la lignina residua sia più facilmente raggiungibile e rimovibile nelle fasi successive ^[1].

Questo spiega perché la xilanasi è descritta spesso come **xylanase-aided bleaching**, cioè sbiancamento assistito da xilanasi. L'enzima prepara la pasta; il raggiungimento della brillantezza finale dipende poi dall'intera sequenza, dalla qualità del lavaggio, dal tipo di fibra, dalla carica chimica e dalle condizioni industriali complessive ^[4].

Effetto sull'accessibilità della lignina residua

Dopo la cottura, una parte dello xilano può ridistribuirsi o associarsi alla superficie della fibra. Questa frazione può limitare la penetrazione uniforme degli agenti di sbiancamento, soprattutto nelle zone in cui lignina ed emicellulosa restano intimamente associate. L'idrolisi controllata dello xilano può quindi aumentare l'accessibilità fisica e chimica della pasta [2].

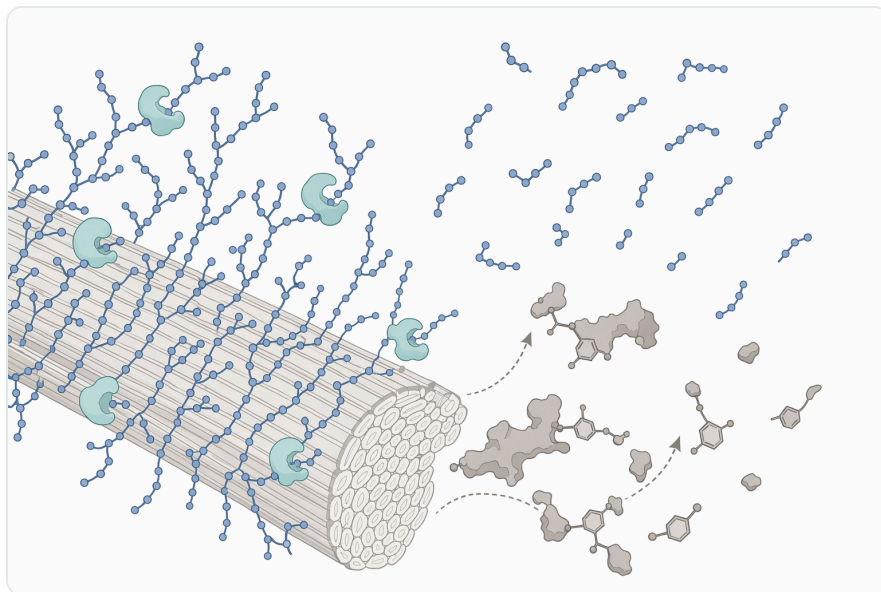


Figure 1. 알칼리성 자일라나아제는 표면에 결합된 자일란을 가수분해하여, 후속 표백이나 세정 약품이 섬유에 결합된 리그닌과 오염 물질에 더 효과적으로 접근할 수 있게 합니다.

Quando la pasta diventa più reattiva alle fasi successive, l'impianto può ottenere un migliore utilizzo dei reagenti già presenti nella sequenza di bleaching. In letteratura, gli studi su bio-sbianca con xilanasi sono infatti collegati al miglioramento della risposta della pasta e alla possibilità di ridurre la pressione sui trattamenti chimici convenzionali, pur mantenendo l'obiettivo di qualità del prodotto [6].

È importante distinguere questo effetto da un'azione diretta sulla lignina. Gli enzimi che modificano la lignina, come alcune ossidasi o perossidasi studiate per la produzione sostenibile di carta, appartengono a un ambito funzionale diverso. La xilanasi si colloca invece nel trattamento dell'emicellulosa come via indiretta per facilitare la rimozione della lignina residua [7].

Applicazioni principali della xilanasi alcalina industriale

Bio-sbianca della pasta kraft e supporto a sequenze ECF/TCF

L'applicazione più rappresentativa è il pretrattamento della pasta prima della sequenza di sbiancamento. La letteratura include anche prove in cartiera su pasta di conifera in sequenze TCF con xilanasi termostabile e stabile in condizioni alcaline, segno che l'interesse per questi enzimi non è limitato alla scala di laboratorio [4].

In una sequenza ECF o TCF, la xilanasi viene considerata uno strumento per migliorare l'efficienza del bleaching riducendo la quantità di lignina o cromofori che devono essere affrontati esclusivamente con chimica ossidante. L'effetto atteso è più realistico quando la pasta è ben lavata, l'enzima ha accesso alla fibra e il trattamento è inserito prima di condizioni che potrebbero inattivarlo [1].

Per impianti che puntano a ridurre l'impatto ambientale della sbianca, la xilanasi è interessante perché agisce in modo catalitico e specifico. Tuttavia, il risultato industriale dipende dalla materia prima, dal grado di delignificazione precedente, dalla configurazione della linea e dai target di brillantezza richiesti dal prodotto finale [2].

Trattamento della pasta da carta riciclata o waste paper pulp

La xilanasi alcalina è stata studiata anche nella sbianca di **waste paper pulp**, cioè pasta derivata da carta di recupero. In questo contesto, l'obiettivo è diverso rispetto alla pasta vergine: la matrice contiene fibre già lavorate, residui di inchiostri, cariche minerali, additivi e contaminanti variabili, quindi il trattamento enzimatico deve essere valutato in relazione alla composizione della materia prima [6].

Gli studi su xilanasi prodotta da *Trichoderma reesei* per la sbianca di waste paper pulp indicano che l'enzima può avere un ruolo anche nei flussi di riciclo, dove la riduzione di trattamenti chimici aggressivi è particolarmente rilevante per la gestione degli effluenti e per la conservazione della qualità fibrosa [6].

È però utile non confondere la funzione della xilanasi con quella di altri enzimi impiegati nel riciclo, come cellulasi, lipasi o esterasi. La xilanasi agisce principalmente sullo xilano; altri enzimi possono essere coinvolti nella rimozione di inchiostri, pitch, adesivi o componenti cellulosiche superficiali. Una formulazione xilanasi deve quindi essere considerata per il contributo specifico all'emicellulosa, non come soluzione universale per tutti i problemi della carta da macero [8].

Pasta chemi-termomeccanica e sistemi a perossido

Oltre alla pasta chimica, la letteratura recente include il pretrattamento con xilanasi-pectinasi prima di una sbianca debolmente alcalina con perossido di idrogeno su pasta chemi-termomeccanica di pioppo. Questo è rilevante perché mostra l'interesse per l'integrazione enzimatica anche in processi dove l'obiettivo non è solo rimuovere lignina, ma migliorare l'efficienza di sistemi ossidanti più selettivi [9].

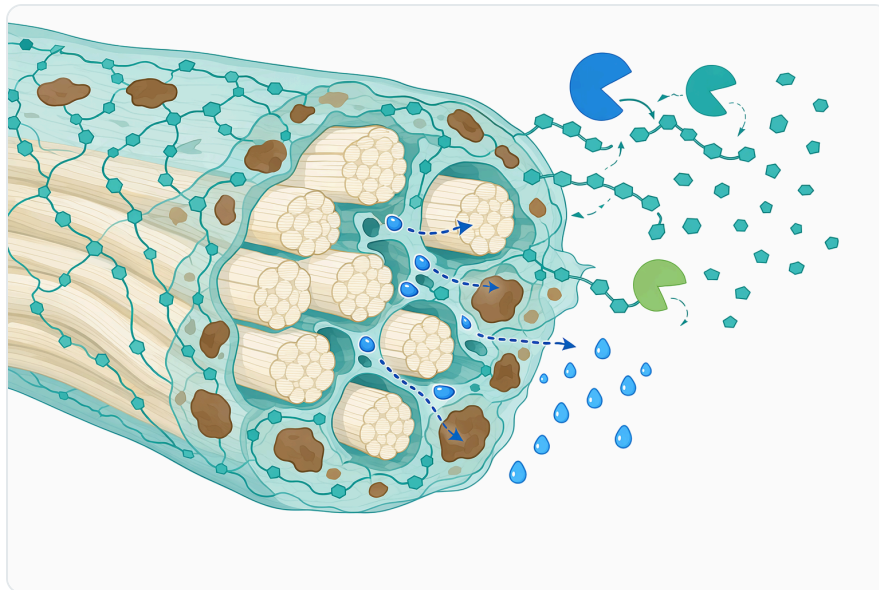


Figure 2. 섬유 수준에서 자일라나아제는 리그닌을 직접 산화하거나 셀룰로오스를 분해하는 것이 아니라 헤미셀룰로오스에 작용합니다.

In questi casi, l'azione sulla componente emicellulosica può modificare la diffusione dei reagenti e il comportamento della pasta durante la fase al perossido. L'approccio xilanasi-pectinasi evidenzia anche che, in alcune matrici, più componenti polisaccaridici possono influenzare la risposta al bleaching, quindi la xilanasi può essere parte di una strategia enzimatica più ampia [9].

Per l'utilizzatore industriale, il punto chiave è comprendere che la xilanasi alcalina non ha un'unica applicazione rigida. Il suo impiego è più documentato nella bio-sbianca della pasta, ma può essere valutato anche in linee dove la modifica controllata dell'emicellulosa migliora l'efficacia di trattamenti successivi [1].

Confronto tra approcci di sbiancamento e ruolo della xilanasi

Approccio di processo	Funzione principale	Vantaggi potenziali	Limiti tecnici da considerare
Sbiancamento chimico	Rimozione o modifica ossidativa della lignina	Elevata capacità di raggiungere target di	Può comportare maggiore carico chimico, gestione più complessa

Approccio di processo	Funzione principale	Vantaggi potenziali	Limiti tecnici da considerare
convenzionale	residua	brillantezza; processo consolidato	degli effluenti e dipendenza da condizioni severe
Bio-sbianca assistita da xilanasi	Pretrattamento dell'emicellulosa per aumentare l'accessibilità della pasta	Può migliorare la risposta al bleaching e supportare la riduzione della pressione chimica	Non sostituisce da sola l'intera sequenza; il risultato dipende da fibra, lavaggio, miscelazione e integrazione di processo [4]
Xilanasi in waste paper pulp	Modifica dello xilano in fibre riciclate o già trattate	Può supportare la sbianca di paste da recupero e ridurre trattamenti aggressivi	La variabilità della carta recuperata richiede attenzione alla composizione della materia prima [6]
Xilanasi con altri enzimi, ad esempio pectinasi	Azione coordinata su più polisaccaridi non cellulosici	Può migliorare la risposta in paste meccaniche o chemi-termomeccaniche	Il contributo di ciascun enzima deve essere interpretato in base alla matrice e alla sequenza successiva [9]
Enzimi lignino-modificanti	Modifica più diretta di componenti aromatiche della lignina	Interesse per processi più sostenibili e meno dipendenti da chimica tradizionale	Meccanismo diverso dalla xilanasi; non è equivalente a un trattamento emicellulosico [7]

Caratteristiche tecniche rilevanti: alcalinità, termostabilità e selettività

Compatibilità con ambienti alcalini

La lavorazione industriale della pasta non avviene in condizioni ideali da laboratorio. Liquori residui, pH alcalino, temperatura di processo, consistenza della pasta e presenza di sostanze estrattive possono influenzare l'attività enzimatica. Per questo la ricerca si concentra su xilanasi alcalofile o migliorate per alcalofilia, come mostrano gli studi su varianti di xilanasi da *Bacillus* ottimizzate per condizioni alcaline [3].

La compatibilità alcalina è rilevante perché consente di inserire il trattamento in modo più pratico nelle linee esistenti, senza dover riportare la pasta a condizioni neutre non coerenti con il resto del processo. Questo non significa che ogni ambiente alcalino sia automaticamente adatto: significa che l'enzima è concepito per una finestra operativa più vicina a quella delle cartiere rispetto a xilanasi pensate per impieghi non industriali [5].

Per una pagina prodotto B2B, è corretto descrivere la xilanasi alcalina come un enzima destinato a condizioni di processo compatibili con la lavorazione della cellulosa e della carta, evitando di presentare valori specifici di attività, gradi analitici o definizioni di unità che dipendono dalla documentazione tecnica del prodotto e dal lotto fornito.

Termostabilità e robustezza industriale

La termostabilità è un'altra proprietà ricercata nelle xilanasi per pulp bleaching. Studi di ingegneria proteica hanno affrontato il miglioramento congiunto di termostabilità e alcalofilia di endo- β -1,4-xilanasi destinate ad applicazioni nella sbianca della pasta, confermando che la robustezza dell'enzima è una priorità applicativa ^[5].

Anche la produzione di varianti alcaline termostabili in sistemi di espressione come *Pichia pastoris* mostra l'interesse industriale verso xilanasi più adatte a processi reali, dove stabilità e resa produttiva sono elementi importanti per la disponibilità commerciale dell'enzima ^[10].

Per l'utilizzatore finale, termostabilità e alcalinità non devono essere lette come garanzia assoluta di performance in qualsiasi linea. Sono piuttosto proprietà che aumentano la probabilità di compatibilità con processi cartari, purché l'enzima venga inserito in condizioni coerenti con la sua funzione biologica ^[11].

Selettività verso lo xilano

La selettività è fondamentale perché la fibra cellulosica deve mantenere integrità e proprietà meccaniche. Una xilanasi per applicazioni cartarie dovrebbe agire prevalentemente sulla componente xilanica, riducendo il rischio di effetti indesiderati sulla cellulosa, in particolare quando la qualità del prodotto finale dipende da resistenza, formazione del foglio e comportamento in raffinazione ^[8].



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

Gli studi di bio-sbianca con xilanasi da *Trichoderma asperellum* e *Trichoderma reesei* mostrano che organismi microbici diversi possono fornire enzimi con caratteristiche applicative differenti, ma il principio comune resta l'azione mirata sull'emicellulosa a supporto del bleaching ^[6] ^[2].

Questa specificità spiega perché la xilanasi è spesso preferita come ausilio di bleaching rispetto a trattamenti enzimatici meno selettivi quando l'obiettivo è migliorare l'accessibilità della pasta senza compromettere il contributo strutturale della cellulosa.

Benefici industriali attesi

Migliore risposta allo sbiancamento

Il beneficio più immediato è una migliore risposta della pasta alle fasi successive di bleaching. Idrolizzando parte dello xilano, l'enzima può aumentare la permeabilità della matrice fibrosa e facilitare la rimozione o modifica della lignina residua. Questo effetto è coerente con gli studi che descrivono il potenziale delle xilanasi termofile nel processo di bio-sbianca della pasta ^[1].

In pratica, la cartiera può ottenere una pasta più "preparata" alla chimica successiva. Il risultato può essere osservato come miglioramento della trattabilità, maggiore efficacia della sequenza o possibilità di ottimizzare la carica chimica, ma non deve essere generalizzato senza considerare le condizioni specifiche della linea ^[4].

Riduzione della pressione chimica e degli effluenti

Una delle ragioni principali per cui le xilanasi sono studiate nel pulp bleaching è la possibilità di ridurre la dipendenza da trattamenti chimici severi. Il valore ambientale non deriva dal fatto che l'enzima elimini ogni reagente, ma dal fatto che può migliorare l'efficienza del sistema complessivo, consentendo strategie di processo meno intensive ^[2].

La gestione dell'impronta ambientale è sempre più importante per la filiera forestale-pasta-carta. Studi recenti su gestione della carbon footprint e strategie net-zero per paste kraft sbiancate, ad esempio nel caso del bambù, confermano che il settore sta valutando il processo di sbiancamento anche in termini di integrazione ambientale e non solo di qualità finale del foglio ^[12].

In questo quadro, una xilanasi alcalina industriale è uno strumento tecnico utile quando l'obiettivo è migliorare l'efficienza della sbianca e ridurre carico chimico o severità operativa, senza presentarla come soluzione unica per la decarbonizzazione dell'intera filiera.

Supporto alla qualità della pasta e della carta

La qualità della carta dipende da molte variabili: tipo di fibra, raffinazione, frazionamento, additivi, formazione del foglio, presenza di microfibrillated cellulose e parametri di macchina. Gli studi comparativi sulle proprietà dei tissue paper mostrano quanto il risultato finale sia sensibile a interventi di processo diversi, anche quando non riguardano direttamente la xilanasi ^[8].

Per questo, il contributo della xilanasi va interpretato come parte di una catena di processo. Migliorare l'accessibilità della pasta può aiutare lo sbiancamento e la pulizia della fibra, ma proprietà come resistenza, bulk, softness o assorbimento dipendono anche da raffinazione, frazione fibrosa e progettazione del prodotto finale ^[8].

La xilanasi alcalina è quindi più correttamente posizionata come enzima per migliorare la **processabilità della pasta** e l'efficienza della sbianca, non come additivo diretto per conferire da solo una specifica proprietà al foglio.

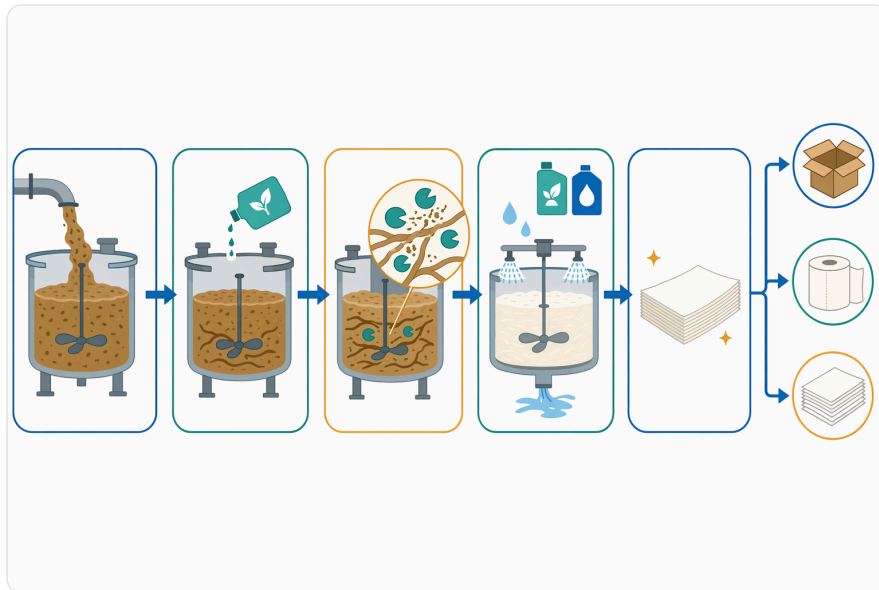


Figure 4. 크라프트 펄프 표백 강화에서는 보통 자일라나아제를 주요 산화 표백 단계 전에 투입하여 리그닌의 접근성을 높입니다.

Variabili che influenzano la prestazione in cartiera

Il risultato della bio-sbianca con xilanasi dipende prima di tutto dal tipo di fibra: latifoglie, conifere, bambù, pioppo o fibre riciclate hanno composizione emicellulosica e comportamento di processo differenti. Le applicazioni documentate includono pasta di conifera, waste paper pulp, pasta trattata con xilanasi da funghi e sistemi su pioppo chemi-termomeccanico, indicando un campo applicativo ampio ma non uniforme [6] [4] [9].

Conta anche la storia della pasta: cottura, lavaggio, grado di delignificazione, presenza di estrattivi e residui chimici possono cambiare l'accessibilità dello xilano. Una pasta scarsamente lavata o contenente composti che interferiscono con l'enzima può rispondere in modo diverso rispetto a una pasta ben preparata per il pretrattamento [1].

Infine, la sequenza successiva determina il valore pratico del trattamento. Una xilanasi può essere utile prima di ECF, TCF o sistemi al perossido, ma il beneficio deve essere letto in relazione agli obiettivi della linea: brillantezza, stabilità del colore, riduzione della carica chimica, effluenti, resa o qualità della fibra [9].

Integrazione responsabile nel processo industriale

Una xilanasi alcalina per pulp & paper viene normalmente considerata in una fase in cui la pasta è accessibile all'enzima e prima di trattamenti che potrebbero inattivare la proteina. La logica è inserire il trattamento quando l'enzima può entrare in contatto uniforme con la fibra e agire sullo xilano senza

essere immediatamente degradato o denaturato ^[4].

L'enzima deve essere gestito come ingrediente tecnico industriale. Non è un agente ossidante né un reagente di sbiancamento convenzionale: il suo valore è catalitico e dipende dall'interazione con il substrato emicellulosico. Buona dispersione nella pasta, condizioni compatibili e coerenza con la sequenza successiva sono aspetti tecnici più importanti di una semplice aggiunta meccanica al processo ^[2].

Non è corretto promettere risultati identici in ogni cartiera. La letteratura mostra potenziale applicativo e studi specifici su diverse paste, ma la performance industriale resta legata alla configurazione della linea, alla materia prima e agli obiettivi di processo ^[1].

Differenza tra xilanasi, cellulasi e enzimi lignino-modificanti

La xilanasi agisce principalmente sullo xilano; la cellulasi agisce sulla cellulosa; gli enzimi lignino-modificanti mirano invece a trasformazioni più dirette della lignina. Questa distinzione è essenziale perché nel pulp & paper il substrato enzimatico determina sia l'effetto utile sia il rischio di effetti indesiderati ^[7].

Una cellulasi può essere utile in alcuni contesti, ma un'azione eccessiva sulla cellulosa può incidere su resa e proprietà fibrose. La xilanasi è interessante proprio perché mira a una componente emicellulosica che influenza l'accessibilità della lignina, mantenendo il focus lontano dalla degradazione del principale scheletro cellulosico ^[5].

Gli enzimi lignino-modificanti, invece, appartengono a una categoria complementare. Possono essere studiati per obiettivi di sostenibilità nella produzione di carta, ma non svolgono lo stesso ruolo della xilanasi alcalina: non preparano la pasta tramite idrolisi dello xilano, bensì intervengono su componenti aromatiche o sistemi redox associati alla lignina ^[7].

Evidenze scientifiche rilevanti

Le fonti scientifiche disponibili mostrano un interesse consolidato verso xilanasi alcaline, termostabili o prodotte da microrganismi selezionati per la bio-sbianca della pasta. Studi su batteri termofili hanno valutato il potenziale della xilanasi nel biobleaching, mentre lavori su *Trichoderma* hanno esplorato applicazioni su paste cartarie e waste paper pulp ^{[1] [6]}.



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

La ricerca non si limita all'isolamento naturale dell'enzima. L'ingegneria proteica e l'espressione eterologa sono state usate per migliorare proprietà come alcalofilia e termostabilità, confermando che le esigenze del settore carta richiedono enzimi robusti e compatibili con condizioni operative industriali ^[10] ^[5].

Sono presenti anche studi su combinazioni enzimatiche e sistemi di bleaching specifici, come il pretrattamento xilanasi-pectinasi prima di sbianca al perossido debolmente alcalina. Questo indica che l'enzima può essere parte di strategie più ampie, soprattutto quando la matrice della pasta contiene più componenti non cellulose che influenzano l'efficienza della sbianca ^[9].

Posizionamento del prodotto Enzymes.bio

Industrial Alkaline Xylanase For Pulp And Paper Processing è proposta da Enzymes.bio come enzima industriale per applicazioni nella lavorazione della pasta e della carta. Enzymes.bio opera come **fornitore** del prodotto: non deve essere interpretata come produttore dell'enzima, laboratorio di analisi o centro di sviluppo applicativo.

Il prodotto è acquistabile direttamente online in unità da **1 kg**. Il certificato di analisi (**CoA**) e la scheda di dati di sicurezza (**SDS**) sono forniti insieme all'ordine, a supporto della gestione documentale, della tracciabilità commerciale e della manipolazione responsabile del materiale.

Dal punto di vista tecnico, il prodotto va considerato come un supporto enzimatico per processi in cui l'idrolisi controllata dello xilano può migliorare l'accessibilità della pasta e l'efficienza della bio-sbianca. Questa collocazione è coerente con la letteratura su xilanasi alcaline, termostabili e applicate alla sbianca di paste cartarie [1] [5].

Conclusioni

La **xilanasi alcalina industriale per pulp and paper processing** è uno strumento biotecnologico mirato alla modifica controllata dello xilano nella pasta lignocellulosica. Il suo impiego più rilevante è la bio-sbianca: prepara la fibra, aumenta l'accessibilità della matrice e può migliorare l'efficienza delle fasi successive di bleaching [4].

Le evidenze scientifiche supportano l'interesse per xilanasi alcaline e termostabili in paste vergini, waste paper pulp e sistemi integrati con altri enzimi o con perossido. Allo stesso tempo, la prestazione non è universale: dipende da fibra, processo, lavaggio, sequenza di sbiancamento e obiettivi qualitativi della cartiera [6] [9].

Per un utilizzatore B2B, il modo più accurato di interpretare **Industrial Alkaline Xylanase For Pulp And Paper Processing** è come un enzima industriale di supporto alla lavorazione della pasta e della carta, particolarmente rilevante quando si desidera rendere più efficiente la sbianca e ridurre la dipendenza da trattamenti chimici severi senza compromettere la logica complessiva del processo.

Ordina Industrial Alkaline Xylanase For Pulp And Paper Processing 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 Industrial Alkaline Xylanase For Pulp And Paper Processing →](#)

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. Irdawati, Putri, N. D., Syamsuardi, Agustien, A., & Rilda, Y. (2020). [Potential of Xylanase Thermophilic Bacteria in the Pulp Biobleaching Process.](#)

2. Sridevi, A., Ramanjaneyulu, G., & Devi, P. S. (2017). Biobleaching of paper pulp with xylanase produced by *Trichoderma asperellum*. *3 Biotech*, 7, 1-9.
3. Bai, W., Cao, Y., Liu, J., Wang, Q., & Jia, Z. (2016). Improvement of alkalophilicity of an alkaline xylanase Xyn11A-LC from *Bacillus* sp. SN5 by random mutation and Glu135 saturation mutagenesis. *BMC Biotechnology*, 16.
4. Lundgren, K. R., Bergkvist, L., Högman, S., Jöves, H., Eriksson, G., Bártfai, T., Laan, J., ... et al. (1994). TCF mill trial on softwood pulp with Korsäs thermostable and alkaline stable xylanase T6. *Fems Microbiology Reviews*, 13, 365-368.
5. Boonyapakron, K., Jaruwat, A., Liwnaree, B., Nimchua, T., Champreda, V., & Chitnumsub, P. (2017). Structure-based protein engineering for thermostable and alkaliphilic enhancement of endo- β -1,4-xylanase for applications in pulp bleaching. *Journal of Biotechnology*, 259, 95-102 .
6. Ma, Q., & Yang, R. (2015). Alkaline Xylanase Produced by *Trichoderma reesei*: Application in Waste Paper Pulp Bleaching. *Bioresources*, 10, 8048-8057.
7. Buhari, F., Njoku, K., Oboh, B., & Owolabi, F. A. (2025). INVESTIGATING LIGNIN-MODIFYING ENZYMES FOR SUSTAINABLE PULP AND PAPER PRODUCTION. *FUDMA Journal of Sciences*.
8. Vigiúí, J., Kumar, S., & Carré, B. (2022). A comparative study of the effects of pulp fractionation, refining, and microfibrillated cellulose addition on tissue paper properties. *BioResources*.
9. Li, J., Zha, Y., Wang, H., & Hou, Q. (2026). Kinetic and environmental effects of xylanase-pectinase pretreatment-mediated weakly alkaline hydrogen peroxide bleaching of poplar chemi-thermomechanical pulp. *Wood Science and Technology*, 60.
10. Lu, Y., Fang, C., Wang, Q., Zhou, Y., Zhang, G., & Ma, Y. (2016). High-level expression of improved thermo-stable alkaline xylanase variant in *Pichia Pastoris* through codon optimization, multiple gene insertion and high-density fermentation. *Scientific Reports*, 6.
11. Ali, S. M., Noby, N., Soliman, N., & Omar, S. (2025). Isolation, expression, and in silico profiling of a thermostable xylanase from *Geobacillus stearothermophilus* strain NASA267: insights into structural features and agro-waste valorization. *Microbial Cell Factories*, 24.
12. Song, J., Liu, L., Lyu, X., Xia, B., Cheng, Z., Lu, B., Xu, Q., ... et al. (2026). Carbon footprint management and net-zero strategies for bleached kraft bamboo pulps under forestry-pulp-paper integration. *Journal of Environmental Management*, 404, 129482 .

Contatta Enzymes.bio

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

EMAIL 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.