

# 工業用鹼性木聚醣酶：紙漿漂白、廢紙去墨與紙張加工的 xylanase 技術說明

Enzymes.bio 研究團隊 · 紐西蘭威靈頓 · June 21, 2026

工業用鹼性木聚醣酶 ( Industrial Alkaline Xylanase ) 主要用於紙漿與造紙流程中的生物漂白、漂白前處理、廢紙去墨輔助與纖維表面改質。它透過選擇性水解木聚醣，鬆動半纖維素與木質素相關結構，使後續漂白或去墨化學品更容易作用於纖維表面，進而有機會降低化學藥劑需求、改善白度與減輕廢水負荷。Enzymes.bio 供應此類產品作為 1 kg 單位線上銷售品項，CoA 與 SDS 會隨訂單提供；Enzymes.bio 為供應商，不是製造商或檢測實驗室。

## 產品定位：用於紙漿與造紙加工的鹼性 xylanase

Industrial Alkaline Xylanase For Pulp And Paper Processing 指的是適合在偏鹼性造紙環境中使用的木聚醣酶，通常歸類為內切型 endo- $\beta$ -1,4-xylanase。其核心功能不是直接「漂白」纖維，而是先改變纖維表面與半纖維素網絡，使木質素殘留、染料、油墨微粒或其他疏水性雜質更容易在後續化學、洗滌或機械步驟中移除；木聚醣酶在紙漿與造紙工業中的應用已被多篇綜述歸納為較成熟的生物技術路徑之一 [1]。

在 B2B 應用語境中，這類產品通常被視為「製程輔助酵素」而非單一成品品質保證工具。它的效益取決於原料種類、前處理歷史、紙漿殘餘木質素、半纖維素組成、pH、溫度、接觸時間、攪拌與洗滌效率等條件；因此，應將它理解為可嵌入既有漂白、去墨或纖維改質流程的生物催化選項，而不是替代所有化學處理的獨立方案。紙漿與造紙生物技術專書與綜述均指出，酵素導入的價值通常來自對現有流程的補強，包括降低化學強度、改善纖維可加工性與減少環境負荷 [2]。

## 為什麼紙漿與造紙流程需要鹼性木聚醣酶？

紙漿漂白與廢紙回收長期面臨三類壓力：化學藥劑成本、環境排放壓力，以及纖維品質維持。傳統漂白流程可能需要較高強度的氧化劑或含氯替代漂白系統；廢紙去墨也常仰賴鹼、界面活性劑、螯合劑與機械分散。這些步驟雖然有效，但會增加廢水處理負擔，且在條件過強時可能造成纖維損傷或紙張強度下降。紙漿與造紙廢水的有機負荷、色度與處理成本已被多篇研究列為產業環境管理重點 [3]。

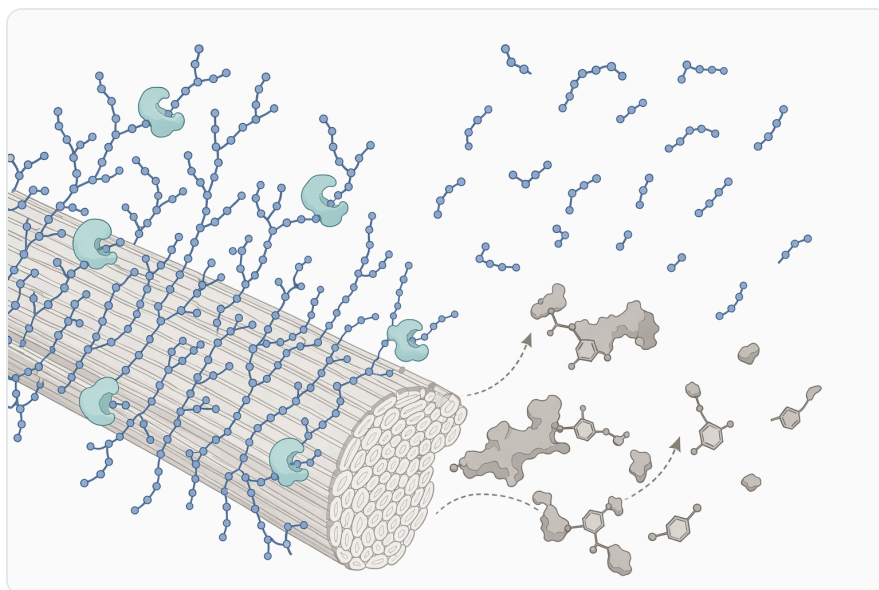
鹼性 xylanase 的工業價值在於「降低阻力」而非「取代全部化學」。木聚醣位於植物細胞壁半纖維素網絡中，常與木質素、纖維素微纖維及其他多醣形成複雜結構。當木聚醣酶切斷木聚醣主鏈後，纖維表面會出現更高可及性，使漂白劑、洗滌水、去墨助劑或機械作用更容易接觸目標物。xylanase 的來源、分類、作用方式與多產業應用已在近年綜述中被系統整理，並強調其作為生物催化劑的廣泛潛力 [4]。

對紙廠而言，偏鹼性穩定性尤其重要。許多紙漿流程本身處於中性至鹼性區間，若酵素只能在弱酸或溫和條件中作用，就需要額外冷卻、調 pH 或增加停留槽，導致整合成本上升。鹼性活性半纖維素酶的研究重點，正是讓酵素能在較接近工業流程的 pH 條件下維持有效催化，降低額外製程調整需求 [5]。

## 作用機制：選擇性水解木聚醣，提升漂白與去墨可及性

### 木聚醣在纖維表面的角色

木聚醣是植物半纖維素的重要成分，在闊葉木、農業纖維與部分非木材紙漿中含量尤其值得注意。它不像纖維素那樣形成高度結晶的主體骨架，而是以較分枝、較非晶的方式分布在細胞壁中，並與木質素及其他多醣形成纖維表面的阻隔層。當紙漿經蒸煮或氧脫木質素後，殘留木聚醣可能重新沉積於纖維表面，包覆部分木質素殘留，使漂白化學品不易進入反應位置；木聚醣酶的生物漂白功能即與此「可及性」問題密切相關 [6]。



**Figure 1.** 鹼性木聚醣酶會水解附著於表面的木聚醣，使後續漂白或清洗化學藥劑能更有效地接觸纖維結合的木質素與污染物。

## endo- $\beta$ -1,4-xylanase 的催化結果

內切型木聚醣酶主要切割木聚醣主鏈中的  $\beta$ -1,4 糖苷鍵，產生較短的木寡糖與可溶性片段。這種作用不必大量降解纖維素，因此在理想條件下可避免對纖維主體強度造成過度破壞。研究與綜述常將 xylanase 描述為可針對半纖維素進行表面改質的酵素，能使木質素—碳水化合物複合體周邊結構鬆動，促進後續漂白或抽出 [1]。

這一機制也解釋了為何 xylanase 常被放在漂白前處理，而非流程末端。當纖維表面半纖維素阻隔先被適度削弱，後續二氧化氯、過氧化氫、氧化或洗滌步驟便可能以較低強度達到相近效果。此處的重點不是酵素本身具有氧化漂白能力，而是它改善反應底物的暴露程度，讓既有漂白化學更有效率地運作。

### 與輔助酵素的協同邏輯

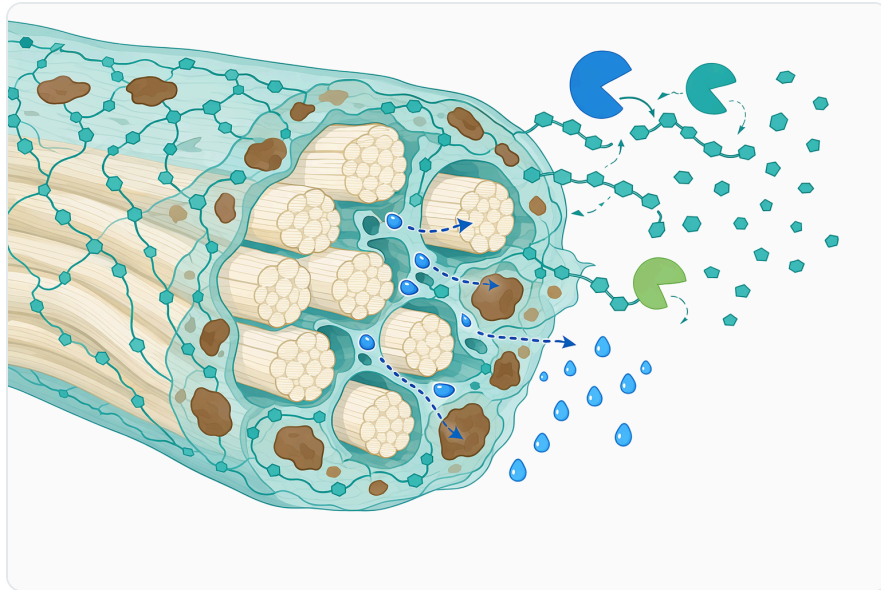
工業紙漿是複合基質，單一 xylanase 有時不足以完全處理高度分枝的半纖維素。木聚醣側鏈可能包含阿拉伯糖、葡萄糖醛酸或其他取代基，會影響 xylanase 接近主鏈的能力。因此，研究中常探討 xylanase 與  $\beta$ -xylosidase、 $\alpha$ -L-arabinofuranosidase 或纖維素酶低度協同的可能性。近期酵素研究指出，xylanase 與  $\beta$ -xylosidase 可在半纖維素解構中展現互補作用，而阿拉伯呋喃糖苷酶也可能透過移除側鏈提升 xylanase 的水解效率 [7]。

在紙漿應用中，協同並不代表加入越多酵素越好。若纖維素酶活性過強，可能造成細纖維化過度或強度損失；若半纖維素過度移除，也可能影響纖維間鍵結。較務實的策略是把鹼性 xylanase 視為主體工具，並在特定原料或回收紙來源中，評估是否需要低度酵素組合。紙業中以酵素雞尾酒改善生物漂白與纖維處理的研究，已將「選擇性」列為避免品質副作用的重要條件 [6]。

## 主要應用一：紙漿生物漂白與漂白前處理

在化學紙漿，尤其是牛皮紙漿與部分農業纖維紙漿中，xylanase 常被用於漂白前段。其目標是減少殘餘木聚醣對木質素的遮蔽，使後續漂白劑更容易達到同等白度或亮度。多篇紙漿與造紙生物技術文獻將 xylanase 前處理視為降低漂白化學品需求與改善環境表現的代表性案例 [2]。

在實務上，xylanase 生物漂白的效益通常表現在幾個方向：第一，可能降低後續漂白段的化學強度；第二，在不提高漂白負荷的情況下改善白度或亮度；第三，降低部分色度來源與可抽出有機物；第四，減少後端廢水的污染壓力。這些效益並非所有紙漿都會等幅出現，因為木聚醣含量、木質素殘留形態與前段蒸煮條件會影響反應結果。以農業纖維為基礎的綠色生物漂白研究也強調，酵素前處理在不同原料上具有潛力，但須依紙漿組成調整流程條件 [6]。



**Figure 2.** 在纖維尺度上，木聚醣酶作用於半纖維素，而不是直接氧化木質素或降解纖維素。

對於鹼性 xylanase 而言，能否承受接近現場的鹼性條件，是它相較一般 xylanase 更適合紙漿應用的原因。若酵素需要大幅偏離現有流程的 pH 或溫度，紙廠就必須付出更多水、蒸汽、酸鹼與時間成本；若酵素能在較接近流程條件下運作，整合阻力較低。鹼性半纖維素酶的研究正是針對此類工業相容性，包括鹼性穩定、耐熱與在複雜基質中的有效性 [5]。

## 主要應用二：廢紙去墨與回收纖維處理

廢紙去墨的難點在於油墨、塗佈物、膠黏物與老化纖維表面相互作用複雜。傳統去墨依靠鹼處理、表面活性劑、浮選、洗滌與機械分散；xylanase 的角色則是改變纖維表面的半纖維素層，使油墨粒子或細小污染物更容易從纖維分離。研究顯示，纖維素酶—木聚醣酶複合系統可用於紙漿改質與去墨效率提升，但酵素選擇性與處理強度會影響最終紙張性質 [8]。

與漂白前處理相比，去墨應用更需要控制纖維損傷。若酵素組合中纖維素酶作用過強，可能降低纖維長度或造成過度細化；而偏向木聚醣酶的表面改質，通常更適合作為較溫和的輔助方式。實驗室去墨研究也指出，酵素媒介流程可能同時影響白度、油墨脫附與部分污染物移除，因此需要以成紙品質與廢水負荷一起評估，而非只看單一去墨指標 [9]。

回收纖維來源差異很大，從辦公廢紙、舊報紙、瓦楞紙箱到混合回收紙，其纖維歷史與添加物組成都不同。熱鹼與酵素前處理在半化學機械稻草漿替代部分舊瓦楞紙箱漿的研究中，顯示酵素處理可作為改善非木材或回收纖維適用性的製程工具之一 [10]。這類研究對紙廠的啟示是：xylanase 不只用於白漿漂白，也可被納入回收纖維、農業纖維或混合原料的品質調整策略。

## 與傳統化學處理的比較

下表以製程角色比較鹼性木聚醣酶與常見化學處理。此表不是替代現場工程評估，而是協助理解 xylanase 在紙漿與造紙流程中的定位。

| 面向       | 鹼性木聚醣酶前處理                      | 傳統化學漂白 / 去墨強化         |
|----------|--------------------------------|-----------------------|
| 主要作用目標   | 木聚醣與半纖維素表面結構                   | 木質素、色團、油墨與污染物         |
| 作用方式     | 選擇性水解 $\beta$ -1,4 木聚醣主鏈，提升可及性 | 氧化、皂化、分散、溶出或浮選        |
| 對後續流程的影響 | 可能降低化學品強度、改善漂白或去墨效率            | 可直接提高白度或去墨，但負荷較高      |
| 對纖維強度的考量 | 條件適當時較溫和；過度處理仍可能影響纖維表面         | 條件過強可能造成纖維降解或強度下降     |
| 環境面      | 有機會降低部分漂白廢水負荷與化學需求             | 可能增加 COD、色度、鹽類或其他處理壓力 |
| 整合難點     | 需與 pH、溫度、停留時間及洗滌條件相容           | 製程熟悉度高，但藥劑與廢水成本持續受壓   |

紙漿與造紙廢水處理的經濟研究指出，先端製程的污染減量常會影響後端處理成本；因此，若酵素前處理能降低部分化學負荷或可溶性污染物，價值不只反映在漂白段，也可能反映在廢水系統穩定性與總處理費用上 [11]。



Figure 3. 酸性、中性與鹼性木聚醣酶在製程適配性上各有不同；其中鹼性木聚醣酶最適合許多牛皮紙漿、萃取、過氧化物處理與再生纖維環境。

## 製程整合：常見位置與條件邏輯

---

### 漂白前段

最常見的整合點是氧脫木質素後、主要化學漂白前，或在適合酵素作用的中間洗滌段前後。此時紙漿已去除大量可反應木質素，但仍保留會遮蔽殘餘木質素的半纖維素結構。xylanase 先行作用後，後續漂白劑可更有效接觸殘餘色團。紙漿生物漂白文獻多將此配置視為 xylanase 的典型應用方式 [1]。

### 廢紙碎解後或浮選前

在回收紙流程，xylanase 可安排於碎解後、浮選前，或與纖維調質步驟搭配。目標是促進油墨與纖維分離，並改善後續洗滌或浮選效果。若流程中已有強鹼、過氧化物或界面活性劑，酵素步驟通常需要考量相容性與先後順序，避免在不利條件下失去作用。去墨相關研究顯示，酵素處理的價值必須同時觀察油墨移除與紙漿物性變化 [9]。

### 農業纖維與非木材紙漿

稻草、鳳梨葉、竹材與其他農業纖維的半纖維素結構與木材不同，可能含有較多分枝或灰分，對酵素作用造成不同限制。鳳梨葉木質纖維素以 endo-1,4-xylanase 水解的研究顯示，pH、溫度、酵素添加量與反應時間都會影響半纖維素水解結果，說明非木材基質對條件敏感 [12]。竹纖維萃取研究也指出，酵素與鹼處理可形成協同機制，用於改善纖維分離與品質 [13]。

## 可觀察的效益：從白度、化學品、廢水到纖維表現

---

鹼性 xylanase 導入後最直接的觀察點通常是漂白反應效率。若前處理有效，紙廠可能在相同漂白配方下看到白度或亮度改善，也可能在維持目標白度的同時降低部分化學負荷。文獻對 xylanase 生物漂白的描述普遍集中於「bleach boosting」而非完全取代漂白，這是技術定位上最重要的界線 [6]。

第二個觀察點是廢水與環境指標。漂白與去墨廢水中的 COD、色度、懸浮物與有機鹵化物風險，會受到化學藥劑、原料與洗滌效率影響。xylanase 若能降低化學強度或促進可洗出雜質在前段被移除，就可能對後端處理形成正面影響。巴西紙漿與造紙廢水綜述指出，紙廠廢水特性高度依製程而異，因此前端減量與後端處理需一起看待 [3]。

第三個觀察點是纖維與成紙品質。適度 xylanase 表面改質可能改善纖維柔軟度、結合性或成形表現；但若處理過度，半纖維素流失也可能影響纖維間鍵結。近年針對纖維基質發展的無細胞酵素組合研究，亦將排水性、強度與低碳製程視為紙業酵素應用的關鍵評估方向 [14]。因此，實務上不應只追求最大水解，而應追求「足以改善後續流程、但不破壞纖維價值」的處理程度。

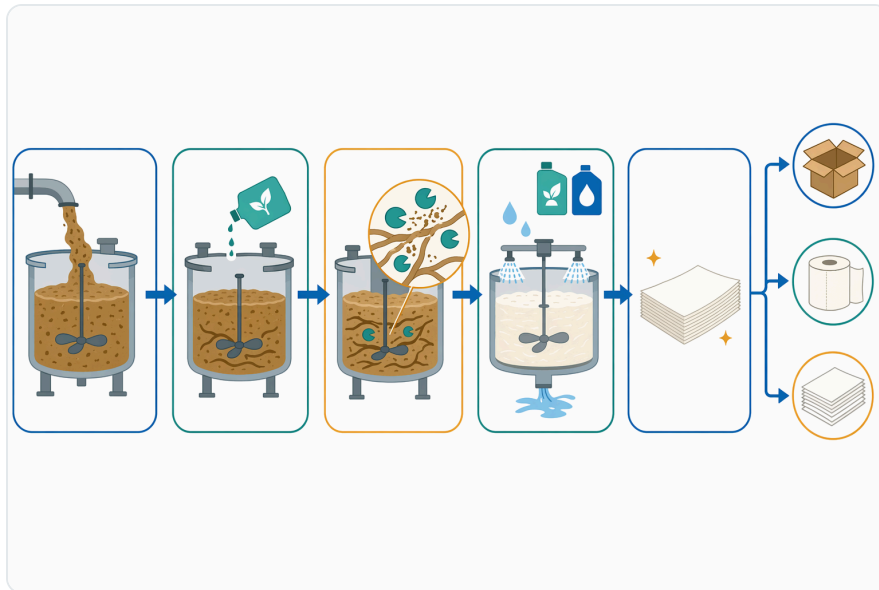


Figure 4. 在牛皮紙漿漂白增效中，木聚醣酶通常安排在主要氧化漂白階段之前，以提高木質素的可及性。

## 證據強度與目前限制

### 證據較充分的部分

xylanase 可用於紙漿生物漂白、降低漂白阻力、輔助廢紙去墨與改善部分纖維處理，這些方向已有多篇綜述、實驗研究與產業導向文獻支持。紙漿與造紙用 xylanolytic enzymes 的綜述明確指出，木聚醣酶在環境友善漂白、減少化學負荷與提升製程效率方面具有持續研究與應用價值 [1]。

此外，鹼性與耐熱特性的重要性也有清楚科學基礎。工業紙漿流程常需要酵素在不完全溫和的環境中作用，若酵素在偏鹼或較高溫條件下迅速失活，實務價值會降低。鹼性活性半纖維素酶的研究正是為了讓此類酵素更接近洗滌、漂白與纖維處理條件 [5]。

### 仍需依現場差異判讀的部分

不同紙漿的木聚醣含量、木質素殘留、抽出物、灰分與先前處理歷史差異很大，因此同一類 xylanase 在不同工廠不會產生完全相同結果。酵素在農業殘餘物、未處理木質纖維素與不同半纖維素結構中的反應，會受到基質可及性與側鏈結構限制；近年木質纖維素水解研究也反覆指出，酵素效果與基質結構高度相關 [15]。

另一個限制是酵素組合的平衡。xylanase 與其他輔助酵素可能有協同作用，但如果纖維素酶或其他水解酵素比例不當，可能造成紙漿強度或濾水性的非預期變化。關於木質纖維素酵素雞尾酒的研究強調，配方必須配合基質與目的調整，而不是以固定組合套用所有原料 [16]。

## Enzymes.bio 供應資訊與文件透明度

Enzymes.bio 提供 Industrial Alkaline Xylanase For Pulp And Paper Processing 作為紙漿與造紙加工用酵素供應品項，產品以 1 kg 單位在線上銷售。CoA 與 SDS 會隨訂單一併提供，方便客戶在內部品質、倉儲、安全與製程導入流程中使用相關文件。需明確說明的是，Enzymes.bio 是供應商，不是製造商，也不是第三方檢測實驗室。

因此，本文件不以製造商口吻聲稱特定批次表現，也不提供具體活性單位數值、活性單位定義、等級或分析方法。本文重點是整理公開研究中對鹼性木聚醣酶在紙漿漂白、廢紙去墨與纖維處理的機制、應用邏輯與可觀察效益，協助技術與採購團隊理解此類酵素在流程中的合理定位。



Figure 5. 當木聚醣限制可及性時，木聚醣酶可支援牛皮紙漿漂白、非木材紙漿處理、回收纖維脫墨，以及更潔淨的纖維加工。

## 實務導入時的評估重點

導入鹼性 xylanase 時，最重要的是把它放進完整製程平衡來看。若目標是漂白增效，應觀察白度或亮度、後續漂白化學品需求、洗滌後濾液負荷與成紙強度。若目標是廢紙去墨，則應同時關注油墨脫附、浮選效率、白度、黏著物行為與纖維保留。若目標是農業纖維或非木材紙漿改質，則需注意半纖維素移除程度與纖維完整性之間的平衡。紙業酵素應用文獻一再顯示，單一指標不足以代表整體效益 [2]。

在流程條件上，偏鹼性相容性、溫度耐受性、接觸時間與混合效率會直接影響效果。這些條件不是孤立變數：提高溫度可能加快反應，也可能加速失活；延長時間可能提升水解，也可能增加纖維表面變化；提高鹼性可能符合現場流程，卻不一定是酵素最佳條件。木聚醣酶水解研究已顯示，pH、溫度、添加量與反應時間會共同影響半纖維素水解結果 [12]。

最後，應將酵素成本與全流程收益一起衡量。若 xylanase 能降低部分化學品用量、改善廢水負荷、提升回收纖維可用性或穩定產品品質，其價值可能不只出現在單一漂白槽，而是反映在化學採購、蒸汽與水耗、廢水處理、紙機運行與成品等級穩定性上。紙漿與紙板製造廢水的永續處理研究也指出，前端製程調整與後端生物處理經濟性彼此相關 [17]。

## 結論：鹼性 xylanase 是紙漿與造紙減化學、增效率的實用生物工具

工業用鹼性木聚醣酶的價值來自其選擇性：它不以強氧化方式直接漂白，而是針對木聚醣與半纖維素屏障進行酵素改質，提升後續漂白、洗滌或去墨步驟的可及性。這使它特別適合用於紙漿生物漂白、廢紙去墨輔助、回收纖維品質改善，以及部分非木材或農業纖維處理。

現有研究支持 xylanase 在紙漿與造紙領域具有降低化學負荷、改善漂白效率、輔助去墨與減輕環境壓力的潛力；但實際效益必須依原料、流程與成品質量目標判讀。對需要 1 kg 單位線上採購並進行內部製程評估的客戶，Enzymes.bio 提供此類工業用鹼性 xylanase 供應品項，並隨訂單提供 CoA 與 SDS，以支援後續內部文件與安全管理流程。

### 線上訂購 Industrial Alkaline Xylanase For Pulp And Paper Processing

以 1 kg 單位販售，現貨供應，可立即出貨。請直接於我們的線上商店下單並付款，我們將為您處理訂單。每筆訂單皆附分析證明書與安全資料表。

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

## 參考文獻

依首次引用順序編號。所有來源皆為開放取用資料，並於發布時確認可連線；正文中的引用編號會連結至此。

1. Gupta, G. K., Dixit, M., Kapoor, R., & Shukla, P. (2021). Xylanolytic Enzymes in Pulp and Paper Industry: New Technologies and Perspectives. *Molecular Biotechnology*, 64, 130 - 143.
2. Bajpai, P. (2018). Biotechnology for Pulp and Paper Processing. *Biotechnology for Pulp and Paper Processing*.
3. Ramos, M. D., Rangel, A. O. S. S., Azevedo, K. S., Melo, M. G. B., Oliveira, M., Watanabe, C. M. U., Pereira, F. F., ... et al. (2022). Characteristics and treatment of Brazilian pulp and paper mill effluents: a review. *Environmental Monitoring & Assessment*, 194.
4. 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.
5. Mamo, G. (2019). Alkaline Active Hemicellulases. *Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*.

6. Sharma, A., Balda, S., Gupta, N., Capalash, N., & Sharma, P. (2020). Enzyme cocktail: An opportunity for greener agro-pulp biobleaching in paper industry. *Journal of Cleaner Production*, 271, 122573.
7. Flora, S., Martina, A., Gabriella, F., David, C., Eveline, P., & Danila, L. (2024). A novel endo-1,4- $\beta$ -xylanase from Alicyclobacillus mali FL18: Biochemical characterization and its synergistic action with  $\beta$ -xylosidase in hemicellulose deconstruction. *International Journal of Biological Macromolecules*, 130550 .
8. Kumar, N. V., Rani, M. E., Gunaseeli, R., & Kannan, N. (2018). Paper pulp modification and deinking efficiency of cellulase-xylanase complex from Escherichia coli SD5. *International Journal of Biological Macromolecules*, 111, 289-295 .
9. Nathan, V. K., Rani, M. E., Gunaseeli, R., & Kannan, N. (2018). Enhanced biobleaching efficacy and heavy metal remediation through enzyme mediated lab-scale paper pulp deinking process. *Journal of Cleaner Production*.
10. Lai, Y., Sun, H., Chang, M., Li, C., Shyu, J., & Perng, Y. (2022). Feasibility of substituting old corrugated carton pulp with thermal alkali and enzyme pretreated semichemical mechanical rice straw pulp. *Scientific Reports*, 12.
11. Dagar, S., Singh, S., & Gupta, M. K. (2022). Economics of advanced technologies for wastewater treatment: Evidence from pulp and paper industry. *Frontiers in Environmental Science*, 10.
12. Rosdee, N. A. S. M., Masngut, N., Shaarani, S., Jamek, S., & Sueb, M. S. M. (2020). Enzymatic hydrolysis of lignocellulosic biomass from pineapple leaves by using endo-1,4-xylanase: Effect of pH, temperature, enzyme loading and reaction time. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 736.
13. Wang, B., Wang, N., Duan, C., Li, J., Chen, H., Xu, J., Zeng, J., ... et al. (2024). Extraction of high-quality moso bamboo fibers by enzyme/alkali synergistic mechanism. *International Journal of Biological Macromolecules*, 137230 .
14. Barrios, N., Gonzalez, M., Venditti, R. A., & Pal, L. (2025). Synergistic cell-free enzyme cocktails for enhanced fiber matrix development: improving dewatering, strength, and decarbonization in the paper industry. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*, 18.
15. Cheng, H., Hsu, W., Su, Y., Lee, Y., Tangthi, H. N., Wu, C., & Lee, L. (2024). Cross-linked enzyme aggregates of xylanase, XynR8(N58D), for effective degradation of untreated lignocellulosic biomass. *Biocatalysis and Biotransformation*, 42, 629 - 643.
16. Moya, E. B., Syhler, B., Dragone, G., & Mussatto, S. (2024). Tailoring a cellulolytic enzyme cocktail for efficient hydrolysis of mildly pretreated lignocellulosic biomass. *Enzyme and Microbial Technology*, 175, 110403 .
17. Tawfik, A., Bakr, M. H., Nasr, M., Haider, J., Mesfer, M. K., Lim, H., Qyyum, M., ... et al. (2021). Economic and environmental sustainability for anaerobic biological treatment of wastewater from paper and cardboard manufacturing industry. *Chemosphere*, 133166 .


## 聯絡 Enzymes.bio

對訂單有疑問嗎？我們的團隊很樂意協助。


電子郵件 [wholesale@enzymes.bio](mailto:wholesale@enzymes.bio)

電話 ( 美國 ) **+1 (507) 428-6057**

[聯絡我們 →](#)

 **400+** B2B 客戶

 **60+** 大學研究合作夥伴

 **54** 服務遍及全球

© 2026 Enzymes.bio · 工業與食品加工用酵素供應 · 非供人體食用或零售銷售。