

Ksylanaza alkaliczna przemysłowa do biobielenia mas celulozowych i przetwarzania papieru

Zespół badawczy Enzymes.bio · Wellington, Nowa Zelandia · June 19, 2026

Ksylanaza alkaliczna w przemyśle celulozowo-papierniczym służy przede wszystkim jako enzymatyczny „bleach booster”: selektywnie modyfikuje ksylan w hemicelulozie, ułatwiając usuwanie ligniny resztkowej i związków barwnych w kolejnych etapach bielenia. Dzięki pracy w środowisku zasadowym może być integrowana z procesami typowymi dla mas kraft, ECF, mas z surowców nieдрzewnych oraz wybranych strumieni papieru odzyskanego, gdzie celem jest poprawa podatności masy na bielenie i ograniczenie obciążenia chemicznego procesu. Enzymes.bio dostarcza ten produkt jako dostawca B2B w jednostkach 1 kg sprzedawanych online; CoA i SDS są dostarczane wraz z zamówieniem .

Czym jest przemysłowa ksylanaza alkaliczna dla pulp and paper processing

Ksylanaza jest enzymem hydrolitycznym rozkładającym ksylan — główny polisacharyd frakcji hemicelulozowej w wielu surowcach lignocelulozowych. W masie celulozowej ksylan występuje w ścianie komórkowej włókna, na powierzchni włókien oraz w pobliżu ligniny resztkowej; jego częściowa, kontrolowana hydroliza może zmienić dostępność chemiczną struktury włóknistej bez bezpośredniego utleniania ligniny, dlatego ksylanazy są badane i stosowane jako element bardziej „zielonego” podejścia do produkcji masy i papieru ^[1].

Określenie „alkaliczna” oznacza, że enzym jest dobierany pod kątem aktywności i stabilności w środowisku zasadowym, istotnym dla wielu etapów produkcji mas celulozowych. Nie jest to detal kosmetyczny: wiele operacji papierniczych, zwłaszcza po gotowaniu alkalicznym i w sekwencjach bielących, nie przebiega w warunkach neutralnych. Z tego powodu literatura dotycząca ksylanaz papierniczych zwraca uwagę na warianty alkalofilne, termotolerancyjne i stabilne procesowo, w tym enzymy z mikroorganizmów takich jak *Bacillus*, *Penicillium*, *Trichoderma* czy grzyby strzępkowe ^[2].

W praktyce przemysłowej ksylanaza alkaliczna nie jest samodzielnym środkiem bielącym w takim sensie jak dwutlenek chloru, tlen, ozon lub nadtlenek wodoru. Jej zadaniem jest przygotowanie masy: enzym przecina wiązania w szkielecie ksylanu, co może uwalniać fragmenty hemicelulozy, zmniejszać

barierę dyfuzyjną dla chemikaliów bielących i ułatwiać wypłukiwanie materiału powiązanego z ligniną. Tę funkcję określa się często jako biobielenie lub enzymatyczne wspomaganie bielenia, a nie jako pełną zamianę klasycznej chemii procesu [3].

Dlaczego ksylan jest ważny w bieleniu masy celulozowej

Włókno papiernicze nie jest jednorodną „czystą celulozą”. Po gotowaniu i płukaniu pozostaje w nim mieszanina celulozy, hemiceluloz, ligniny resztkowej, ekstraktów i produktów reakcji technologicznych. Ksylan, jako składnik hemicelulozy, może być osadzony na powierzchni włókien, szczególnie po procesach alkalicznych, i tworzyć fizyczno-chemiczną barierę utrudniającą dostęp reagentów bielących do ligniny resztkowej. Przeglądy dotyczące enzymów w papiernictwie wskazują właśnie na modyfikację tej frakcji jako główny powód zainteresowania ksylanazami w procesach bielenia [1].

Mechanizm nie polega na mechanicznym „czyszczeniu” włókna, lecz na selektywnej hydrolizie hemicelulozy. Ksylanaza atakuje wiązania w łańcuchu ksylanu, skracając polimer do mniejszych fragmentów, które łatwiej przechodzą do fazy wodnej. Jeśli fragmenty ksylanu wiążą lub osłaniają ligninę, ich częściowe usunięcie poprawia późniejszą delignifikację lub odbarwienie. W badaniach nad biobieleniem mas papierniczych ksylanazy opisywano jako enzymy zwiększające efektywność bielenia bez konieczności bezpośredniego rozkładu celulozy [4].

Istotne jest rozróżnienie między korzystną modyfikacją hemicelulozy a nadmiernym naruszeniem włókna. Papiernia oczekuje poprawy jasności, podatności na bielenie lub redukcji chemikaliów, ale nie kosztem spadku wytrzymałości arkusza. Dlatego w zastosowaniach pulp and paper szczególnie ceniona jest selektywność wobec ksylanu oraz ograniczanie niepożądanych reakcji ubocznych w stosunku do celulozy. Literatura poświęcona enzymatycznemu ulepszaniu mas kraft pokazuje, że dobór enzymu i warunków procesu wpływa na równowagę między modyfikacją hemiceluloz a zachowaniem wartości włókna [5].

Główne zastosowania w przemyśle celulozowo-papierniczym

Biobielenie mas kraft

Najlepiej ugruntowanym zastosowaniem ksylanazy alkalicznej jest etap przedbielenia lub wspomaganie bielenia mas kraft. Po gotowaniu kraft znacząca część ligniny jest usunięta, ale masa nadal zawiera ligninę resztkową i związki chromoforowe. Ksylanaza może zwiększyć dostępność tych składników dla kolejnych operacji, dzięki czemu sekwencja bielenia może pracować efektywniej. Prace dotyczące biobielenia masy papierniczej z użyciem ksylanazy produkowanej przez *Trichoderma asperellum* wskazują na praktyczne znaczenie takiego enzymatycznego etapu w przemyśle pulp and paper [3].

W procesach kraft ważna jest również kompatybilność z realnym profilem pH i temperatury. Klasyczna ksylanaza o aktywności tylko w warunkach łagodnych może wyglądać obiecująco w modelowym układzie, ale tracić znaczenie w kontakcie z gorącą, zasadową masą. Dlatego badania nad ulepszaniem alkalofilności ksylanaz, na przykład poprzez modyfikację wariantów enzymów z *Bacillus*, są bezpośrednio związane z potrzebami papiernictwa, gdzie enzym musi działać w środowisku trudniejszym niż typowy bufor laboratoryjny [2].

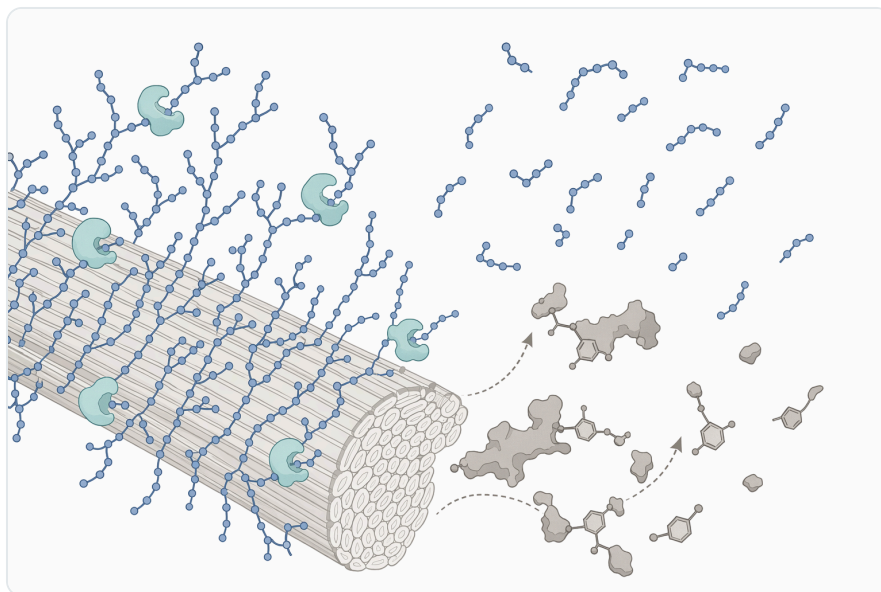


Figure 1. 알칼리성 자일라나아제는 표면에 결합된 자일란을 가수분해하여, 이후 표백이나 세정 공정의 화학물질이 섬유에 결합된 리그닌과 오염물질에 더 효과적으로 접근할 수 있게 합니다.

Wspomaganie sekwencji ECF

Procesy ECF, czyli bielenie bez elementarnego chloru, wykorzystują m.in. dwutlenek chloru i inne utleniacze w sekwencjach dobranych do konkretnej masy. Ksylanaza może działać przed etapem ECF jako środek zwiększający podatność masy na działanie chemii bielącej. Badanie ksylanazy A z *Bacillus halodurans* C-125 opisuje jej efekt wzmacniający w bieleniu ECF masy ze słomy pszennej, co jest dobrym przykładem zastosowania enzymu jako elementu sekwencji, a nie jako samodzielnej alternatywy dla całej instalacji bielącej [6].

Znaczenie ECF jest szczególnie duże tam, gdzie zakład chce ograniczać powstawanie halogenowanych produktów ubocznych i jednocześnie utrzymywać wymaganą jasność masy. Enzymatyczne wspomaganie może pozwalać na lepsze wykorzystanie chemikaliów już obecnych w sekwencji, ponieważ zwiększa dostępność ligniny reszkowej i produktów barwnych. W praktyce efekt zależy od

gatunku surowca, sposobu gotowania, liczby Kappa, udziału hemicelulozy i kolejności etapów, dlatego ksylanazę należy traktować jako narzędzie procesowe, którego działanie ujawnia się w konkretnym układzie technologicznym ^[4].

Masy z surowców nieдрzewnych

Surowce nieдрzewne, takie jak słoma pszenna, trzcina, bagassa lub inne materiały rolnicze, mogą mieć odmienny skład hemiceluloz i popiołu niż drewno. W takich masach ksylan i jego pochodne mogą znacząco wpływać na przebieg bielenia. Przykład bielenia ECF masy ze słomy pszennej z udziałem ksylanazy pokazuje, że enzymatyczne wspomaganie nie ogranicza się do klasycznych mas drzewnych, lecz może być rozpatrywane także w kontekście alternatywnych włókien roślinnych ^[6].

Dla surowców nieдрzewnych szczególnie ważna jest zmienność składu partii surowca. Zawartość hemiceluloz, ligniny, krzemionki i ekstraktów może się zmieniać wraz z sezonem, regionem i metodą przygotowania. Ksylanaza może być użyteczna, gdy ograniczeniem procesu jest dostępność ksylanu lub ligniny związanej ze strukturą hemicelulozową, ale nie rozwiąże problemów wynikających wyłącznie z obecności zanieczyszczeń mineralnych, niedostatecznego płukania lub nieoptymalnego gotowania.

Papier odzyskany i strumienie recyklingowe

W recyklingu papieru enzymy są rozważane jako sposób łagodniejszej obróbki masy, poprawy podatności włókien na oczyszczanie i ograniczania obciążenia chemicznego. Ksylanaza może wspierać modyfikację frakcji hemicelulozowej w masach wtórnych, szczególnie wtedy, gdy celem jest poprawa jasności lub usuwanie związków barwnych powiązanych ze strukturą włóknistą. Badania nad wykorzystaniem papieru odpadowego jako surowca indukcyjnego do produkcji enzymów pokazują również, że strumienie odpadowe papiernictwa mogą być powiązane z gospodarką obiegu zamkniętego wokół enzymów lignocelulolitycznych ^[7].

Trzeba jednak oddzielić dwa zagadnienia: produkcję enzymu z wykorzystaniem odpadów papierowych oraz zastosowanie gotowej ksylanazy w recyklingu papieru. Z punktu widzenia zakładu papierniczego najważniejsze jest to drugie — czy enzym poprawia parametry masy, ogranicza zapotrzebowanie na chemikalia lub ułatwia osiągnięcie wymaganej jasności. W masach odzyskanych efekty mogą być bardziej zmienne niż w świeżej masie kraft, ponieważ wsad zawiera różne typy włókien, wypełniacze, farby drukarskie, kleje i dodatki mokrej części.

Jak ksylanaza alkaliczna działa na poziomie włókna

Hydroliza ksylanu i odsłanianie ligniny resztkowej

Podstawowym działaniem ksylanazy jest hydroliza łańcucha ksylanu, czyli rozcinanie wiązań glikozydowych w hemicelulozie. Włókno po gotowaniu alkalicznym może zawierać ksylan częściowo redeponowany na powierzchni, co utrudnia penetrację chemikaliów bielących. Gdy enzym skraca łańcuchy ksylanu, część tej warstwy staje się bardziej rozpuszczalna i łatwiejsza do wypłukania, a lignina resztkowa jest bardziej dostępna dla następných etapów procesu [1].

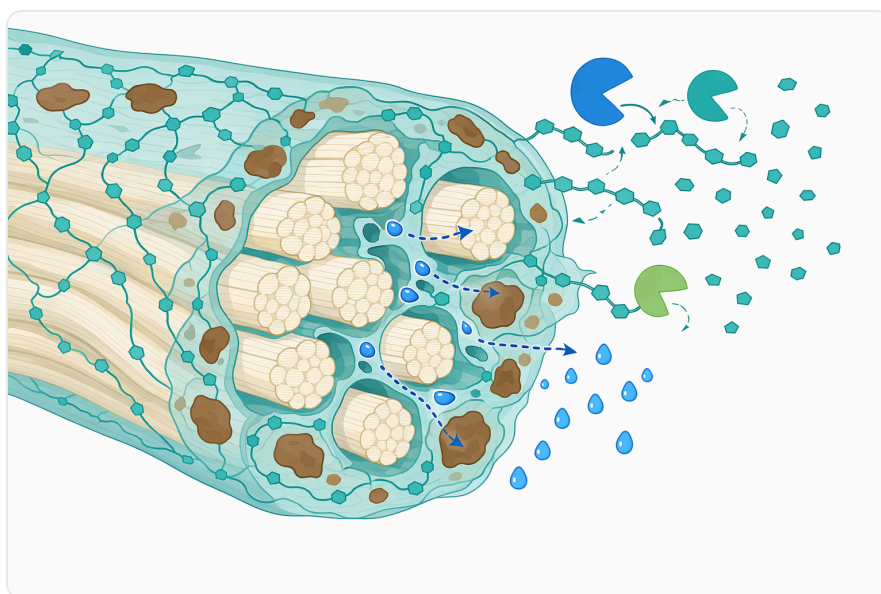


Figure 2. 섬유 수준에서 자일라나아제는 리그닌을 직접 산화하거나 셀룰로오스를 분해하는 것이 아니라 헤미셀룰로오스에 작용합니다.

Ten mechanizm tłumaczy, dlaczego ksylanaza jest określana jako booster bielenia. Sama nie musi silnie obniżać zawartości ligniny w taki sposób jak etap tlenowy lub chlorodioksydowy, ale może poprawić skuteczność tych etapów. W efekcie zakład może obserwować lepszą odpowiedź masy na tę samą sekwencję bielącą albo możliwość złagodzenia wybranego fragmentu procesu, o ile pozwalają na to cele jakościowe i ograniczenia instalacji.

Kompleksy lignina–węglowodany

W masie lignocelulozowej lignina nie występuje wyłącznie jako swobodna, łatwa do wymycia frakcja. Część ligniny może być powiązana z węglowodanami, tworząc struktury określane jako kompleksy lignina–węglowodany. Modyfikacja hemicelulozy przez ksylanazę może osłabiać tę architekturę i

ułatwiać usuwanie związków odpowiedzialnych za barwę. Z tego powodu enzymy oddziałujące na hemicelulozę oraz enzymy modyfikujące ligninę są często omawiane wspólnie w kontekście bardziej zrównoważonej produkcji mas i papieru [8].

Z punktu widzenia praktycznego oznacza to, że ksylanaza nie musi „rozpuścić” dużej ilości masy, aby przynieść efekt technologiczny. Nawet częściowa zmiana powierzchni włókna lub miejsc styku hemicelulozy z ligniną może zmienić kinetykę dalszego bielenia. Dlatego dawka procesu, czas kontaktu i miejsce w sekwencji mają znaczenie większe niż sama deklaracja, że enzym jest ksylanazą.

Znaczenie selektywności względem celulozy

Celuloza jest nośnikiem wytrzymałości papieru. Enzym stosowany w papiernictwie powinien wspierać usuwanie lub modyfikację frakcji utrudniających bielenie, ale nie powodować niekontrolowanej degradacji włókna. W literaturze dotyczącej biobielenia i produkcji ksylanaz dla papiernictwa często podkreśla się potrzebę enzymów o działaniu ukierunkowanym na ksylan, ponieważ nadmierna aktywność wobec celulozy mogłaby pogorszyć właściwości mechaniczne masy [4].

Nie oznacza to, że każda zmiana hemicelulozy jest neutralna dla papieru. Hemicelulozy wpływają na pęcznienie, wiązania międzywłóknowe i retencję wody, dlatego zbyt agresywna obróbka może zmieniać nie tylko jasność, lecz także odwadnianie, wytrzymałość i właściwości powierzchniowe arkusza. Właśnie dlatego ksylanaza alkaliczna powinna być integrowana z procesem jako precyzyjny etap technologiczny, a nie jako uniwersalny dodatek dozowany bez związku z celem operacji.

Warunki procesowe: pH, temperatura, czas kontaktu i konsystencja masy

Ksylanazy do zastosowań papierniczych muszą działać w środowisku, które często jest zasadowe, gorące i bogate w pozostałości chemikaliów procesowych. Zwykła aktywność enzymatyczna w warunkach łagodnych nie wystarcza, jeśli enzym szybko traci strukturę lub aktywność po kontakcie z masą. Badania nad alkalicznymi ksylanazami z różnych źródeł, w tym nad zwiększaniem alkalofilności enzymów bakteryjnych, pokazują, że stabilność w zasadowym zakresie pH jest jedną z kluczowych cech dla zastosowań przemysłowych [2].

Temperatura działa dwukierunkowo. Wyższa temperatura może przyspieszać reakcję enzymatyczną i pasować do gorących strumieni procesowych, ale jednocześnie zwiększa ryzyko denaturacji enzymu. Dlatego w literaturze zwraca się uwagę na ksylanazy termotolerancyjne i alkalifilne, w tym enzymy z organizmów przystosowanych do trudnych warunków. Przykładem są prace opisujące termotolerancyjne alkalifilne ksylanazy jako biokatalizatory potencjalnie użyteczne w procesach przemysłowych wymagających podwyższonej stabilności [9].



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

Czas kontaktu i konsystencja masy decydują o tym, czy enzym dotrze do substratu. W zbyt krótkim etapie enzym może nie zdążyć zmodyfikować wystarczającej ilości ksylanu; w zbyt długim może pojawić się ryzyko niepożądanego zmiany właściwości masy lub utrata korzyści operacyjnych. Konsystencja wpływa na mieszanie, dyfuzję, wymianę ciepła i równomierność kontaktu enzymu z włóknem. Są to parametry procesowe, które zakład ustala w odniesieniu do konkretnej linii, a nie wartości uniwersalne dla wszystkich papierni.

Porównanie podejść do bielenia i roli ksylanazy

Podejście procesowe	Główne działanie	Potencjalna korzyść	Ograniczenie praktyczne
Klasyczne bielenie chemiczne bez etapu enzymatycznego	Utlenianie i usuwanie ligniny resztkowej głównie za pomocą chemikaliów	Ugruntowana technologia, przewidywalna integracja z istniejącą linią	Może wymagać większego obciążenia chemicznego i generować wyższe obciążenie ścieków
Ksylanaza przed sekwencją bielącą	Hydroliza ksylanu i zwiększenie dostępności ligniny oraz chromoforów	Lepsza podatność masy na bielenie, możliwość łagodzenia wybranych etapów	Efekt zależy od typu masy, pH, temperatury, czasu kontaktu i składu hemiceluloz ^[1]
Ksylanaza w ECF	Enzymatyczne przygotowanie masy przed	Wzmocnienie odpowiedzi na sekwencję ECF; opisane dla masy ze słomy pszennej	Nie zastępuje całej sekwencji ECF; wymaga

Podejście procesowe	Główne działanie	Potencjalna korzyść	Ograniczenie praktyczne
	etapami bez chloru elementarnego		dopasowania do konkretnego surowca [6]
Układy enzymatyczne łączone	Modyfikacja kilku frakcji ściany komórkowej, np. hemiceluloz i składników towarzyszących	Możliwa synergia w specyficznych masach	Większa złożoność procesu i potrzeba kontroli wpływu na właściwości włókna
Enzymy modyfikujące ligninę	Oddziaływanie na ligninę lub związki fenolowe	Potencjał w zrównoważonej produkcji pulp and paper	Inny mechanizm niż ksylanaza; wymaga osobnego dopasowania do sekwencji [8]

Tabela pokazuje najważniejszą różnicę: ksylanaza alkaliczna nie konkuruje bezpośrednio z utleniaczami jako ich prosta kopia biologiczna. Jej wartość polega na zmianie strukturalnej dostępności masy, dzięki której chemia bielenia może działać w korzystniejszych warunkach. To podejście jest szczególnie atrakcyjne w zakładach, które chcą stopniowo zmniejszać wpływ środowiskowy procesu, ale nie mogą ryzykować utraty parametrów papieru.

Korzyści technologiczne i środowiskowe

Możliwość ograniczania intensywności chemicznej bielenia

Najczęściej opisywaną korzyścią ksylanazy w papiernictwie jest zmniejszenie zapotrzebowania na intensywne bielenie chemiczne przy zachowaniu docelowej jakości masy. Przeglądy dotyczące zastosowania ksylanazy i lakazy w bardziej ekologicznym przemyśle pulp and paper wskazują na enzymy jako narzędzia pozwalające ograniczać obciążenie środowiskowe konwencjonalnych procesów, w tym przez wspomaganie bielenia i redukcję ilości agresywnych reagentów [1].

Warto jednak formułować tę korzyść precyzyjnie. Ksylanaza nie gwarantuje automatycznie redukcji każdego środka chemicznego w każdej pielni. Jej wpływ zależy od tego, czy w danej masie frakcja ksylanowa rzeczywiście ogranicza dostępność ligniny i czy sekwencja bielenia jest wrażliwa na taką zmianę. Najbardziej realistyczne oczekiwanie to poprawa podatności masy na bielenie, którą zakład może wykorzystać do optymalizacji jasności, zużycia chemikaliów lub stabilności procesu.

Niższy potencjał powstawania niepożądanych produktów ubocznych

Mniejsza intensywność niektórych etapów chemicznych może oznaczać niższe obciążenie ścieków i mniejsze ryzyko powstawania niepożądanych produktów ubocznych. W kontekście bielenia pulpy and paper szczególnie często dyskutuje się adsorbowalne halogenki organiczne oraz ogólne obciążenie organiczne ścieków. Zastosowanie enzymów jako etapów wspomagających wpisuje się w trend ograniczania wpływu procesów celulozowo-papierniczych na środowisko [8].

Należy przy tym pamiętać, że enzym sam również wprowadza do procesu substancję organiczną, a jego działanie uwalnia rozpuszczalne fragmenty hemicelulozy. Dlatego korzyść środowiskowa nie wynika z samego faktu użycia enzymu, lecz z bilansu całej sekwencji: mniejszego obciążenia chemicznego, łatwiejszego płukania, niższego zużycia utleniaczy lub poprawy wydajności kolejnych etapów. Dobrze zaprojektowany etap ksylanazowy powinien być oceniany właśnie w takim ujęciu systemowym.

Ochrona wartości włókna

W papiernictwie parametry optyczne nie są jedynym celem. Jasność musi iść w parze z wytrzymałością, odwadnianiem, podatnością na formowanie arkusza i stabilnością pracy maszyny papierniczej. Selektywna ksylanaza daje możliwość ingerencji w frakcję hemicelulozową bez założenia głębokiej degradacji celulozy. Badania nad enzymatycznym ulepszaniem mas kraft pokazują, że enzymy mogą być wykorzystywane do celowanej zmiany właściwości masy, ale wynik zależy od specyfiki enzymu i sposobu prowadzenia procesu [5].

Z tego powodu korzyści należy interpretować łącznie. Poprawa jasności przy pogorszeniu wytrzymałości może być nieakceptowalna, podobnie jak redukcja chemikaliów, która powoduje niestabilną jakość arkusza. Najbardziej wartościowe zastosowanie ksylanazy alkalicznej to takie, w którym enzym poprawia dostępność masy na tyle, aby wspierać bielenie, ale nie zmienia nadmiernie struktury włókna.

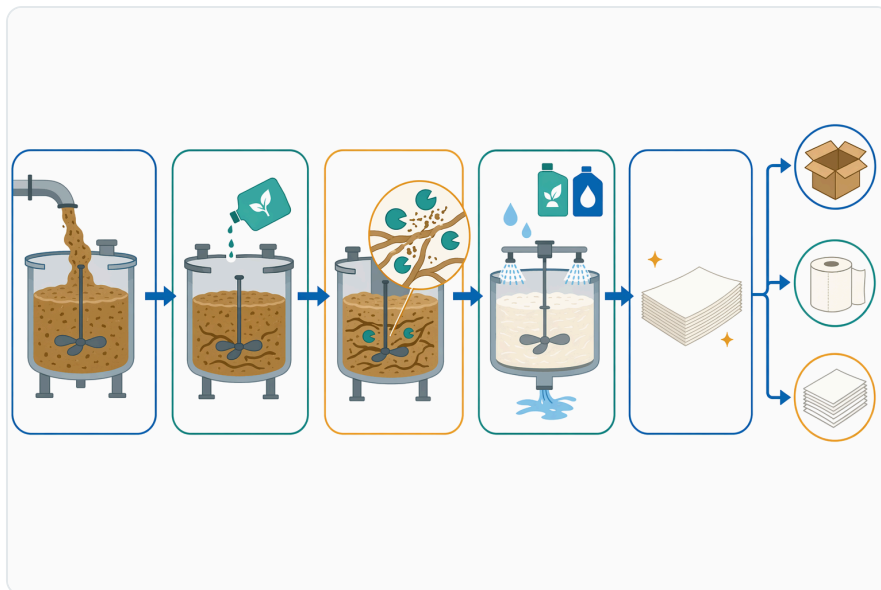


Figure 4. 크라프트 펄프 표백 강화에서 자일라나아제는 일반적으로 주요 산화 표백 단계 전에 투입되어 리그닌 접근성을 높입니다.

Ograniczenia i realistyczne oczekiwania wobec enzymu

Pierwszym ograniczeniem jest specyficzność substratowa. Ksyłanaza działa na ksyłan, więc jej wpływ będzie największy tam, gdzie frakcja ksyłanowa ogranicza proces. Jeśli problem bielenia wynika głównie z wysokiej zawartości ligniny, niewystarczającego gotowania, złego płukania, obecności metali katalizujących rozkład nadtlenu lub zmienności dodatków, sama ksyłanaza nie usunie przyczyny. Literatura dotycząca ksyłanaz papierniczych opisuje je jako narzędzia wspomagające, a nie uniwersalne rozwiązanie wszystkich problemów jakości masy ^[1].

Drugim ograniczeniem jest stabilność w warunkach rzeczywistej linii. Enzymy są białkami, a więc ich struktura może być wrażliwa na temperaturę, skrajne pH, środki utleniające, siły ścinające i skład jonowy. Rozwój wysoko alkalicznie stabilnych ksyłanaz, w tym poprzez inżynierię powierzchniowego ładunku białka, pokazuje, że stabilność w środowisku zasadowym jest aktywnym obszarem badań, a nie cechą, którą można zakładać dla każdej ksyłanazy ^[10].

Trzecim ograniczeniem jest integracja z sekwencją bielenia. Jeśli enzym zostanie dodany w punkcie, w którym masa zawiera silne utleniacze lub warunki natychmiast dezaktywujące białko, korzyść może być minimalna. Jeśli zostanie zastosowany przed zbyt intensywnym płukaniem lub bez czasu kontaktu, również nie wykorzysta swojego potencjału. Dlatego w dokumentacji procesowej ksyłanaza powinna być rozpatrywana razem z kolejnością operacji: zagęszczaniem, ogrzewaniem, mieszaniem, pH masy, płukaniem i późniejszym etapem bielącym.

Rola ksylanazy w strategii zrównoważonej produkcji papieru

Przemysł celulozowo-papierniczy od lat zmniejsza obciążenie środowiskowe poprzez przechodzenie na bardziej selektywne sekwencje bielące, zamykanie obiegów wody, odzysk chemikaliów i lepszą kontrolę ścieków. Enzymy wpisują się w ten kierunek, ponieważ działają katalitycznie i selektywnie, a ich zadaniem jest poprawa efektywności procesów, które wcześniej wymagały ostrzejszych warunków chemicznych. Prace przeglądowe o ksylanazie i lakazie przedstawiają enzymy jako część „greener approach” dla sektora pulp and paper ^[1].

Nie należy jednak przedstawiać enzymatyzacji jako automatycznie bezemisyjnej lub całkowicie neutralnej. Produkcja, transport, magazynowanie i użycie enzymu również mają swój ślad materiałowy. Realna korzyść pojawia się wtedy, gdy enzym pozwala ograniczyć bardziej obciążające etapy, poprawić wydajność bielenia, zmniejszyć odrzuty jakościowe lub obniżyć wymagania oczyszczania ścieków. Właśnie dlatego ksylanaza alkaliczna jest najbardziej przekonująca jako element optymalizacji procesu, a nie jako hasło marketingowe oderwane od bilansu technologicznego.

Znaczenie źródła enzymu i rozwoju biokatalizatorów

Ksylanazy mogą pochodzić z bakterii, grzybów i innych mikroorganizmów, a różnice między nimi są praktycznie istotne. Enzymy bakteryjne z rodzaju *Bacillus* często są badane ze względu na alkalofilność, natomiast enzymy grzybowe mogą wykazywać korzystną wydajność produkcji i aktywność wobec złożonych substratów lignocelulozowych. Prace nad produkcją alkalicznej ksylanazy przez *Melanocarpus albomyces* i jej zastosowaniem w przemyśle pulp and paper pokazują, że źródło mikrobiologiczne jest jednym z filarów projektowania enzymu pod określone procesy ^[11].

Równie istotny jest rozwój wariantów enzymatycznych. Mutageneza, dobór szczepów i projektowanie struktury białka służą zwiększaniu odporności na zasadowe pH, temperaturę i warunki przemysłowe. Publikacje dotyczące poprawy alkalofilności ksylanazy Xyn11A-LC z *Bacillus* sp. SN5 oraz inżynierii wysoko alkalicznie stabilnych ksylanaz pokazują, że cechy użytkowe enzymu mogą być modyfikowane na poziomie struktury białka ^[2].

Dla klienta przemysłowego najważniejszy wniosek jest praktyczny: sama nazwa „ksylanaza” nie opisuje całego zachowania produktu. Znaczenie mają tolerancja na pH, odporność cieplna, selektywność substratowa, kompatybilność z masą i przewidywalność działania w konkretnym punkcie procesu. W dokumentach technicznych warto więc patrzeć na ksylanazę nie jako pojedynczy składnik, ale jako biokatalizator dopasowany do określonego zastosowania w pulp and paper processing.



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

Informacje o produkcie Enzymes.bio

Industrial Alkaline Xylanase For Pulp And Paper Processing jest produktem przeznaczonym do profesjonalnych zastosowań przemysłowych związanych z przetwarzaniem mas włóknistych i papieru. Enzymes.bio występuje w roli dostawcy, a nie producenta ani laboratorium badawczego; produkt jest oferowany online w jednostkach 1 kg, a dokumenty CoA i SDS są dostarczane wraz z zamówieniem .

W kontekście technicznym produkt należy rozpatrywać jako narzędzie do etapów, w których modyfikacja ksylanu może poprawić dalsze bielenie lub obróbkę masy. Typowe obszary zainteresowania obejmują biobielenie mas kraft, wspomaganie sekwencji ECF, wybrane masy z surowców nieдрzewnych oraz procesy, w których ograniczanie intensywności chemicznej jest celem operacyjnym. Zakres efektu zależy od konkretnej masy, warunków procesu i miejsca w sekwencji technologicznej.

Najbardziej odpowiedzialne ujęcie korzyści brzmi: ksylanaza alkaliczna może zwiększać podatność masy na bielenie poprzez selektywną hydrolizę ksylanu, co w dobrze dobranych warunkach może wspierać redukcję obciążenia chemicznego i środowiskowego. Nie jest natomiast samodzielnym zamiennikiem całej sekwencji bielącej ani gwarancją identycznego wyniku w każdej linii produkcyjnej.

Podsumowanie techniczne

Ksylanaza alkaliczna dla przemysłu celulozowo-papierniczego działa poprzez selektywną modyfikację ksylanu w hemicelulozie. Ta pozornie wąska reakcja ma duże znaczenie procesowe, ponieważ ksylan może ograniczać dostęp chemikaliów bielących do ligniny resztkowej i związków chromoforowych. Hydroliza ksylanu może więc poprawić podatność masy na bielenie, szczególnie w sekwencjach kraft i ECF, gdzie enzym pełni funkcję boostera procesu [6].

Najważniejsze korzyści to potencjalne ograniczenie intensywności wybranych etapów chemicznych, poprawa efektywności bielenia i wsparcie strategii bardziej zrównoważonej produkcji papieru. Najważniejsze ograniczenia to zależność efektu od rodzaju masy, pH, temperatury, czasu kontaktu, konsystencji i selektywności enzymu. Literatura konsekwentnie pokazuje, że ksylanaza ma największą wartość jako precyzyjnie włączony etap technologiczny, a nie jako uniwersalny dodatek do dowolnego procesu [1].

Dla zastosowań B2B właściwe pozycjonowanie produktu jest zatem techniczne: **Industrial Alkaline Xylanase For Pulp And Paper Processing** to enzym do wspomagania przetwarzania mas włóknistych przez kontrolowaną hydrolizę ksylanu, szczególnie tam, gdzie celem jest lepsza odpowiedź masy na bielenie, niższe obciążenie chemiczne lub łagodniejsza modyfikacja włókna. Enzymes.bio dostarcza produkt online w jednostkach 1 kg z dokumentacją CoA i SDS dołączaną do zamówienia .

Zamów Industrial Alkaline Xylanase For Pulp And Paper Processing online

Sprzedawany w jednostkach 1 kg, dostępny z magazynu i gotowy do wysyłki. Zamów bezpośrednio w naszym sklepie — zapłać online, a my przetworzymy Twoje zamówienie. Do każdego zamówienia dołączamy Certyfikat Analizy i Kartę Charakterystyki.

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

Bibliografia

Ponumerowano według kolejności pierwszego cytowania. Źródła open access, każde zweryfikowane jako dostępne w momencie publikacji; numery cytowań w tekście prowadzą tutaj.

1. Sharma, D., Chaudhary, R., Kaur, J., & Arya, S. (2020). Greener approach for pulp and paper industry by Xylanase and Laccase. *Biocatalysis and agricultural biotechnology*, 25, 101604.
2. 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.

3. Sridevi, A., Ramanjaneyulu, G., & Devi, P. S. (2017). Bio-bleaching of paper pulp with xylanase produced by *Trichoderma asperellum*. *3 Biotech*, 7, 1-9.
4. Sridevi, A., Narasimha, G., & Devi, P. (2019). PRODUCTION OF XYLANASE BY *PENICILLIUM SP.* AND ITS BIOBLEACHING EFFICIENCY IN PAPER AND PULP INDUSTRY.
5. Hutterer, C., Kliba, G., Punz, M., Fackler, K., & Potthast, A. (2017). Enzymatic pulp upgrade for producing high-value cellulose out of a Kraft paper pulp. *Enzyme and Microbial Technology*, 102, 67-73 .
6. 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 .
7. Dong, M., Wang, S., Xu, F., Xiao, G., & Bai, J. (2021). Efficient utilization of waste paper as an inductive feedstock for simultaneous production of cellulase and xylanase by *Trichoderma longiflorum*. *Journal of Cleaner Production*.
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. Tuncay, F. O., Cakmak, U., & Kolcuoğlu, Y. (2023). Aqueous two-phase extraction and characterization of thermotolerant alkaliphilic *Cladophora hutchinsiae* xylanase: biochemical properties and potential applications in fruit juice clarification and fish feed supplementation. *Preparative Biochemistry & Biotechnology*, 54, 553 - 563.
10. Cai, Y., Zhou, H., Zheng, N., Wang, Y., Shuan, D., Deng, Y., Lu, Z., ... et al. (2025). Rational engineering design with computer-aided surface charge modulation of highly alkali-stable xylanase for sustainable green degumming applications in the textile industry. *International Journal of Biological Macromolecules*, 144807 .
11. 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.

Skontaktuj się z Enzymes.bio

Masz pytania dotyczące zamówienia? Nasz zespół chętnie pomoże.

E-MAIL wholesale@enzymes.bio

TELEFON (USA) **+1 (507) 428-6057**

[Skontaktuj się z nami →](#)



400+ klientów B2B



60+ partnerów badawczych z uczelni



54 obsługiwanych na całym świecie

© 2026 Enzymes.bio · Dostawy enzymów przemysłowych i do przetwórstwa żywności · Nie do spożycia przez ludzi ani sprzedaży detalicznej.