

# 재활용 고분자로부터 제조되는 텍스타일 섬유

Textile Fibers Derived from Recycled Polymers

박예원 | Yaewon Park

Department of Clothing and Textiles, Yonsei University,  
50 Yonsei-ro, Seodaemun-gu, Seoul 03722, Korea  
E-mail: yaewon.park@yonsei.ac.kr

## 1. 서론

전 세계 섬유 소비 증가와 플라스틱 폐기물 누적에 대응하기 위해 섬유 패션 산업에서 순환 경제(circular economy) 실현이 필수적이다. 현재 생산되는 섬유의 절반 이상은 합성 고분자 기반이며, 그 중에서도 폴리에스터(polyethylene terephthalate, PET), 폴리아마이드(polyamide, PA), 폴리프로필렌(polypropylene, PP), 폴리우레탄(polyurethane, PU), 그리고 아크릴 등이 주요 섬유 소재로 사용된다.<sup>1</sup>

PET는 전 세계 섬유 생산량의 약 절반을 차지하며, 높은 인장강도와 내열성, 우수한 가공성으로 범용 의류 및 산업용 직물에 폭넓게 활용된다. PA6과 PA66은 내마모성과 복원력이 뛰어나 기능성 의류, 카펫, 산업용 로프 등에 적합하며, PP는 밀도가 낮고 수분 흡수율이 거의 없어 위생용 부직포 및 필터 제품으로의 수요가 크다. PU, 특히 스판덱스(spandex) 계열은 탄력한 신율과 복원력을 바탕으로 신축성 의류의 핵심 소재로 자리 잡았다. 반면, 아크릴은 양모(wool) 대체재로서 보온성과 염색성이 우수하나, 제조 과정에서 독성 용매 및 고에너지 반응이 요구되어 환경적 부담이 크다.<sup>2</sup>

이들 합성 고분자는 모두 생분해성이 낮고, 미세플라스틱 발생의 주요 원인으로 지목되고 있다. 또한 고분자 중합 및 방사 과정에서의 에너지 소비, 촉매 및 용매의 독성, 화석 원료 의존성은 지속가능성의 큰 한계로 지적된다. 최근 연구에 따르면, PET와 PA는 화학적 재활용을 통해 단량체(monomer) 회수 및 고순도 재중합이 가능한 대표 소재로, 순환형 섬유 산업 전환의 핵심 축으로 주목받고 있다.<sup>1</sup>

본 특집에서는 이러한 합성 고분자 중 재활용이 활발히 이루어지는 PET, PA 등을 중심으로 재활용 고분자로부터 섬유를 제조하는 공정, 환경 및 경제적 고려 사항, 그리고 기술적 한계와 향후 전망을 종합적으로 고찰하고자 한다.

## 2. 재활용 고분자를 이용한 섬유 방사 공정

전 세계 합성섬유 생산의 약 64%가 PET, PA, PP, PU 등 열가소성 고분자에 기반하며,<sup>2,3</sup> 이들 소재의 재활용은 섬유산업의 순환경제 전환을 주도하는 핵심 축으로 인식되고 있다. Textile Exchange의 Materials Market Report(2024)와 The Future of Synthetics(2024) 보고서에 따르면, 흔히 쓰이는 섬유 중에서도 특히 PET와 PA의 생산량과 온실가스 배출량(greenhouse gas, GHG, emission)이 전 세계 섬유 생산량과 그에 따른 온실가스 배출량 중 최대 비중을 차지하고 있다(그림 1). 즉 재활용 PET(rPET)와 재활용 PA(rPA)가 의류 및 섬유

Author



박예원

2008-2012 서울대학교 의류학과 (학사)  
2012-2014 서울대학교 의류학과 (석사)  
2014-2018 North Carolina State University, Ph.D. in Fiber and Polymer Science (박사)  
2019-2021 City University of New York, Advanced Science Research Center (Post-Doc.)  
2021-2025 연세대학교 의류환경학과 조교수  
2025-현재 연세대학교 의류환경학과 부교수

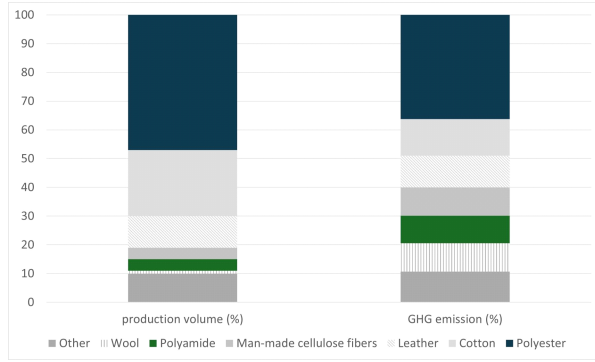


그림 1. 주요 섬유의 생산량과 온실가스 배출량 비교. (Textile Exchange (2024), *The Future of Synthetics*<sup>3</sup> 데이터 참고하여 다시 그림.)

제품에 실제 응용 가능할 정도의 기계적 물성을 가지면서 대량 생산을 하는 것이 재활용 고분자의 실제 섬유 산업 적용에 핵심적 역할을 한다.

## 2.1 재활용 PET 섬유

PET는 세계 섬유 생산량의 절반 이상을 차지하며, 가장 확립된 재활용 인프라를 가진 합성섬유이다.<sup>2-4</sup> 현재 상업적으로 활용되는 rPET는 대부분 폐기 음료병에서 유래하나, 최근에는 진정한 순환 섬유 시스템을 이루기 위해서는 의류-의류 순환 (textile-to-textile) 시스템을 적용해야 한다는 인식이 빠르게 확대되고 있다.<sup>2</sup>

현재 섬유산업에서 쓰이는 rPET의 대부분은 기계적으로 재활용된 PET로 보고된다.<sup>3</sup> 기계적 재활용 (mechanical recycling)은 세척, 분쇄된 PET 플레이크를 용융 방사 (melt-spinning)하여 스테이플 또는 필라멘트 섬유로 제조한 뒤, 연신 (drawing) 및 열처리 (annealing) 과정을 통해 결정 화도와 인장특성을 제어한다.<sup>5</sup> 다만 반복 가공 시 고분자가 물리적으로 짧아지거나 색상 변화가 발생할 수 있으므로, 사슬연장제 (chain extender)나 다른 고분자를 첨가하여 점도와 물성을 회복해야 할 수도 있다.<sup>6</sup> 기계적 재활용 공정은 오염이 적은 폐트병과 같은 단일 소재 원료에 최적화되어 있다.<sup>3</sup> 폐의류는 수집 과정에서 오염이 되기 쉽고 다른 재료와 혼방이 많이 되어 있어, 폐의류를 원료로 쓰기에는 기계적 재활용 공정에 한계가 있다.

한편, 화학적 재활용 (chemical recycling)은 PET 원료를 단량체 수준으로 분해한 후 재중합하여 virgin 등급에 가까운 고순도 rPET를 생산하는 방식이다. 고분자 해중합 원리에 따라서 글라이콜분해 (glycolysis), 메탄올분해 (methanolysis), 가수분해 (hydrolysis) 등으로 분류할 수 있으며 각 공정이 산업적으로 확대되고 있다 (그림 2).<sup>1</sup> 이 화학적으로 재활용된 rPET는 기존 virgin PET 섬유 생산 공정에 거의 그대로 적용 가능하다. 이러한 고순도 rPET는 의류뿐 아니라 산업용 텍스타일, 산업용 필터, 가구용 섬유 등으로 응용 범위가

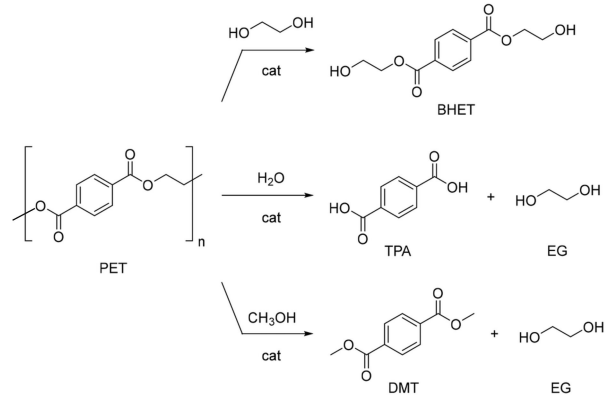


그림 2. 폴리에스터 해중합의 원리. 글라이콜분해(위), 가수분해(중간), 메탄올분해(아래)로 간단하게 표현함.<sup>1</sup>

확대되고 있다.<sup>1,2</sup>

## 2.2 재활용 PA 섬유

PA는 내마모성과 복원력이 우수한 기능성 섬유로 PA6 및 PA6,6가 주로 섬유로 많이 쓰이며 상업명으로 Nylon 6, Nylon 6,6로도 표기된다. 페어망, 카펫, 산업용 직물로부터 회수되는 rPA는 스포츠웨어, 자동차 내장재, 산업용 로프에 쓰일 수 있어 고부가 업사이클링 섬유 재료로 주목받고 있다.<sup>2,7</sup>

PA의 기계적 재활용은 분쇄된 나일론 폐사를 재용융 방사하는 방식으로 진행되며, 사슬 절단에 의한 점도 감소를 보완하기 위해 가지형성제 (branching agent)를 첨가하거나 고점도를 갖는 virgin PA 블렌딩하기도 한다.<sup>5</sup>

PA의 화학적 재활용은 PA를  $\epsilon$ -카프로락탐 ( $\epsilon$ -caprolactam, CPL)으로 분해한 뒤 재중합하여 새로운 PA를 생산하는 방식으로 이루어진다. PET의 화학적 재활용과 마찬가지로 가수분해, 글라이콜분해 등이 가능하지만 PA 사슬 간에는 분자 간 수소결합이 강해서 PA의 해중합이 PET 해중합보다 상대적으로 더 어렵다고 알려져 있다 (그림 3).<sup>1</sup> 또한 그림 1에서 볼 수 있듯이 PA 섬유 생산량이 PET 섬유 생산량보다 훨씬 적기 때문에 rPA를 만들 원재료를 찾기가 상대적으로 더

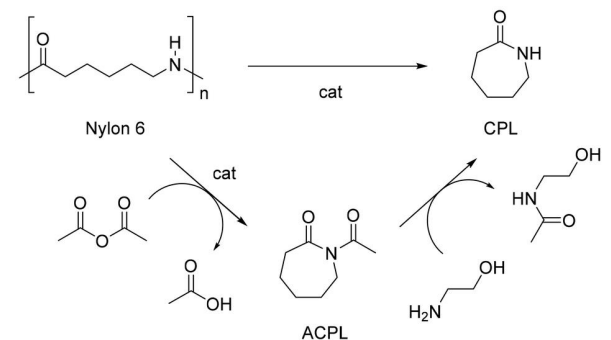


그림 3. 폴리아마이드 해중합의 원리. 일반적인 무용매 공정(위)과, 아세트산 무수물 (acetic anhydride)을 이용한 절단 (fragmentation) 반응 후 전이 아세틸화 (trans-acetylation) 과정(아래).<sup>1</sup>

어렵다는 한계도 존재한다.<sup>3</sup>

## 2.3 기타 재활용 섬유

PET와 PA 외에도 다양한 합성섬유의 재활용을 위한 노력이 시도되고 있다.

PP는 포장재 및 위생 부직포 중심으로 회수되며, 세척 및 분리 과정 후 기계적 재활용을 거쳐 재활용 PP(rPP) 펠렛 형태로 만든다.<sup>8</sup> 이후 용융 방사 공정을 통해 섬유로 형성한 뒤 콘크리트 강화제 등으로 활용된다.<sup>9,10</sup> rPP 섬유 생산량은 전체 PP 섬유 생산량에 비해 0.30%로 보고되어 상용화에 아직 무리가 있는 것으로 보인다.<sup>2</sup>

우리가 흔히 알고 있는 엘라스테인(elastane), 스판덱스(spandex), 라이크라(Lycra<sup>®</sup>) 등의 섬유는 기본적으로 PU 엘라스토머로 이루어진 섬유이다. 이들 PU 기반 섬유는 신축성이 우수하지만 복잡한 가공구조를 갖고 있고, 다른 종류의 섬유와 혼방되어 있는 경우가 많아 재활용이 어렵다.<sup>1</sup> 그럼에도 불구하고 기계적, 화학적 재활용 등 다양한 PU 재활용을 중심으로 한 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 특히 우레탄 결합을 끊는 원리에 따라서 알코올분해, 가수분해 등의 해중합 방법이 보고되고 있다.<sup>11</sup> 2023년 전세계 엘라스테인 섬유의 생산량 중 약 3% 정도가 재활용 엘라스테인 섬유일 것으로 예측된 바 있다.<sup>2</sup>

아크릴 섬유는 양모를 대체하고자 개발된 섬유로 스웨터나 인테리어용 텍스타일로도 많이 쓰인다.<sup>1</sup> 아크릴 섬유는 최근 들어 생산량이 줄어드는 추세이고, 재활용 아크릴 섬유가 전체 아크릴 생산량의 약 0.65%를 구성하고 있다.<sup>2</sup> 아크릴 섬유의 기계적 재활용이나 화학적 재활용 모두 경제적인 공정 조건을 찾기가 어렵고, 아크릴 섬유를 구성하는 주요 화학 구성 요소인 polyacrylonitrile(PAN) 이 열에 의해 탄화가 되기 때문에 재활용이 어려운 것으로 알려져 있다.<sup>1</sup>

## 3. 환경 및 경제적 고려 사항

### 3.1 재활용 고분자 섬유의 전과정평가

전과정평가(Life Cycle Assessment, LCA)는 제품이나 공정이 '원료-생산-사용-폐기'에 이르는 전 과정에서 환경 영향을 체계적으로 정량 평가하는 방법이다. 국제표준 ISO 14040 및 14044에 의해 정의된 LCA는 재료의 온실가스 배출, 에너지 및 자원 소비량, 물 사용량 등을 통합적으로 분석하여 지속가능성을 비교, 평가하는 도구로 널리 활용된다.<sup>12</sup>

최근 LCA 연구들은 재활용 고분자 섬유의 환경적 이점에 대한 구체적 데이터를 제시한다. 2024년 Li *et al.*의 연구<sup>13</sup>에 따르면 rPET로 스테이플사를 만드는 공정이 기존 virgin PET 스테이플사 공정에 비해서 지구온난화 잠재력(global warming potential, GWP)은 48%, 1차 에너지 수요(primary

energy demand, PED)는 46%, 물 사용량(water usage, WU)은 33% 낮을 것으로 보고했다. 또한 2024년 Fidan *et al.*<sup>14</sup> rPET 섬유, 일반 PET 섬유, 면 섬유를 이용한 데님 생산의 8가지 시나리오를 설정하고, 이를 LCA 와 전과정비용분석(Life Cycle Costing, LCC)을 통해 비교하였다. 그 결과, rPET 섬유는 일반 PET 및 면 섬유 대비 담수 생태독성(freshwater ecotoxicity), 부영양화(eutrophication), 산성화(acidification) 영향이 낮았으며, 면 섬유는 인간독성(human toxicity) 항목에서 상대적으로 우수하였다. 특히, cut-off 방식, 즉, rPET 섬유는 더 이상 지구의 자원을 새로이 사용하지 않는다는 가정 하에 LCA를 수행할 경우 rPET 사용이 지구 온난화 잠재력, 성층권 오존 고갈 등 대부분의 환경부문에서 개선 효과를 보였다. 경제적 측면에서, LCC 결과는 일반 PET이 면섬유 및 rPET보다 경제적 부담이 낮음을 시사했다.

전과정평가는 재활용 고분자로 만든 섬유가 실제 섬유 산업에 어떠한 환경적, 경제적 영향을 끼칠 지 구체적인 시나리오를 바탕으로 예측하기 때문에 산업체와 정부의 의사결정에 기여할 수 있다. 그러나 LCA 수행을 위해서 필요한 정보가 많아서 시간과 비용이 과다하게 요구된다는 한계가 있다.<sup>15,16</sup>

### 3.2 법·제도적 동향

정책 및 규제 환경은 재활용 고분자 섬유의 확산을 주도하는 핵심 요인이다. 유럽연합(EU)은 “지속가능하고 순환적인 섬유를 위한 전략(Strategy for Sustainable and Circular Textiles)”과 Textile Regulation(제정 예정)을 통해 섬유 제품 내 재활용 원료 함량 의무화, 공급망 투명성 강화, 생산자책임확대제도(Extended Producer Responsibility, EPR) 시행을 가속화하고 있다.<sup>17</sup>

EU 및 아시아 일부 국가에서는 이미 PET 병의 최소 재활용 함량 규정을 도입했으며, 이를 섬유 제품으로 확장하려는 움직임이 활발하다. 한국의 경우 EU의 Textile Regulation과 같이 의류·섬유 내 재활용 함량을 의무화하는 구체적 기준은 아직 부재하다. 다만 환경부는 2023년 “K-순환경제 비전 2030”을 통해 폐플라스틱의 50% 이상을 고품질 제품으로 재활용하겠다는 목표를 제시하였으며, 이 과정에서 재활용 섬유 산업 생태계 구축을 핵심 과제로 포함하였다.<sup>18</sup> 특히 수거, 선별, 재활용 인프라의 고도화, 고순도 rPET 및 rPA의 표준화와 인증체계 마련, 섬유 순환 소재 산업 클러스터 조성 등이 주요 추진 방향으로 제시되었다.

### 3.3 표준화 및 인증체계

글로벌 표준과 자발적 인증 제도는 재활용 섬유 제품의 신뢰성 확보 및 시장 수용성 강화를 위해 필수적이다.

Textile Exchange에서 개발한 Global Recycled Standard

표 1. 재활용 고분자 기반 상용 섬유 제품 요약

| 상품명 (기업명)                            | 소재                     | 제품 특징                                                                                                                   | 회사 위치 | 출처 |
|--------------------------------------|------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|----|
| REPREVE® (Unifi)                     | rPET 섬유                | 플라스틱 병 등을 원료로 rPET 섬유 형성. 추적 가능하고 인증된 재생 섬유 제공.                                                                         | 미국    | 21 |
| COOLMAX® EcoMade (The LYCRA Company) | rPET 섬유                | 텍스타일 폐기물 또는 폐기 PET병을 소재로 기능성 섬유화. 냉감·흡습성 유지.                                                                            | 미국    | 22 |
| EcoSure (Poole Company)              | rPET 섬유                | 사용 후 PET포장재를 원료로 100% 인증된 rPET 섬유를 생산. 매트리스, 부직포 등에 적용.                                                                 | 미국    | 23 |
| regen™ (효성 티앤씨)                      | rPET, rPA, 재활용 스판덱스 섬유 | 국내 대표 섬유기업 효성의 제품 브랜드로 폐어망으로부터 rPA 생산, 폐기 페트병으로부터 rPET 생산, 일반 스판덱스 원사 생산 과정에서 발생하는 부산물을 재활용해 생산한 스판덱스 등 친환경 브랜드 이미지 홍보. | 한국    | 24 |
| PolyTexx® (BlockTexx)                | rPET 섬유                | 혼방 텍스타일 폐기물에서 유래한 rPET 섬유로 의류-의류 순환(textile-to-textile) 시스템 적용.                                                         | 호주    | 25 |

(GRS), Recycled Claim Standard(RCS)는 현재 가장 널리 사용되는 재활용 섬유 인증으로, 소재 추적성(material traceability), 사회·환경적 관리, 화학물질 사용 기준 등을 포괄한다.<sup>2</sup>

국제표준화기구(ISO)는 ISO 14040 및 ISO 14044를 통해 재활용 섬유를 포함한 제품의 LCA 수행 방법을 정의하고 있으며,<sup>12</sup> 유럽표준화위원회(CEN)의 기술위원회 CEN/TC 248은 포장재에서의 재활용 함량 산정 및 표시의 조화로운 표준(harmonized standard) 제정을 추진 중이다.<sup>19</sup>

### 3.4 시장 요인 및 경제적 영향

재활용 고분자 섬유 생산의 경제성은 규제 동향, 소비자의 지속가능 제품 선호도, 신규 섬유(virgin fiber)와의 가격 경쟁력에 의해 결정된다.<sup>20</sup> 한편, EPR 제도 및 제품책임제(Product Stewardship Scheme)의 도입은 섬유 폐기물 관리 비용을 생산자에게 전가하기 때문에<sup>7</sup> 재활용 고분자 섬유 생산 비용이 더 높아질 가능성이 있다. 또한, 국제 유가 변동, 신규 고분자 원료 가격, 폐기물 교역 정책 변화 등은 여전히 재활용 산업의 경쟁력과 확장성에 영향을 미치는 불확실 요인으로 지적된다.<sup>20,3</sup> 그럼에도 불구하고 표 1에 정리한 바와 같이 시장에 재활용 고분자로 만든 섬유가 다양하게 소개되고 있으며 이러한 트렌드는 앞으로 더 확대될 것으로 보인다.

## 4. 결론

재활용 고분자 섬유는 석유 자원에 대한 의존도가 높은 기존 합성섬유 산업의 구조를 전환을 이끄는 핵심 대안으로 부상하고 있다. 특히 PET, PA 등 주요 열가소성 고분자는 이미 기계적 및 화학적 재활용 기술이 상용 단계에 도달하였으며, 최근에는 섬유-섬유 순환(fiber-to-fiber recycling), 의류-

의류 순환(textile-to-textile recycling)으로 발전하고 있다.

전과정평가 결과는 이러한 기술적 진보가 실질적인 환경 개선 효과로 이어진다는 것을 구체적으로 보여준다. 또한 공정 최적화와 효소를 이용한 해중합 등 신기술의 도입으로 자원 효율성은 계속 향상될 가능성이 있다.

정책적 측면에서도 변화가 가속화되고 있다. EU의 Textile Regulation을 비롯한 국제 규제는 재활용 함량 의무화와 원료 추적성 강화를 요구하고 있으며, 한국 역시 추후 재활용 섬유 산업 생태계 구축을 주요 과제로 추진할 것으로 예상된다. 이러한 흐름은 앞으로 섬유 산업의 지속가능성을 기술, 환경, 경제를 아우르는 통합적 관점에서 체계적인 관리의 필요성을 시사한다.

향후 연구는 혼방 섬유의 효율적 분리와 선택적 해중합 기술, 사슬연장제 및 가지형성제를 활용한 분자 구조 제어, 재활용 함량의 정량화 및 인증 표준 확립, 그리고 섬유 폐기물의 고품질 업사이클링 경로 구축에 집중되어야 한다.

이러한 기술적·제도적 발전이 병행될 때, 재활용 고분자 섬유는 단순한 대체 원료를 넘어 저탄소·고기능·고부가가치 섬유 플랫폼으로 자리매김할 것이다.

## 참고문헌

1. C. Moreno-Marrodán, F. Brandi, P. Barbaro, and F. Liguori, *Green Chem.*, **26**, 11832 (2024).
2. Textile Exchange, *Materials Market Report* (2024).
3. Textile Exchange, *The Future of Synthetics* (2024).
4. L.-B. Luo, R. Chen, Y.-X. Lian, W.-J. Wu, J.-H. Zhang, C.-X. Fu, X.-L. Sun, and L.-R. Xiao, *Polymers*, **16**, 1052 (2024).
5. B. Sadeghi, Y. Marfavi, R. AliAkbari, E. Kowsari, F. B. Ajdari, and S. Ramakrishna, *Mater. Circ. Econ.*, **3**, 4 (2021).
6. H. Naeim, F. Mahdavian, and D. Rodrigue, *J. Environ. Chem.*

- Eng.*, **13**, 119283 (2025).
7. G. Gorreta, C. Maesani, S. Alini, M. Blangetti, and C. Prandi, *Waste Manag.*, **205**, 114979 (2025).
  8. J. B. Kasper, L. A. Parker, S. Postema, E. M. Höppener, A. H. Leighton, A. M. D. Finnegan, S. B. Rutten, J. Nijman, A. Larasati, A. C. C. Soares, and M. C. P. van Eijk, *Waste Manag.*, **191**, 230 (2025).
  9. S. Yin, R. Tuladhar, R. A. Shanks, T. Collister, M. Combe, M. Jacob, M. Tian, and N. Sivakugan, *J. Appl. Polym. Sci.*, **132**, 41866 (2015).
  10. M. Małek, M. Jackowski, W. Łasica, and M. Kadela, *Materials*, **13**, 1827 (2020).
  11. G. Rossignolo, G. Malucelli, and A. Lorenzetti, *Green Chem.*, **26**, 1132 (2024).
  12. ISO, *Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework (ISO 14040 & ISO 14044)*, (2018).
  13. D. Li, S. Feng, J. Tao, S. Yu, Y. He, R. Yu, H. Xiang, C. Wang, and M. Zhu, *ACS Sustainable Chem. Eng.*, **12**, 16609 (2024).
  14. F. Ş. Fidan, E. K. Aydoğan, and N. Uzal, *Integr. Environ. Assess. Manag.*, **20**, 2347 (2024).
  15. B. Choi, S. Jeong, and Y. Park, *J. Nat. Fibers*, **22**, 2508285 (2025).
  16. T. Kim, D. Kim, and Y. Park, *J. Cleaner Prod.*, **376**, 134226 (2023).
  17. European Commission, *EU Strategy for Sustainable and Circular Textiles*, available at: [https://environment.ec.europa.eu/strategy/textiles-strategy\\_en](https://environment.ec.europa.eu/strategy/textiles-strategy_en) (accessed November 2, 2025).
  18. 환경부, *K-순환경제 비전 2030*, available at: [https://www.me.go.kr/home/web/policy\\_data/read.do?menuId=10264&seq=9085](https://www.me.go.kr/home/web/policy_data/read.do?menuId=10264&seq=9085) (accessed November 2, 2025).
  19. European Commission, *Harmonised Standards for Packaging and Packaging Waste*, available at: [https://single-market-economy.ec.europa.eu/single-market/goods/european-standards/harmonised-standards/packaging-and-packaging-waste\\_en](https://single-market-economy.ec.europa.eu/single-market/goods/european-standards/harmonised-standards/packaging-and-packaging-waste_en) (accessed November 2, 2025).
  20. A. C. Manivannan, L. Panneerselvan, R. Kandaiah, A. Ravindran, G. Nachimuthu, M. Conaty, and T. Palanisami, *Environ. Sci. Technol.*, **59**, 12745 (2025).
  21. Unifi, *REPREVE: Sustainable Fiber from Recycled Plastic Bottles*, available at: <https://unifi.com/sustainability/repreve> (accessed November 2, 2025).
  22. The LYCRA Company, *COOLMAX® EcoMade Fiber*, available at: <https://www.coolmax.com/en/business/search-technologies/coolmax-ecomade-fiber> (accessed November 2, 2025).
  23. Poole Company, *EcoSure® Recycled Polyester Fibers*, available at: [https://www.poolecompany.com/recycled\\_fibers\\_ecosure](https://www.poolecompany.com/recycled_fibers_ecosure) (accessed November 2, 2025).
  24. Hyosung TNC, *Regen® Recycled Fiber*, available at: <https://www.hyosungtn.com/kr/business/textile/regen> (accessed November 2, 2025).
  25. BlockTexx, *R-GEN™ Textile Resource Recovery Technology*, available at: <https://www.blocktexx.com/new-page> (accessed November 2, 2025).