

Industrial Alkaline Xylanase for Pulp and Paper Processing: 펄프·제지 표백 전처리용 알칼리성 자일라나아제

Enzymes.bio 연구팀 · 뉴질랜드 웰링턴 · June 18, 2026

Industrial Alkaline Xylanase for Pulp and Paper Processing은 크라프트 펄프, 비목재 펄프, 재생 섬유 기반 펄프의 표백 전처리에서 자일란계 헤미셀룰로오스를 선택적으로 절단해 후속 표백 약품의 접근성을 높이는 산업용 알칼리성 자일라나아제입니다. 이 효소는 리그닌을 직접 산화하는 표백제가 아니라, 섬유 표면과 섬유벽에 남아 있거나 재침착된 자일란 장벽을 완화해 ECF, TCF, 과산화수소 표백 단계의 효율을 보조하는 역할로 이해하는 것이 정확합니다 ^[1].

Enzymes.bio는 이 제품을 제조사나 시험기관이 아니라 온라인 공급업체로 제공하며, 제품은 1kg 단위로 직접 구매할 수 있습니다. 주문 시 제품 관련 CoA와 SDS가 함께 제공되며, 이 문서는 공정 원리와 적용 맥락을 설명하기 위한 기술 안내 자료입니다 .

펄프·제지 공정에서 알칼리성 자일라나아제가 쓰이는 이유

펄프 표백은 단순히 밝기를 높이는 공정이 아니라, 잔류 리그닌 제거, 섬유 손상 억제, 약품 비용 관리, 폐수 부하 저감, 규제 대응이 동시에 걸린 공정입니다. 화학 펄프, 특히 크라프트 펄프는 조리와 세정 이후에도 일부 리그닌과 리그닌-탄수화물 복합체가 섬유 내부 또는 표면에 남아 있고, 자일란은 조리 중 용출되었다가 섬유 표면에 다시 침착될 수 있습니다. 자일라나아제 전처리는 이 자일란 층을 부분적으로 절단해 표백제가 잔류 리그닌에 더 쉽게 접근하도록 하는 “bleach boosting” 개념으로 검토되어 왔습니다 ^[1].

기존 표백 공정에서 염소계 또는 이산화염소 기반 약품을 줄이려면, 같은 목표 밝기를 더 낮은 산화제 부담으로 달성할 수 있어야 합니다. 자일라나아제는 자일란을 선택적으로 가수분해하기 때문에 셀룰로오스 주쇄를 직접 공격하는 효소와는 목적이 다르며, 표백 시퀀스 앞단에서 섬유벽의 확산 저항을 낮추는 보조 단계로 배치됩니다. 펄프·제지용 미생물 자일라나아제의 적용성에 관한 리뷰는 이러한 효소 전처리가 표백 화학물질 사용량과 환경 부담을 줄이는 방향으로 연구되어 왔다고 정리합니다 ^[1].

알칼리성이라는 특성도 중요합니다. 크라프트 펄프와 여러 표백 전처리 단계는 중성보다 높은 pH, 비교적 높은 온도, 잔류 알칼리 또는 산화성 성분의 영향을 받는 공정 환경에 놓이기 쉽습니다. 따라서 펄프·제지용 자일라나아제는 단순히 자일란을 분해할 수 있는 효소가 아니라, 알칼리 조건에서 충분히 기능하고 공정 접촉 시간 동안 활성을 유지할 수 있는 효소여야 합니다. 곰팡이 유래 자일라나아제의 물리화학적 특성과 생물표백 잠재성을 검토한 연구도 크라프트 및 비목재 펄프 표백에서 pH와 온도 적합성이 실용성의 핵심이라고 설명합니다 [2].

작동 기전: 자일란 장벽을 낮춰 표백제 접근성을 높이는 방식

자일란은 왜 표백 효율을 방해하는가

자일란은 목재와 비목재 식물 섬유질의 헤미셀룰로오스 주요 구성 성분입니다. 크라프트 조리 중 일부 자일란은 용해되고, 일부는 변형되며, 일부는 다시 섬유 표면에 침착될 수 있습니다. 이때 자일란은 잔류 리그닌을 물리적으로 가리거나, 리그닌-탄수화물 복합체의 일부로 남아 표백 약품의 침투와 반응을 제한할 수 있습니다. 자일라나아제가 표백 전에 작용하면 자일란 사슬이 짧아지고 섬유벽의 미세 접근성이 증가해 후속 표백 반응이 더 효과적으로 진행될 수 있습니다 [1].

자일라나아제의 주된 반응은 β -1,4-자일란 골격의 가수분해입니다. 최근 자일란 분해 효소 연구에서는 자일라나아제가 다양한 자일란 기질에서 내부 절단 방식으로 작용해 자일로올리고당과 더 짧은 당 조각을 생성할 수 있음이 보고되어 있습니다 [3]. 펄프 공정에서는 이러한 분해가 당 생산이 아니라 섬유 표면의 헤미셀룰로오스 구조를 완화하는 데 의미가 있습니다.

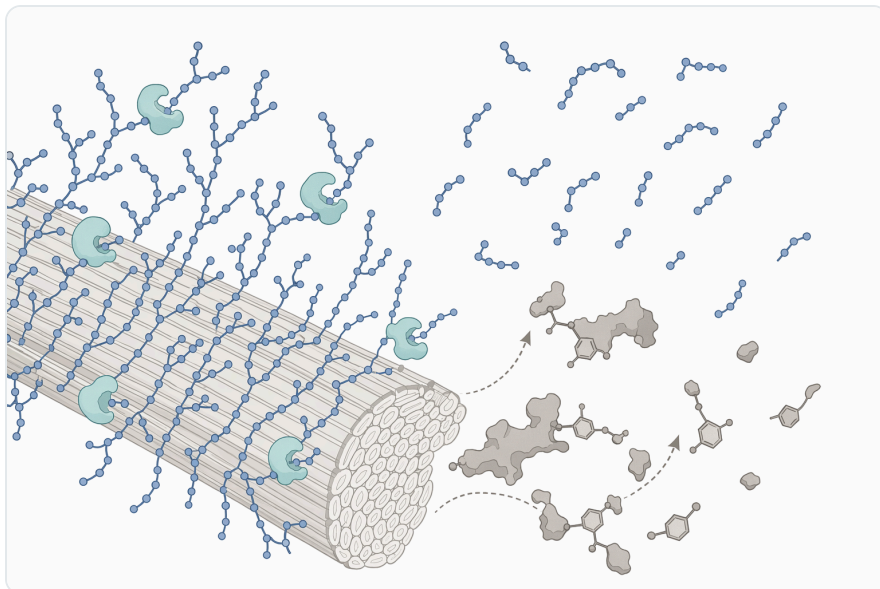


Figure 1. 알칼리성 자일라나아제는 표면에 결합된 자일란을 가수분해하여, 이후의 표백 또는 세정 화학 처리가 섬유에 결합된 리그닌과 오염물에 더 효과적으로 접근할 수 있게 합니다.

리그닌 산화 효소와의 차이

자일라나아제는 라카아제나 퍼옥시다아제처럼 리그닌을 직접 산화하는 효소가 아닙니다. 리그닌 변형 효소는 방향족 고분자인 리그닌의 산화·중합·분해 반응과 연결되지만, 자일라나아제는 탄수화물 고분자인 자일란을 절단합니다. 따라서 펄프 표백에서 자일라나아제의 기능은 “표백제를 대체한다”기보다 “표백제가 더 잘 작동하도록 섬유 구조를 조정한다”는 표현이 더 정확합니다. 리그닌 분해 효소의 종이·폐수·염료 응용을 다룬 리뷰에서도 리그닌 산화 효소군과 헤미셀룰로오스 분해 효소군은 작용 대상과 공정상 역할이 구분됩니다 [4].

이 구분은 공정 설계에서 중요합니다. 자일라나아제 전처리만으로 잔류 리그닌이 모두 제거되지는 않으며, 후속 ECF, TCF, 과산화수소 또는 기타 산화 표백 단계가 여전히 필요할 수 있습니다. 반대로 자일라나아제를 적절히 앞단에 배치하면 같은 표백 시퀀스에서 약품 접근성이 개선되어 밝기, 카파가 감소, 약품 절감, 폐수 성상 개선과 같은 결과를 기대할 수 있습니다 [5].

공정 위치: 표백 전처리와 저염소 표백 전략

크라프트 펄프의 ECF 표백 보조

가장 널리 논의되는 적용은 크라프트 펄프의 ECF 표백 전처리입니다. ECF 표백은 원소 염소를 쓰지 않는 방향으로 발전했지만, 여전히 이산화염소 등 산화 화학물질 사용과 폐수 부하가 공정 비용과 환경성에 영향을 줍니다. 유칼립투스 펄프의 ECF 및 염소 기반 표백 시퀀스에 자일라나아제 단계를 배치한 연구는 자일라나아제 단계의 위치가 표백 성능과 약품 효율에 영향을 줄 수 있음을 보여 주었습니다 [5].

자일라나아제 단계는 일반적으로 강한 산화 표백제가 투입되기 전, 펄프 세정 이후 또는 산소 탈리그닌 이후에 고려됩니다. 이유는 효소가 단백질 촉매이기 때문에 강한 산화제와 직접 접촉하면 기능이 제한될 수 있고, 반대로 너무 앞단에서 사용하면 잔류 알칼리, 용출 성분, 고형물 조건 때문에 효소가 목표 기질에 균일하게 접근하기 어려울 수 있기 때문입니다. 리뷰 문헌은 자일라나아제 전처리가 실제 표백 시퀀스 내에서 어디에 배치되는지가 성능을 좌우하는 주요 변수라고 설명합니다 [1].

TCF 및 과산화수소 표백에서의 의미

TCF 또는 저염소 표백 전략에서는 염소계 산화제 의존도를 줄이고 산소, 오존, 과산화수소 등으로 표백을 구성하는 경우가 많습니다. 이때 자일라나아제는 산화제를 대신하는 것이 아니라, 산화제가 작용해야 할 잔류 리그닌 주변의 헤미셀룰로오스 장벽을 완화해 전체 반응성을 높이는 보조 효소로 작동합니다. *Eulaliopsis binata* 펄프의 TCF 표백에서 자일라나아제 보조 처리를 다룬 연구는 비목재 펄프에서도 이러한 접근이 검토되고 있음을 보여 줍니다 [6].

과산화수소 표백에서는 자일라나아제 단독보다 펙티나아제 등 다른 효소와의 조합이 연구되는 경우도 있습니다. 포플러 화학-열기계 펄프의 약알칼리 과산화수소 표백에서 자일라나아제-펙티나아제 전처리를 평가한 최근 연구는 두 효소 조합이 표백성을 높이는 방향으로 작용할 수 있음을 보고했습니다 [7]. 이는 자일란뿐 아니라 펙틴성 물질, 추출물, 미세섬유 표면 성분이 표백제 확산과 반응성에 함께 영향을 줄 수 있음을 시사합니다.

알칼리성 자일라나아제와 다른 제지용 효소의 역할 비교

아래 표는 펄프-제지 표백 또는 섬유 개질에서 함께 언급되는 주요 효소군을 작용 대상과 공정상 의미 기준으로 비교한 것입니다. 실제 공정에서는 원료, 표백 시퀀스, 목표 밝기, 섬유 품질 요건에 따라 단독 또는 조합 적용이 검토됩니다.

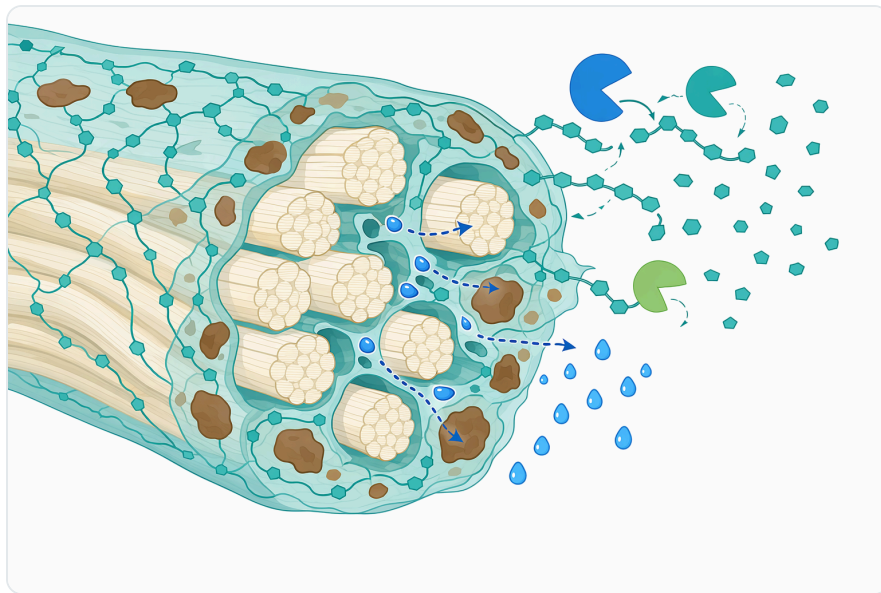


Figure 2. 섬유 수준에서 자일라나아제는 리그닌을 직접 산화하거나 셀룰로오스를 분해하는 것이 아니라 헤미셀룰로오스에 작용합니다.

효소군	주 작용 대상	펄프-제지 공정상 역할	기대되는 효과	주의할 점
알칼리성 자일라나아제	자일란계 헤미셀룰로오스	표백 전처리, ECF·TCF 보조, 자일란 장벽 완화	표백약품 접근성 개선, 화학물질 부담 완화, 생물표백 보조	리그닌을 직접 대량 산화하지 않으며, 공정 pH·온도 적합성이 중요함 [1]
라카아제 등 리그닌 변형 효소	리그닌 및 페놀성 구조	리그닌 산화, 색도·염료·폐수 관련 응용	리그닌 변형, 색도 저감, 특정 오염물 처리 가능성	매개체, 산화 조건, 기질 특이성에 따라 결과가 달라짐 [4]

효소군	주 작용 대상	펄프·제지 공정상 역할	기대되는 효과	주의할 점
펙티나아제	펙틴성 다당류	비목재·기계펄프 또는 과산화수소 표백 보조	섬유 표면 성분 완화, 과산화수소 표백성 개선 가능	자일라나아제와 조합 시 원료별 반응 차이가 큼 [7]
만난아제	만난계 헤미셀룰로오스	침엽수 등 만난 함량이 의미 있는 펄프의 보조 처리	헤미셀룰로오스 조성에 따른 접근성 개선	자일란 중심 펄프에서는 자일라나아제만큼 직접적이지 않을 수 있음 [2]
셀룰라아제	셀룰로오스	탈묵, 섬유 개질, 배수성 조절 등	재생지 처리나 섬유 표면 개질에 활용 가능	과도한 작용은 강도 손실 위험이 있어 목적이 다름 [1]

적용 가능한 펄프 유형과 공정 맥락

활엽수 크라프트 펄프

활엽수 크라프트 펄프는 자일란 함량이 상대적으로 중요하게 다뤄지는 원료군입니다. 조리와 세정 이후 자일란이 섬유 표면에 남거나 재침착되면 표백제 확산을 제한할 수 있으므로, 자일라나아제 전처리는 활엽수 펄프의 ECF 표백 보조에서 특히 자주 연구됩니다. *Paenibacillus campinasensis* 유래 자일라나아제를 이용한 활엽수 크라프트 펄프 표백 전처리 연구는 미생물 자일라나아제가 실제 펄프 기질에서 표백 보조제로 평가될 수 있음을 보여 줍니다 [8].

유클립투스 펄프 또한 자일라나아제 적용 연구가 활발한 원료입니다. ECF와 염소 기반 표백의 여러 위치에 자일라나아제 단계를 넣은 연구는 효소 단계가 기존 표백 흐름에 어떻게 통합될 수 있는지 검토했습니다 [5]. 이는 알칼리성 자일라나아제가 독립 공정이 아니라 기존 제지 공정의 특정 지점에 삽입되는 전처리 기술이라는 점을 잘 보여 줍니다.

대나무, 비목재 펄프, 농업 잔재 기반 펄프

목재 외 원료에서는 세포벽 조성, 실리카, 펙틴, 추출물, 헤미셀룰로오스 구성이 목재 펄프와 다릅니다. 대나무 펄프 표백에 *Aspergillus nidulans* 유래 자일라나아제를 적용한 연구는 자일라나아제 단계가 대나무 펄프 표백에서 지속가능한 접근으로 검토될 수 있음을 보고했습니다 [9]. 비목재 펄프에서는 원료별 성분 차이가 크므로, 자일라나아제의 효과도 자일란 함량과 섬유 구조에 따라 달라집니다.

농업·임업 부산물에서 자일로올리고당을 제조하는 연구들은 자일란계 원료가 얼마나 다양하게 존재하는지 보여 줍니다. 다만 식품·프리바이오틱스용 자일로올리고당 생산과 펄프 표백 전처리는 목표가 다릅니다. 전자는 당 조성 및 기능성 올리고당 수율이 중요하지만, 펄프 공정에서는 섬유 품질을 유지하면서 표백 접근성을 높이는 것이 핵심입니다 [10].

재생지와 폐지 펄프

재생지 펄프는 반복 사용으로 인한 섬유 단축, 충전제, 잉크 잔류물, 접착성 오염물, 표면 화학물질 등 변수가 많습니다. 이 때문에 자일라나아제의 역할은 크라프트 펄프 표백처럼 단순히 잔류 리그닌 접근성만으로 설명되지 않을 수 있습니다. 폐지를 탄수화물 원료로 다룬 연구는 폐지가 여전히 셀룰로오스와 헤미셀룰로오스 기반의 복합 기질이라는 점을 보여 주며, 효소 처리가 재생 섬유 이용과 연결될 수 있음을 시사합니다 [11].

재생 펄프에서 알칼리성 자일라나아제는 표백성 개선, 섬유 표면 개질, 배수성 또는 후속 화학처리 효율 개선과 같은 보조 목적에서 검토될 수 있습니다. 그러나 잉크 제거, 접착물 제어, 충전제 관리 등은 자일라나아제만으로 해결되는 문제가 아니므로, 탈묵 효소나 계면화학, 세정·부상 공정과 구분해 이해해야 합니다 [1].

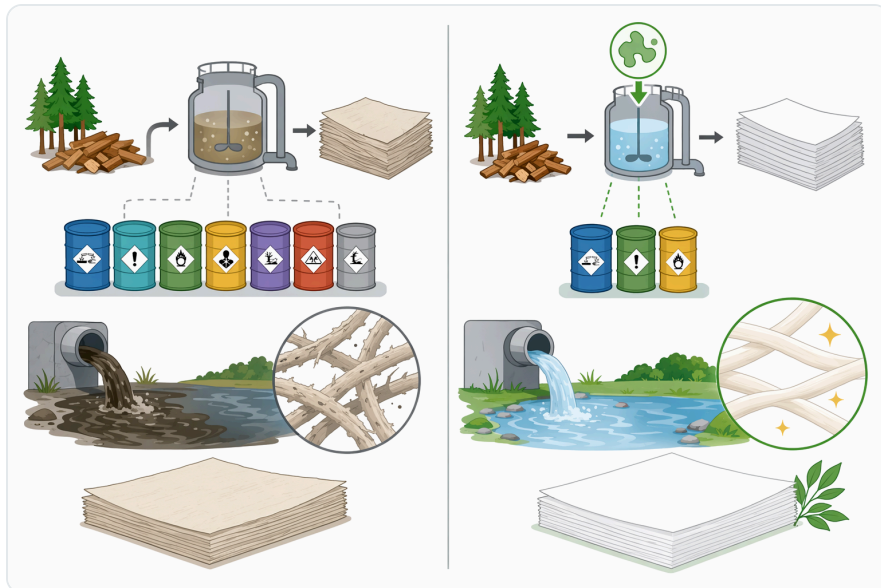


Figure 3. 산성, 중성, 알칼리성 자일라나아제는 공정 적합성이 서로 다르며, 알칼리성 자일라나아제는 많은 크라프트, 추출, 과산화물, 재생섬유 환경에 가장 잘 맞습니다.

기대 효과: 밝기, 약품 부담, 폐수 부하, 지속가능성

표백 약품 접근성 개선

자일라나아제 전처리의 가장 직접적인 효과는 표백제 접근성 개선입니다. 자일란이 부분적으로 절단되면 섬유 표면과 내부 미세공극에서 잔류 리그닌 주변의 물리적 장벽이 낮아지고, 후속 산화 표백제가 더 효과적으로 반응할 수 있습니다. 펄프 표백에서 미생물 자일라나아제 적용성을 다룬 리뷰는 이러한 접근성 개선이 화학 표백 단계의 부담을 낮추는 핵심 기전이라고 설명합니다 [1].

이 효과는 공정 조건에 따라 밝기 향상 또는 같은 밝기 달성을 위한 약품 절감 형태로 나타날 수 있습니다. *Bacillus* sp. RTS11 유래 자일라나아제의 정제·특성화 및 크라프트 펄프 표백 가능성을 다룬 연구는 자일라나아제가 크라프트 펄프 표백 분야에서 기능성 향상 효소로 평가되고 있음을 보여줍니다 [12].

염소계 부산물과 환경 부담 완화 가능성

염소계 표백 약품 사용량이 줄면 유기염소계 부산물과 흡착성 유기 할로겐(AOX) 부담을 낮출 가능성이 있습니다. 자일라나아제 자체가 폐수처리 설비를 대체하는 것은 아니지만, 표백 단계의 약품 투입과 반응 부산물 형성에 간접적으로 영향을 줄 수 있습니다. 펄프 표백용 자일라나아제 리뷰는 생물표백이 화학물질 부담과 배출수 환경성을 개선하는 방향으로 연구되어 왔다고 정리합니다 [1].

약알칼리 과산화수소 표백에서 자일라나아제-펙티나아제 전처리의 동역학적·환경적 효과를 검토한 연구도 효소 전처리가 표백 효율뿐 아니라 환경 성과와 함께 논의될 수 있음을 보여줍니다 [13]. 다만 폐수 COD, 색도, AOX, 독성 등은 원료와 표백 시퀀스, 세정 효율, 폐수처리 시스템에 따라 달라지므로 모든 공장에 동일한 결과를 가정해서는 안 됩니다.

섬유 품질 유지와 선택성

자일라나아제의 장점은 셀룰로오스 주쇄가 아니라 자일란계 헤미셀룰로오스를 주로 대상으로 한다는 점입니다. 적절한 선택성을 가진 자일라나아제는 섬유 강도 손실을 최소화하면서 표백 접근성을 개선하는 방향으로 사용될 수 있습니다. 곰팡이 자일라나아제의 생물표백 잠재성을 다룬 연구는 자일라나아제의 물리화학적 특성, 셀룰라아제 동반 여부, pH·온도 특성이 펄프 품질에 중요한 변수라고 설명합니다 [2].

반대로 셀룰라아제 활성이 과도하게 개입되면 섬유 강도에 불리하게 작용할 수 있으므로, 펄프 표백용 자일라나아제에서는 작용 선택성이 특히 중요합니다. 이 문서에서 말하는 알칼리성 자일라나아제는 표백 전처리용 효소라는 공정 목적에 초점을 맞추며, 셀룰로오스 분해를 주요 목적으로 하는 제품군과 구분해서 이해해야 합니다 [1].

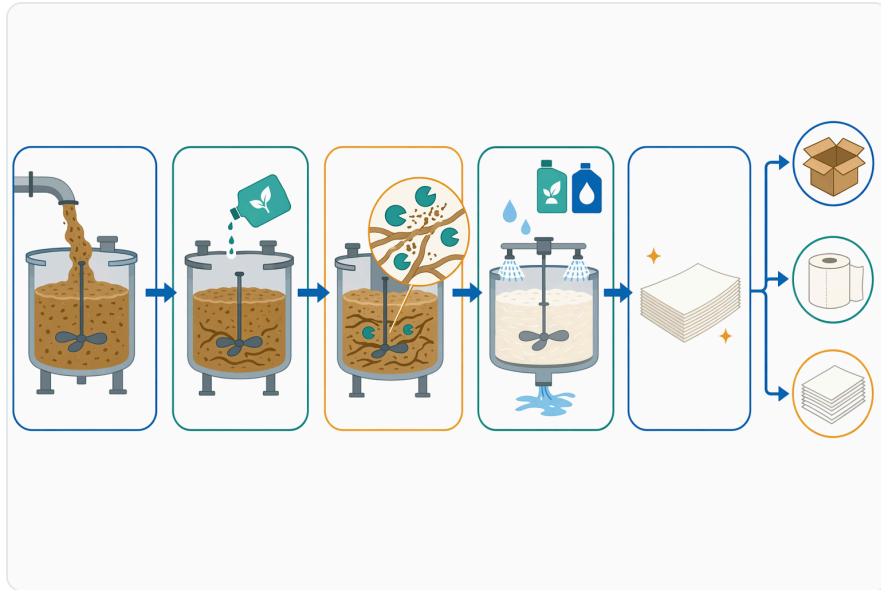


Figure 4. 크라프트 펄프 표백 강화에서 자일라나아제는 일반적으로 리그닌 접근성을 높이기 위해 주요 산화 표백 단계 전에 적용됩니다.

최근 연구 흐름: 내알칼리성, 내열성, 효소 조합

내알칼리성·내열성 자일라나아제의 중요성

펄프 공정은 실험실 완충액보다 복잡합니다. 잔류 알칼리, 추출물, 용해 리그닌, 금속 이온, 고형분 농도, 혼합 효율, 온도 변동이 효소 성능에 영향을 줍니다. 따라서 산업용 알칼리성 자일라나아제에서는 효소가 공정 pH와 온도에서 얼마나 안정적으로 작용하는지가 중요한 평가 축이 됩니다. 최근 GH11 자일라나아제의 구조 안정성 연구는 이황화 결합과 특정 구조 영역이 열 안정성과 활성을 좌우할 수 있음을 보고했습니다 [14].

메타게놈 유래 자일라나아제 연구도 새로운 효소 발굴의 방향을 보여 줍니다. 퇴비 메타게놈 라이브러리에서 확인된 자일라나아제의 이종 발현과 구조 예측 연구는 자연계의 다양한 미생물 자원이 산업 조건에 맞는 자일란 분해 효소 발굴에 활용될 수 있음을 시사합니다 [15]. 이러한 연구는 제지용 효소가 단순한 범용 가수분해효소가 아니라 공정 적합성을 중심으로 선별·개발되는 기술 영역임을 뒷받침합니다.

자일라나아제-펙티나아제 조합

기계펄프나 화학-열기계 펄프에서는 리그닌 제거뿐 아니라 섬유 표면 성분, 펙틴성 물질, 추출물, 미세섬유 결합 상태가 표백성에 영향을 줄 수 있습니다. 포플러 화학-열기계 펄프의 약알칼리 과산화 수소 표백에서 자일라나아제-펙티나아제 전처리를 적용한 연구는 두 효소가 함께 작용할 때 표백성 개선이 나타날 수 있음을 보고했습니다 [7]. 이는 알칼리성 자일라나아제가 단독 효소로도 의미가 있지만, 특정 원료에서는 다른 다당류 분해 효소와의 조합도 연구 대상이 된다는 점을 보여 줍니다.

다만 효소 조합은 항상 더 좋은 결과를 보장하지 않습니다. 각 효소의 작용 대상, 공정 pH, 온도, 체류 시간, 펄프 농도, 세정 단계가 서로 맞아야 하며, 불필요한 섬유 손상이나 용출물 증가를 피해야 합니다. 약알칼리 과산화수소 표백에서 효소 전처리의 환경 효과를 평가한 연구도 공정 조건과 결과 지표를 함께 검토해야 함을 보여 줍니다 [13].

공정 적용 시 현실적인 해석

Industrial Alkaline Xylanase for Pulp and Paper Processing은 표백 약품을 완전히 없애는 제품으로 해석하기보다, 기존 표백 시퀀스의 효율을 높이는 전처리 효소로 이해하는 것이 적절합니다. 자일라나아제 전처리는 밝기 향상, 약품 절감, 표백 단계 완화, 폐수 부하 저감 가능성과 연결되지만, 그 정도는 펄프 원료와 공정 조건에 따라 달라집니다 [1].

특히 카파가, 자일란 함량, 산소 탈리그닌 정도, 세정 효율, 표백 시퀀스 구성, 목표 밝기, 최종 종이 강도 요구가 결과에 큰 영향을 줍니다. 활엽수 크라프트, 유칼립투스, 대나무, 비목재 펄프, 재생 펄프는 모두 자일라나아제 적용 가능성이 논의되지만, 동일한 반응성을 기대하기는 어렵습니다. 대나무 펄프 생물표백 연구는 비목재 원료에서의 가능성을 보여 주지만, 원료별 검토가 필요하다는 점도 함께 시사합니다 [9].

또한 효소는 산화 표백제와 달리 단백질 촉매입니다. 강한 산화제, 극단적 pH, 과도한 고온, 불충분한 혼합, 짧은 접촉 시간은 효소 전처리의 효과를 제한할 수 있습니다. 그래서 제지용 자일라나아제 연구는 pH 안정성, 열 안정성, 기질 접근성, 효소 선택성, 기존 표백 시퀀스와의 호환성을 반복적으로 다룹니다 [2].



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

Enzymes.bio 제품으로서의 위치

Enzymes.bio의 Industrial Alkaline Xylanase for Pulp and Paper Processing은 펄프·제지 공정에서 자일란계 헤미셀룰로오스 조절을 목표로 하는 산업용 효소 제품으로 제시됩니다. Enzymes.bio는 제조사나 실험실이 아니라 온라인 공급업체이며, 제품은 1kg 단위로 온라인 직접 판매됩니다. 주문 시 CoA와 SDS가 함께 제공되어 제품 확인과 안전 취급에 필요한 문서를 받을 수 있습니다 .

이 제품 설명에서 중요한 점은 “알칼리성 자일라나아제”라는 명칭이 단순한 마케팅 표현이 아니라 펄프 공정 조건과 연결된 기능적 분류라는 것입니다. 크라프트 펄프와 표백 전처리 환경은 중성·저온 조건만을 요구하지 않기 때문에, 알칼리 조건에서 작동 가능한 자일라나아제가 제지 공정용 효소로 별도 의미를 갖습니다 [2].

결론: 표백제를 대체하는 효소가 아니라 표백 효율을 여는 효소

Industrial Alkaline Xylanase for Pulp and Paper Processing의 핵심 가치는 자일란을 선택적으로 절단해 표백 약품이 잔류 리그닌에 접근하기 쉬운 섬유 구조를 만드는 데 있습니다. 이 효소는 리그닌 산화제가 아니며, 단독 표백제가 아니라 ECF, TCF, 과산화수소 표백 등 기존 또는 저염소 표백 전략을 보조하는 전처리 효소로 이해해야 합니다 [1].

문헌상 가장 일관된 근거는 크라프트 펄프와 비목재 펄프에서 자일라나아제 전처리가 표백성을 높이고 화학물질 부담을 낮출 수 있다는 점입니다. 최근 연구는 대나무 펄프, 유칼립투스 펄프, 활엽수 크라프트 펄프, 포플러 화학-열기계 펄프 등 다양한 원료에서 자일라나아제 또는 자일라나아제 조합 전처리의 가능성을 검토하고 있습니다 [9].

따라서 이 제품은 밝기, 약품 절감, 폐수 부담, 지속가능성을 함께 고려하는 펄프·제지 공정에서 자일란 장벽을 낮추는 표백 전처리 효소로 설명할 수 있습니다. 실제 성능은 원료와 시퀀스에 따라 달라지지만, 자일라나아제 보조 표백이라는 기술적 방향은 펄프·제지 산업의 저부담 표백 전략과 잘 맞는 효소 응용 분야입니다 [5].

Industrial Alkaline Xylanase For Pulp And Paper Processing 온라인 주문

1kg 단위로 판매되며 재고 보유, 즉시 출고됩니다. 온라인 스토어에서 바로 결제하시면 주문을 처리해 드립니다. 모든 주문에는 시험성적서(CoA)와 물질안전보건자료(SDS)가 포함됩니다.

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

참고문헌

최초 인용 순서로 번호를 매겼습니다. 모든 출처는 발행 시점에 접근 가능 여부를 확인한 오픈 액세스 자료이며, 본문의 인용 번호가 이곳으로 연결됩니다.

1. Gangwar, A. K., Prakash, N., & Prakash, R. (2014). Applicability of Microbial Xylanases in Paper Pulp Bleaching: A Review. *Bioresources*, 9, 3733-3754.
2. Kmetzki, A. C. F., Henn, C., Moraes, S. S., Silva, N. F. S., & Kadowaki, M. K. (2020). Physicochemical Characteristics of Fungal Xylanases and their Potential for Biobleaching of Kraft and Non-wood Pulps. *Annual Research & Review in Biology*.
3. Salas-Veizaga, D. M., Rocabado-Villegas, L. R., Linares-Pastén, J. A., Gudmundsdottir, E., Hreggvidsson, G., Álvarez-Aliaga, M. T., Adlercreutz, P., ... et al. (2024). A novel glycoside hydrolase 43-like enzyme from Clostridium boliviensis is an endo-xylanase and a candidate for xylooligosaccharide production from different xylan substrates. *Applied and Environmental Microbiology*, 90.
4. Yadav, M., & Yadav, H. S. (2015). Applications of ligninolytic enzymes to pollutants, wastewater, dyes, soil, coal, paper and polymers. *Environmental Chemistry Letters*, 13, 309-318.
5. Gangwar, A. K., Prakash, N., & Prakash, R. (2016). An Eco-Friendly Approach: Incorporating a Xylanase Stage at Various Places in ECF and Chlorine-based Bleaching of Eucalyptus Pulp. *Bioresources*, 11, 5381-5388.
6. Gautam, A., Dutt, D., & Kumar, A. (2025). Xylanase-assisted TCF bleaching of Eulaliopsis binata pulp. *Research journal of chemistry and environment*.
7. Li, J., Tian, J., Liu, Z., Wang, H., & Hou, Q. (2025). Synergistic improvement of bleachability for poplar chemi-thermomechanical pulp in weakly-alkaline hydrogen peroxide bleaching by xylanase-pectinase pre-treatment. *International Journal of Biological Macromolecules*, 148546 .
8. Ko, C., Lin, Z., Tu, J., Tsai, C., Liu, C., Chen, H., & Wang, T. (2010). Xylanase production by Paenibacillus campinasensis BL11 and its pretreatment of hardwood kraft pulp bleaching. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 64, 13-19.
9. Khambhaty, Y., Akshaya, R., Suganya, C. R., Sreeram, K., & Rao, J. R. (2018). A logical and sustainable approach towards bamboo pulp bleaching using xylanase from Aspergillus nidulans. *International Journal of Biological Macromolecules*, 118 Pt A, 452-459 .
10. Yan, F., Tian, S., Du, K., Xue, X., Gao, P., & Chen, Z. (2022). Preparation and nutritional properties of xylooligosaccharide from agricultural and forestry byproducts: A comprehensive review. *Frontiers in Nutrition*, 9.
11. Franceschin, G., Favaron, C., & Bertucco, A. (2010). WASTE PAPER AS CARBOHYDRATE SOURCE FOR BIOFUEL PRODUCTION: AN EXPERIMENTAL INVESTIGATION. *Chemical engineering transactions*, 20, 279-284.
12. Sahnoun, S., Yahiaoui, B., Benlounissi, A., Mouffok, A., Ernst, B., Alam, M., Houali, K., ... et al. (2024). Enhancing the efficiency and functionality of xylanase from Bacillus sp. RTS11: Optimization, purification, characterization, and prospects in kraft pulp bleaching. *Cellular and Molecular Biology*, 70 1, 67-79 .

13. 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.
14. Wu, S., Zhang, N., & Wan, Q. (2025). Disulfide bonds enhance thermal stability and thumb region drives activity of the glycoside hydrolase 11 xylanase rMxylcd. *Journal of Structural Biology*, 108209 .
15. Sousa, J., Santos-Pereira, C., Gomes, J. S., Costa, Â. M. A., Santos, A. O., Franco-Duarte, R., Linhares, J. M. M., ... et al. (2024). Heterologous expression and structure prediction of a xylanase identified from a compost metagenomic library. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 108.


Enzymes.bio 문의

주문에 관해 궁금한 점이 있으신가요? 기꺼이 도와드리겠습니다.


이메일 wholesale@enzymes.bio

전화 (미국) **+1 (507) 428-6057**

[문의하기 →](#)

 **400+** B2B 고객사

 **60+** 대학 연구 파트너

 **54** 전 세계 54개국 공급

© 2026 Enzymes.bio · 산업용 및 식품 가공용 효소 공급 · 인체 섭취 또는 소매 판매용이 아님