

가자열매 추출물을 활용한 전기방사 기반 기능성 나노섬유 제조 및 항균 성능 분석

여영미 · 조석호[†]

전남대학교 의류학과

Fabricating and Evaluating the Functional Properties of Electrospun Nanofibers Containing *Terminalia chebula* Extract

Youngmi Yeo and Seok Ho Cho[†]

Dept. of Clothing & Textiles, Chonnam National University; Gwangju, Korea

Abstract: Harnessing the antioxidant and antibacterial properties of botanical extracts has the potential to improve wound care and other biomedical and healthcare needs. In this study, thermoplastic polyurethane(TPU)-based electrospun nanofibers were fabricated to incorporate the extract of *Terminalia chebula*, a fruit rich in polyphenols and tannins. The nanofibers were evaluated for their morphological, optical, antioxidant, and antibacterial properties. Scanning electron microscope (SEM) observations revealed that as the extract concentration increased, the fiber diameter slightly increased with observable localized swelling due to the extract incorporation. UV-Vis spectroscopy analysis confirmed similar absorption peaks for the extract alone, for the TPU/*T. chebula* mixture, and within the fabricated electrospun nanoweb, indicating that the active components of the extract were retained after the electrospinning process. The ABTS radical scavenging measurements for analyzing the antioxidant properties showed an increase proportional to the extract concentration, exhibiting a radical scavenging rate of $\geq 90\%$ at $\geq 1,200 \mu\text{g/mL}$. The antibacterial activity, evaluated according to KS K 0693, demonstrated more than 99.9% reduction in viable cells of *Staphylococcus aureus* ATCC 6538 and *Klebsiella pneumoniae* ATCC 4352. These findings indicate that the *T. chebula* extract-incorporated electrospun TPU nanofibers possess excellent antioxidant and antibacterial properties as well as structural stability, suggesting their strong potential as functional antibacterial materials for medical and healthcare textile applications.

Keywords: electrospinning(전기방사), *Terminalia chebula* extract(가자열매 추출물), functional nanofiber(기능성 나노섬유), antioxidant activity(항산화 활성), antibacterial property(항균 특성)

1. 서 론

최근 전 세계적으로 고령화 사회에 진입하며 위생과 건강에 대한 관심이 높아짐에 따라 항균 섬유의 수요가 급격히 증가하고 있다. 최근 보고에 따르면 항균 섬유의 글로벌 시장 규모(Antimicrobial Textiles, 2024)는 2024년 약 117억 6천만 달러로 추정되었으며, 2033년에는 191억 8천만 달러에 이를 것으로 전망된다. 이러한 가파른 성장률은 고령화 사회 진입, 병원 내 감염 관리, 스포츠 아웃도어 의류의 기능성 요구 증대 등 다양한 요인에 의해 촉진되고 있으며, 항균 섬유는 의류용 섬유, 위생용품, 헬스케어, 생활 의류 등 폭넓은 산업 분야에서 중요한 역할을 담당하고 있다.

항균 섬유 개발을 위해 다양한 공정 기술이 활용되고 있는데, 최근 주목받는 기술 중 하나가 전기방사이다. 전기방사 공정은 수십-수백 나노미터 직경의 초극세 섬유를 제조할 수 있으며, 매우 높은 비표면적과 기공률을 갖는 나노 웹(web)을 형성한다. 전기방사 공정으로 제작된 나노 웹의 독특한 구조적 특성은 나노 웹을 구성하는 고분자 매트릭스 내에 항균제를 고르게 분산·포함할 수 있고 제어된 방출을 가능하게 한다.

전기방사 섬유에 적용되는 항균제로는 은(Ag), 구리(Cu), 아연 산화물(ZnO)과 같은 무기 나노입자나 항생제 기반 물질이 가장 널리 사용되었다(Kim et al., 2024; Maliszewska et al., 2022; Quirós et al., 2015). 그러나 이러한 항균제들은 몇 가지 한계를 보이는데, 은이나 구리 나노입자의 경우 장기인체 노출 시 잠재적 독성 문제가 보고되었으며 항생제 기반 항균제는 내성균 출현 가능성을 높일 수 있다. 또한, 트리클로산(triclosan), QACs(4급 암모늄염), 폴리헥사메틸렌구아니딘(PHMB) 등의 합성 고분자 기반 항균제는 환경에 잔존하여 생태계에 부담을 줄 수 있다는 점에서 지속가능성에 대한 우려가 제기되고 있다(Afza et al., 2024; Ferdous & Nemmar, 2020; Frydrych et al., 2023; Kakakhel et al., 2021; Karypidis et al., 2023; Markert

[†]Corresponding author: Seok Ho Cho

Tel. +82-62-530-1342

E-mail: jsh818@jnu.ac.kr

©2026 The Korean Fashion and Textile Research Journal(KFTRJ). This is an open access journal. Articles are distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

et al., 2016).

이러한 배경에서, 인체 안전성과 환경 친화성을 동시에 확보할 수 있는 천연 유래 항균물질에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 대표적인 예로 키토산(chitosan)은 갑각류 껍질에서 추출되는 천연 고분자로, 항균성과 생분해성을 동시에 지녀 의료용 전기방사 나노섬유에 활발히 응용되고 있다(Bagheri et al., 2022; Tamilarasi et al., 2023; Tripathi et al., 2025). 또한, 최근 연구에서는 강황(curcumin), 녹차 추출물의 카테킨(catechin), 계피 추출물의 시나말데하이드(cinnamaldehyde) 등 다양한 천연 유래 항균 성분을 전기방사 섬유에 도입하여 *Staphylococcus aureus* 및 *Klebsiella pneumoniae*와 같은 병원성 세균에 대한 억제 효과가 보고되었다(Cesur et al., 2023; Kang & Lee 2024; Kim et al., 2023; Lv et al., 2024).

본 연구에서 활용하고자 하는 가자열매(*Terminalia chebula*)는 열대 및 아열대 지역에서 자생하는 낙엽성 교목의 열매로, 다양한 생리활성 물질을 함유한 것으로 보고되어 있다. 가자열매에 포함된 주요 생리활성 성분으로는 chebulagic acid, chebulinic acid, gallic acid, ellagic acid, corilagin 등 가수분해성 탄닌과 페놀류 화합물이 알려져 있으며(Li et al., 2024; Sultan et al., 2023), 이들은 항균·항산화·항암 활성을 지녀 식품 보충제와 기능성 소재로의 응용 가능성이 보고되었다(Jha & Sit, 2024; Jinukuti & Giri, 2013; Kang et al., 2005; Khan et al., 2022; Malekzadeh et al., 2001; Mostafa et al., 2011; Sadhupati et al., 2024; Saleem et al., 2002). 또한, 가자열매 추출물은 보통 황갈색에서 짙은 갈색 색조를 띠며, 추출 용매, pH, 금속이온 처리 조건에 따라 색상이 변화한다. 이러한 특성은 단순한 발색을 넘어 항균 기능을 부여하기 때문에, 면, 모, 가죽, 재활용 폴리에스터 등 다양한 섬유 소재의 염색에서 기능성 천연염료로의 응용도 가능한 것으로 보고되었다(Rathinamoorthy et al., 2011; Nam & Lee, 2014; Song et al., 2017; Lee et al., 2020).

본 연구에서는 기존 무기 나노입자 기반 항균제가 지니는 한계를 보완하기 위한 대안으로, 폴리페놀과 탄닌류가 풍부한 가자열매 추출물을 적용하여 항산화 및 항균 특성을 갖는 기능성 나노섬유를 제작하고 그 특성을 분석하였다. 가자열매 추출물이 적용된 전기방사 기반 나노섬유의 구조적 특성 및 형태학적 특성을 분석하고, 색차계 측정을 통해 나노섬유의 색상 변화와 색상 강도를 포함한 광학적 특성을 정량적으로 평가하였다. 또한, 가자열매 추출물 함량에 따른 항산화 및 항균 활성을 종합적으로 검토함으로써, 본 연구는 가자열매 추출물이 포함된 나

노섬유의 기능적 특성과 시각적 특성을 동시에 규명하고, 이를 바탕으로 의료 및 헬스케어 분야에서 항산화·항균 기능성 섬유로서의 활용 가능성을 탐색하는 것을 목표로 하였다.

2. 실험

2.1. 재료 및 시약

가자열매는 한국천연염색박물관(naturaldyeing.or.kr)에서 구입하였으며 추출 용매는 증류수를 사용하였다. 전기방사를 위한 thermoplastic polyurethane(TPU)는 이노벤소에서 제공받았으며, 전기방사 용액 제조에 사용한 용매는 ethyl acetate (Sigma-Aldrich)와 dimethylformamide(DMF, Samchun chemicals)를 사용하였다. 가자열매 추출물의 항산화 활성 분석을 위해 ABTS(Sigma-Aldrich)를 사용하였고 항균 실험에 사용된 *Staphylococcus aureus*(ATCC 6538)와 *Klebsiella pneumoniae*(ATCC 4352)는 한국생명공학연구원 생물자원센터(KCTC, Korean Collection for Type Cultures)에서 구입하여 사용하였다.

2.2. 가자열매 유용성분 추출

Fig. 1은 가자열매에서 유용성분의 추출을 위한 공정 flowchart를 보여준다. 가자열매의 유용성분 추출을 위해 가자열매 300g에 증류수 3L를 첨가하여 가열한 후 끓기 시작한 시점부터 30분간 1차 추출을 진행하였다. 이후 1차 추출물을 여과하여 분리한 뒤, 잔여 시료에 물 1.5L를 다시 첨가하고 동일한 조건에서 2차 추출을 진행하였다. 1차 및 2차 추출액은 혼합하여 2.5 μm 종이 필터로 여과한 후, 120±5 rpm에서 50°C 조건으로 감압 농축하였다. 최종적으로, 농축된 추출액은 -80°C에서 급속 냉동한 뒤, 동결건조기에서 -50°C 조건으로 건조하여 가자열매 유용성분을 분말 형태로 추출하였다.

2.3. 가자/TPU 나노섬유 웹의 제조

TPU(thermoplastic polyurethane, 14wt%), DMF(dimethylformamide, 70wt%), ethyl acetate(16wt%)를 기술훈 무게 비율로 혼합하여 전기방사를 위한 TPU 전구체 용액을 제작하였다. 이후, 분말 형태의 가자열매 추출물을 준비된 TPU 전구체 용액과 혼합하여 가자/TPU 전기방사 방사 용액을 제조하였다. 가자열매 추출물 첨가 유무에 따른 항산화 및 항균 활성 차이를 확인하기 위해 가자열매 추출물이 혼합되지 않은 기본 TPU 전구체 용액을 S1로 명명하여 대조군으로 활용하였다. 이후, 첨가되는 가자열매 추출물의 농도에 따른 효과를 확인하기 위해 TPU 전구체 용액에 가자열매 추출 분말을 25, 30, 35, 40 mg/mL로 첨가하여 방사 용액을 제조하였으며, 이를 각각 S2, S3, S4, S5로 명명하였다. 모든 방사 용액은 균질화를 위해 1시간 동안 교반한 후, 0.45 μm syringe filter로 여과하여 불순물을 제거하였다.

전기방사는 여과된 방사 용액을 10 mL 주사기에 주입한 후 전기방사 장비(NanoSpinner, inovenso NSPLUS)에 연결하여 수행하였다. 본 연구에서 사용한 구체적인 전기방사 공정 파라

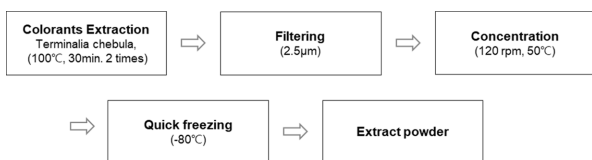


Fig. 1. Process flow chart for extracting the active component from Terminalia chebula.

미터는 유속 0.6 mL/h, 인가 전압 25 kV, 팁-컬렉터 간 거리 10 cm로 설정하였으며, 모든 방사 공정은 실온(25±2°C), 상대 습도 40-50%의 일정한 환경에서 진행하였다.

전기방사 기반의 고분자 나노섬유 웹은 섬유의 직경과 두께가 매우 얇아 의복에 사용되는 일반적인 직물과 비교했을 때 기계적 물성이 떨어지며, 이는 나노섬유 웹을 기능성 의복으로 활용하고자 할 때 큰 걸림돌이 될 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해, 본 연구에서는 전기방사 장비에서 기능성 나노섬유를 방사할 때 원통 형태의 드럼 컬렉터에 실제 의복에 사용되는 면직물을 부착하여 나노섬유가 면직물 표면 위로 바로 수집될 수 있도록 공정을 설계하고 진행하였다. 방사된 나노섬유는 면직물 표면에 결합되며, 해당 공정을 통해 제작된 나노섬유 시료는 기관의 역할을 하는 면직물의 기계적 물성을 갖게 되어 기존 나노섬유 웹이 갖는 단점(직물 대비 낮은 기계적 물성)을 효과적으로 해결할 수 있다.

면직물에 방사된 나노섬유 웹은 24시간 동안 상온에서 건조하여 잔류 용매를 완전히 제거하였으며, 최종적으로 제작된 나노섬유 시료들은 방사 용액과 동일한 방법으로 첨가된 가자열매 추출물의 농도에 따라 S1-S5로 구분하였고, 이후 수행된 다양한 분석에 활용하였다.

2.4. 나노섬유의 형태 및 구조 분석

전기방사 공정을 통해 제작된 가자/TPU 나노섬유 웹의 미세 구조는 전남대학교 에너지융복합 전문핵심 연구지원센터의 주사전자현미경(SEM, SU5000/Hitachi, NFEC-2021-03- 268978)을 이용하여 분석하였다. 약 10 × 10 mm 크기로 재단된 나노섬유 웹 시료를 탄소 테이프와 은 페이스트를 사용하여 알루미늄 홀더에 고정하였고, 전도성 확보를 위해 백금(platinum)을 약 5 nm 두께로 코팅하였다. 주사전자현미경 관찰 조건은 가속 전압 15kV, 작동 거리 6.8mm로 설정하였으며, 각 시료에 대해서 다른 영역에서 ×10,000배(스케일 바: 5µm) 및 ×30,000배(스케일 바: 1 µm) 이미지를 획득하였다.

2.5 나노섬유의 색특성

가자 추출물 함량에 따른 전기방사 나노섬유 웹의 색상 변화를 정량적으로 평가하기 위해 색차계(X-rite)를 이용하여 CIELAB 색 좌표(L*, a*, b*)를 측정하였다. 측정 조건은 D65 광원과 10° 표준 관찰자를 적용하였다. 색 좌표 측정을 위한 나노 섬유 시료는 측정 전 동일한 조건에서 충분히 건조해 주었고, 각 시료는 서로 다른 위치에서 3회 이상 반복 측정 후 평균값을 구하였다. 또한, 색 강도(color strength)를 정량화하기 위해 측정된 반사율(R)을 기반으로 Kubelka-Munk 식을 적용하여 K/S 값을 계산하였다.

$$K/S = \frac{(1-R)^2}{2R} \quad (1)$$

K/S: the color strength calculated based on the Kubelka-

Munk theory

R: the reflectance of the sample at the measured wavelength.

2.6 자외선/가시광선(UV/Vis) 흡수 분광분석

방사 용액에 첨가된 가자열매 추출물의 활성 성분이 전기방사 공정 도중 손상되지 않고 나노섬유 내부에 균일하게 분산되어 있는지 확인하기 위하여 UV/Vis 흡수 분광분석을 수행하였다. 가자열매 추출물, 가자열매 추출물이 첨가된 방사용액, 전기방사 기반 나노섬유 웹 시료를 각각 DMF에 균일하게 용해시킨 후, UV/Vis 분광광도계(Ossila)를 이용하여 320-850 nm 파장 범위에서 흡광도를 측정하였고 가자열매 추출물 고유의 흡광 스펙트럼이 유지되는지를 확인하였다.

2.7. 항산화 활성 분석을 위한 ABTS Radical 소거 측정

가자열매 추출물의 항산화 활성 정도를 분석하기 위해 ABTS 라디칼 소거 측정을 수행하였다. ABTS 양이온 라디칼(ABTS⁺)은 청록색으로 이에 따른 고유한 흡광 특성을 보인다. 이때, 측정 시료에 항산화 활성이 존재하면 시료에 의해 ABTS 라디칼이 제거되면서 청록색에서 무색의 ABTS 상태로 환원된다. 이러한 원리를 통해, ABTS 양이온 라디칼(ABTS⁺)의 흡광도가 가자열매 추출물에 의해 감소되는 정도를 측정하여 항산화 활성 정도를 분석하였다.

7 mM ABTS 용액과 100 mM potassium persulfate 용액을 동일 부피로 혼합한 후, 암실 환경에서 24시간 반응시켜 ABTS 라디칼 용액을 생성하였다. 이후, 생성된 라디칼 용액은 734 nm 파장에서 흡광도(absorbance)가 1.0±0.02가 되도록 증류수로 희석하였다. 가자열매 추출물 시료는 DMF에 0.2-2 mg/mL의 다양한 농도로 녹여 제작하였으며, 전기방사로 제조된 나노섬유 시료는 10 mg/mL의 조건으로 DMF에 녹여 제작하였다. 희석된 ABTS 라디칼 용액 1 mL에 준비된 각각의 시료 용액을 20 µL를 첨가하여 30분간 암실에서 반응시킨 후, UV-Vis 분광광도계를 이용하여 734 nm 파장에서의 흡광도의 변화를 6 회 반복 측정하였다.

항산화 활성은 아래 식에 따라 계산하였으며, vitamin C (ascorbic acid, 1 mg/mL)를 대조군으로 사용하였다.

$$\text{Scavenging activity(\%)} = \left[1 - \frac{A_s}{A_c}\right] \times 100 \quad (2)$$

A_s: the absorbance measured after the addition of the sample

A_c: the absorbance of the control solution

2.8 항균활성 분석

나노섬유 웹의 항균성은 황색포도상구균(*Staphylococcus aureus* ATCC 6538)과 폐렴균(*Klebsiella pneumoniae* ATCC 4352)을 공시균으로 선정하여 KS K 0693에 준하여 평가하였다. 선정된 공시균을 뉴트리언트 한천 평판 배지에 접종하고

37°C 환경에서 48시간 동안 배양을 진행한 후에 뉴트리언트 배지 20 mL에 접종하여 37°C 환경에서 24시간 동안 진동 배양을 진행하였다. 흡광도 측정을 통해 배양된 공시균의 생균 농도를 $(1 \pm 0.3) \times 10^5$ CFU/mL로 조절한 후, 시험포 및 대조시험포 각 0.4 g에 0.2 mL을 균일하게 접종하여 37°C에서 18시간 동안 배양하였다. 최종적으로, 각 검체로부터 균액을 추출하고 생리 식염수로 1, 10, 100, 1,000, 10,000배로 희석한 후 각 1 mL을 채취하여 뉴트리언트 한천배지에 균일하게 분산하여 37°C에서 48시간 동안 배양한 후 생균수를 산출하였다. 평균 감소율은 다음 식을 통해 계산하였다.

$$\text{Reductionrate(\%)} = \frac{M_b - M_c}{M_b} \times 100 \quad (3)$$

M_b : number of bacteria recovered from the electrospun nanofiber without *Terminalia chebula* extract(S1)

M_c : number of bacteria recovered from the electrospun nanofiber containing *Terminalia chebula* extract(S4)

3. 결과 및 고찰

3.1. 가자/TPU 나노섬유 웹의 물리적 구조 분석

가자열매 추출물이 첨가된 나노섬유 웹의 형태 및 구조 분석을 위해 첨가된 가자열매 추출물의 농도에 따른 나노섬유 시료들을 제작하고 SEM 측정을 진행하였다. Fig. 2는 가자열매 추출물의 첨가량에 따른 TPU 나노섬유 웹의 SEM 이미지를 보여준다. 가자열매 추출물이 포함되지 않은 S1 시료는 약 150-200 nm의 직경과 매끄러운 표면을 가진 나노섬유가 형성되었으며 별다른 팽윤 구조는 관찰되지 않았다. 반면, 가자열매 추출물이 첨가된 S2-S5 시료에서는 첨가되는 가자열매 추출물의 농도가 증가함에 따라 나노섬유의 직경이 조금 증가하며, 나노섬유 내부에 가자열매 추출물이 삽입되며 발생하는 팽윤 구조가 더 많이 형성되는 경향이 관찰되었다. 나노섬유의 직경이 증가하는 경향은 첨가되는 가자열매 추출물의 농도가 높아짐에

따라 방사 용액의 점도가 증가하고 응집력이 높아지기 때문으로 판단되며, 이는 방사용액의 점도 증가와 함께 나노섬유의 직경이 함께 증가하는 경향을 보고한 Kim and Lee(2016)의 연구 결과와도 일치한다. 또한, 방사용액에 첨가되는 가자열매 추출물의 농도가 높아질수록 나노섬유 내부로 삽입되는 추출물의 양도 증가하기 때문에, 나노섬유 표면의 팽윤 구조가 더 많이 나타나며 국소적인 섬유 간 유착 및 연결 구조가 형성되었다. 측정된 SEM 이미지의 분석 결과, 가자열매 추출물이 첨가된 시료 중 35 mg/mL의 농도로 추출물이 포함된 S4 시료에서 균일한 직경 분포와 연속적인 네트워크 구조를 만족하였으며, 나노섬유 간 유착이 발견되지 않아 전체적으로 안정적인 형태와 구조를 보여주었다. 반면, 40 mg/mL의 농도로 추출물이 포함된 S5 시료에서는 과도한 추출물 함량으로 인해 나노섬유의 직경이 굵고 불균일하게 형성되었으며, 팽윤 구조와 섬유 간 유착이 다수 관찰되어 나노섬유 웹의 구조 안정성 저하가 확인되었다. 따라서 형태 및 구조의 안정성과 포함되는 추출물에 의한 기능성 부여의 균형을 고려할 때, S4 시료가 유착 없는 연속적인 네트워크, 나노섬유의 균일한 직경 분포, 높은 추출물 첨가 농도를 동시에 만족하였기에 이후 수행되는 항균(KS K 0693) 평가의 대표 시료로 선정하였다.

3.2 가자/TPU 나노섬유 웹의 색특성

가자열매 추출물 함유량에 따른 가자/TPU 나노섬유 웹의 색상 특성을 정량적으로 분석하기 위해 CIELAB 색 좌표의 L^* , a^* , b^* 값과 Kubelka-Munk 이론에 기반한 K/S 값을 측정하였다. S1 시료를 표준으로 하여 측정된 색 좌표 및 K/S 값은 Table 1에 정리하였으며, 각 시료의 색상 변화는 Fig. 3에 나타내었다. 가자열매 추출물 함량이 증가함에 따라, 전기방사 나노섬유 웹의 색상은 백색에서 황색도가 증가하는 점진적인 변화를 보였다. 명도를 나타내는 L^* 값은 S2 시료의 88.00에서 S5 시료의 77.29로 감소하여, 가자열매 추출물 함량이 증가할수록 나노섬유 웹이 점차 어두워지는 경향을 나타냈다. 이러한 L^* 값의 감소는 가자열매 유래 폴리페놀성 색소 성분이 TPU

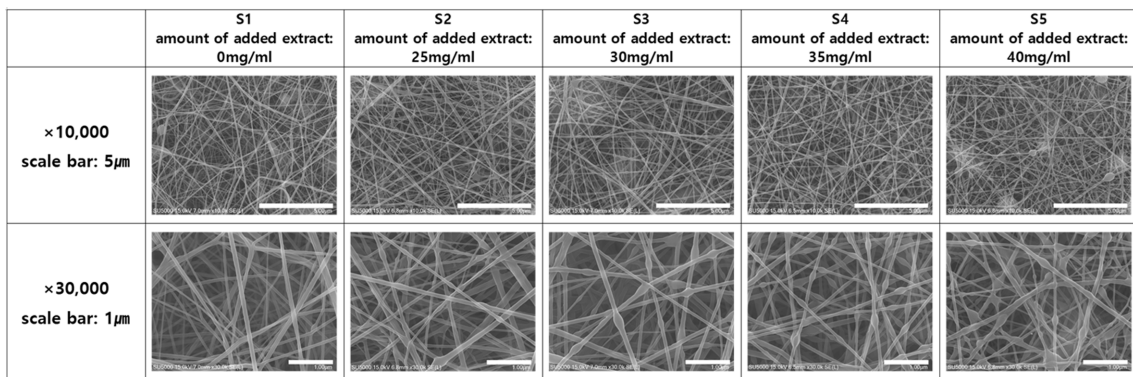


Fig. 2. SEM images of electrospun TPU/*Terminalia chebula* nanowebs prepared with different extract concentrations (S1: pristine TPU; S2-S5: 25, 30, 35 and 40 mg/mL, respectively).

Table 1. Color characteristics(L*, a*, b*) and K/S values of TPU nanofibrous webs containing different amounts of *Terminalia chebula* extract

| Sample | L* | a* | b* | K/S |
|--------|-------|-------|-------|------|
| S2 | 88.0 | -1.89 | 10.26 | 0.40 |
| S3 | 86.16 | -1.65 | 11.24 | 0.63 |
| S4 | 80.93 | -1.49 | 12.77 | 1.04 |
| S5 | 77.29 | 0.27 | 14.61 | 1.36 |

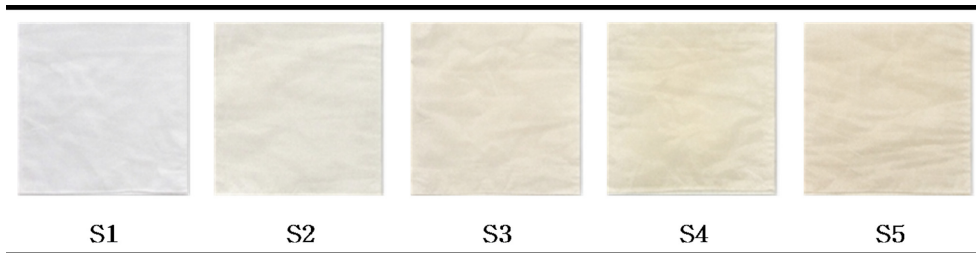


Fig. 3. Photographs of electrospun TPU webs containing different contents of *Terminalia chebula* extract (S1-S5).

나노섬유 매트릭스 내부로 삽입되면서 가시광선 흡수가 증가한 결과로 해석될 수 있다. a* 값은 S2 시료의 -1.89에서 S5 시료의 0.27로 증가하긴 했지만, 전반적으로 0에 가까운 값을 나타내어 가자열매 추출물 첨가가 적-녹 축(red-green axis)에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 확인되었다. 반면, b* 값은 10.26(S2)에서 14.61(S5)로 뚜렷한 증가 경향을 보였으며, 이는 가자열매 추출물 고유의 황색 계열 색조가 나노섬유 웹에 반영되었음을 의미한다. 가자/TPU 나노섬유 웹 색상의 농도와 강도를 정량적으로 평가하기 위해 K/S값을 분석한 결과, 가자열매 추출물 함량이 증가함에 따라 K/S 값은 0.40(S2)에서 1.36(S5)로 증가하는 경향을 보였다. 본 결과는 가자열매 추출물의 첨가가 나노섬유 웹의 K/S 값을 효과적으로 증가시켰음을 의미한다. 이는 가자 유래 색소 성분이 단순히 표면에 부착된 것이 아니라, 전기방사 과정 중 고분자 매트릭스 내에 안정적으로 내포되었음을 시사한다.

결과적으로 L*, a*, b* 및 K/S 값의 변화는 전기방사 공정 중 가자 추출물의 첨가가 나노섬유 웹의 색상을 농도 의존적으로 조절할 수 있음을 보여준다.

3.3 가자/TPU 나노섬유 웹의 흡광 특성 분석(UV-Vis spectrometer)

가자열매 추출물에 포함된 유용성분은 특정한 파장대역을 흡수하는 광학적 특성을 갖기 때문에 가자열매 추출물이 포함된 나노섬유의 흡수 스펙트럼과 가자열매 추출물의 흡수 스펙트럼을 측정하여 비교해 보면 나노섬유 내부에 삽입되어 있는 가자열매 추출물의 존재 여부를 확인할 수 있다. Fig. 4는 가자열매 추출물, 가자열매 추출물과 TPU가 혼합된 방사용액, 전기방사된 나노섬유의 흡수 스펙트럼을 보여준다. 자외선/가시광선(UV/Vis) 흡수 분광분석 결과, 가자열매 추출물과 추출물이 포함된 방사용액, 이를 이용하여 제조한 나노섬유에서 동일 파장의 흡광 피크가 확인되었다. 이러한 측정 결과는 나노섬유 내

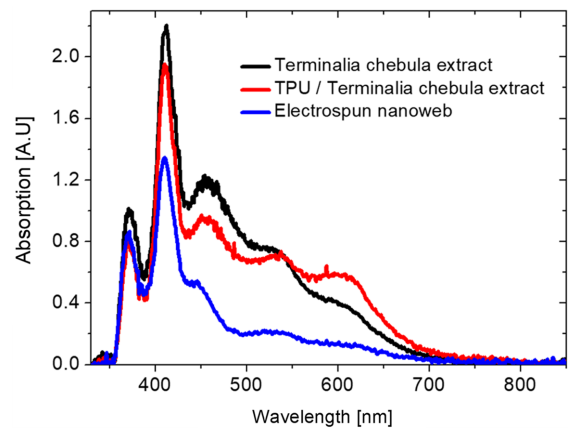


Fig. 4. Absorption spectra of *Terminalia chebula* extract, TPU/*Terminalia chebula* extract and electrospun nanoweb.

부에 삽입된 가자열매 추출물의 주요 활성 성분들이 전기방사 과정에서 손실되지 않고 화학적으로 안정하게 보존되고 있음을 의미한다. 한편, 흡광 강도는 가자 추출물, TPU/가자 혼합 방사용액, 전기방사 나노웹 순으로 감소하였는데 이는 포함된 가자열매 추출물의 농도 차이가 주원인이며, 부가적으로는 전기방사 공정 도중 나노섬유 내부로 포획된 추출물의 색소 성분 일부가 TPU 고분자 사슬과 상호작용하여 추출물 색소 성분의 광학적 활성이 감소한 결과로 해석된다(Kang & Lee, 2024; Mahmud et al., 2020; Woo & Lee, 2021).

3.4 가자/TPU 나노섬유 웹의 항산화 활성 분석

가자열매 추출물이 갖는 항산화 특성을 분석하기 위해 가자열매 추출물의 첨가 농도에 따른 ABTS 라디칼 소거 측정 결과를 그래프로 정리하여 Fig. 5에 나타내었다. 이때, vitamin C(ascorbic acid)를 비교군으로 사용하였는데, vitamin C는 과일 및 채소에 존재하는 대표적인 항산화 지표 물질로 생체 내

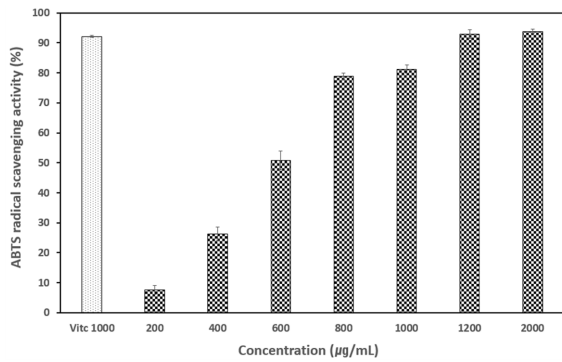


Fig. 5. ABTS radical scavenging activity of Terminalia chebula extract.

활성산소를 억제하는 강한 항산화 특성을 보여주기 때문에, 비교군으로 사용하면 가자열매 추출물의 항산화 정도를 확인할 수 있다. Fig. 5를 보면, 첨가된 가자열매 추출물의 농도가 증가함에 따라 항산화 활성 정도가 뚜렷하게 증가하였으며, 200 µg/mL 조건에서 약 8%, 600 µg/mL 조건에서 약 50%, 그리고 1200 µg/mL 이상의 조건에서 90% 이상의 라디칼 소거 기능을 보여 농도 의존적인 항산화 활성을 나타내었다. 이는 가자열매에 함유된 폴리페놀(chebulagic acid, gallic acid 등)과 탄닌류가 라디칼 전자를 안정화시켜 ABTS⁺의 환원-탈색 반응을 촉진한 결과로 판단된다. 또한, 동일 조건에서 측정한 vitamin C(1,000 µg/mL)의 라디칼 소거능은 약 92%로 측정되었으며, 1200 µg/mL 이상의 농도에서 가자열매 추출물이 비교군인 vitamin C와 비슷한 수준의 높은 항산화 활성을 보이는 것을 확인할 수 있었다.

이어서 전기방사 공정으로 제작된 나노섬유 시료(S 1-5)의 항산화 활성 분석을 진행하였고 측정 결과를 Fig. 6에 그래프로 정리하였다. 가자열매 추출물이 포함되지 않은 S1(대조군) 시료는 약 6% 수준의 매우 낮은 라디칼 소거가 관찰되었지만, 가자열매 추출물이 첨가된 S2-S5 시료에서는 모두 95% 이상의 매우 높은 라디칼 소거능을 보여주었다. 이 결과를 통해서 나노섬유에 항산화 활성을 부여하기 위해선 가자열매 추출물의 첨가가 필수요소이며 첨가되는 가자열매 추출물의 농도는 일정

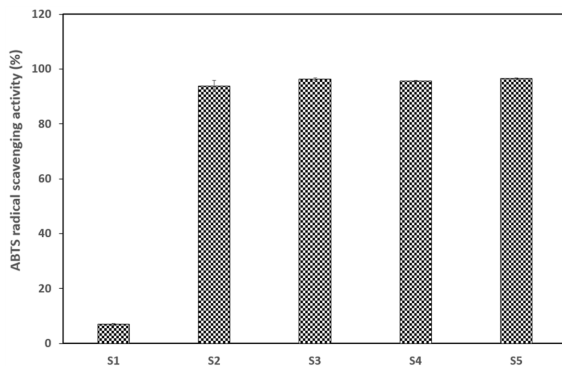


Fig. 6. ABTS radical scavenging activity of TPU/Terminalia chebula nanowebs.

수준 이상(≥ 25 mg/mL)만 만족해도 높은 항산화 활성을 나타냄을 확인하였다. 이는 가자열매에 포함된 폴리페놀 화합물이 전기방사 공정을 통해 TPU 고분자 매트릭스 내에 안정적으로 삽입되어 라디칼을 포획하는 항산화 활성을 유지하고 있음을 의미한다. 본 연구의 측정 결과와 유사하게 천연 폴리페놀을 첨가한 폴리우레탄 및 PLA 나노섬유에서도 전기방사 후 항산화 활성이 유지되는 경향이 보고된 바 있다(Kang & Lee, 2024; Liu et al., 2018). 따라서, 본 연구에서 제조한 가자/TPU 나노섬유는 전기방사 공정 후에도 우수한 항산화 활성을 만족함으로써 헬스케어용을 위한 항산화 기능성 섬유 소재로의 적용 가능성을 보여준다.

3.5. 가자/TPU 나노섬유 웹의 항균성 분석

가자열매 추출물이 포함된 기능성 나노섬유의 항균 활성을 분석하기 위하여 KS K 0693:2011 흡수법에 따라 항균성을 평가하였다. 항균 특성 확인을 위한 공시균으로 *S. aureus*와 *K. pneumoniae*를 사용하였다. 항산화 활성 분석과 동일하게 가자열매 추출물이 포함되지 않은 S1 시료를 대조군으로 설정하고 SEM을 통한 구조 분석과 항산화 활성 분석에서 모두 뛰어난 특성을 보여준 S4 시료를 대표 시료로 선정하여 항균 활성 정도와 가자열매 추출물 유무에 따른 항균 특성을 분석하였다. 분석 결과, 가자 열매 추출물이 포함되지 않은 S1 나노섬유 시료의 경우 항균 활성이 발견되지 않았지만 가자열매 추출물이 포함된 S4 시료는 두 공시균 모두에서 99.9% 이상의 항균 활성을 나타내었다(Table 2). 이러한 항균 효과는 가자열매에 함유된 chebulagic acid, chebulinic acid, gallic acid, corilagin 등의 가수분해성 탄닌과 페놀성 화합물에 기인하는 것으로 보이며, 이들 성분은 세균의 세포벽 단백질과 상호작용하여 세포막 투과성을 변화시키거나, 효소 활성 억제 등을 통해 세포 대사를 저해하는 것으로 판단된다. 이러한 결과는 Nam and Lee(2014)의 선행 연구 결과와도 일치하는데, 해당 연구에서는 가자열매 추출물로 표면 염색된 울과 실크 섬유가 *S. aureus* 및 *K. pneumoniae*에 대해 99% 이상의 항균 효과를 보였다고 보고하였다.

본 연구에서 제작한 전기방사 기반 나노섬유 구조는 미세한 직경과 매우 높은 비표면적, 다공성 구조를 지니고 있으며, 가자열매 추출물이 나노섬유 내부에 균일하게 분산되어 있어 기존 표면 염색과 비교해 안정성과 지속성이 높다는 장점을 갖는다. 본 연구에서 제작한 가자/TPU 나노섬유는 나노섬유가 갖는 독특한 구조적 특성을 통해 천연 항균 성분의 지속적 방출과 안정적인 항균 성능 유지가 가능하며 이를 통해서 다양한 분야에 폭넓게 적용될 수 있는 잠재력이 있다고 보여진다.

Table 2. Antibacterial activity of electrospun nanoweb (S4)

| Sample | Antibacterial activity | |
|----------------|------------------------------|------------------------------|
| | Bacteria reduction rate(%) | |
| | <i>Staphylococcus aureus</i> | <i>Klebsiella pneumoniae</i> |
| TPU/T. chebula | 99.9 | 99.9 |

4. 결 론

본 연구에서는 폴리페놀 및 탄닌류가 풍부한 가지열매 추출물을 전기방사 공정에 적용하여 TPU 기반 나노섬유를 제조하였고, 제조된 나노섬유의 미세구조와 형태, 광학적 특성 및 항산화·항균 활성을 종합적으로 평가하였다. SEM 분석 결과, 전기방사된 가지/TPU 나노섬유는 균일한 섬유 직경과 매끄러운 표면을 형성하였으며, 가지열매 추출물의 첨가량이 증가함에 따라 나노섬유 내부에 삽입된 추출물에 의한 표면 팽윤 구조와 나노섬유의 직경 변화가 관찰되었다. 나노섬유의 색 특성을 정량적으로 분석한 결과, 가지열매 추출물 함량 증가에 따라 나노섬유 웹의 색상은 점진적으로 변화하였으며, 이는 색차계 측정을 통해 확인되었다. 가지 추출물 농도가 증가할수록 L* 값은 감소하고 b* 값은 증가하여 가지열매 고유의 황색 계열 색조가 반영되었으며, K/S 값 또한 증가하여 색 강도가 강화되었음을 확인하였다. 이러한 결과는 가지열매 추출물이 전기방사 공정 중 나노섬유 매트릭스 내에 안정적으로 내포되어, 기능성 첨가제이자 자연 유래 색소로서 활용 가능성을 시사한다. UV-Vis 분광분석에서는 가지열매 추출물과 추출물이 포함된 방사 용액, 추출물이 포함된 나노섬유의 흡광도를 측정하여 비교하였고, 동일 파장 대역에서의 흡광 피크를 확인하여 가지열매 추출물이 전기방사 공정 후에도 손상되지 않고 나노섬유 내부에 균일하게 존재함을 검증할 수 있었다. 항산화 활성 정도를 평가하기 위해 ABTS 라디칼 소거능 분석을 진행한 결과, 가지 추출물 농도 증가에 따라 항산화 활성이 농도 의존적으로 향상되었으며, 가지 추출물이 첨가된 경우 전기방사 공정 후에도 높은 라디칼 소거능이 유지되었다. 이를 통하여, 가지열매 추출물이 첨가된 나노섬유의 경우 나노섬유 내부에 분산되어 있는 가지열매의 유용성분으로 인해 높은 항산화 활성을 만족하는 것을 확인하였다. 마지막으로, 가지열매 추출물이 포함된 나노섬유의 항균성 평가를 KS K 0693 흡수법을 적용하여 실시하였다. 구조적 안정성과 높은 항산화 활성을 동시에 보여준 나노섬유 시료(S4)를 대표 시료로 선정하여 항균성 평가를 수행한 결과, *S. aureus*와 *K. pneumoniae*에 대해 99.9% 이상의 항균 활성을 보였다. 이는 가지열매에 함유된 탄닌 및 페놀성 화합물이 세균의 세포벽 구조에 영향을 미쳐 세포막 투과성 변화 및 효소 활성 저해를 유도한 결과로 판단된다.

이상의 분석 결과를 바탕으로, 본 연구에서 제작한 가지열매 추출물이 포함된 TPU 나노섬유는 구조적으로 안정할 뿐만 아니라 색상 변화가 정량적으로 제어 가능하고 항산화 및 항균 활성이 우수하여 의료 및 헬스케어 분야에서 기능성 항산화·항균 섬유로서의 높은 활용 가능성을 지니고 있음을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 논문은 정부(과학기술정보통신부, 교육부, 광주광역시)의

재원으로 한국연구재단, 한국기초과학지원연구원 국가연구시설 장비진흥센터, 광주RISE센터, 전남대학교 학술연구비의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2025-16070835, No. RS-2025-02413029, 2025-RISE-05-011, No. 2025-1031-01).

References

- Afza, G., Afzal, Z., Bibi, A., Farid, M., Hanif, M. A., Jinadasa, B. K. K., Sumrra, S. H., & Zubair, M. (2024). Synthetic vs. natural antimicrobial agents for safer textiles: A comparative review. *RCS Advances*, 14, 30688. doi:10.1039/d4ra04519j
- Antimicrobial Textiles. (2024). Global antimicrobial textiles market size and forecast (2024-2033). *Antimicrobial Textiles*. Retrieved September 21, 2025. from <https://www.imarcgroup.com/antimicrobial-textiles-market?utm>
- Bagheri, M., Validi, M., Gholipour, A., Makvandi, P., & Sharifi, E. (2022). Chitosan nanofiber biocomposites for potential wound healing applications: Antioxidant activity with synergic antibacterial effect. *Bioengineering & Translational Medicine*, 7(1). doi:10.1002/btm2.10254
- Cesur, S., Ilhan, E., Tut, T. A., Kaya, E., Dalbayrak, B., Bosgelmez-Tinaz, G., Arisan, E. D., Gunduz, O., & Kijenska-Gawronska, E. (2023). Design of cinnamaldehyde- and gentamicin-loaded double-layer corneal nanofiber patches with antibiofilm and antimicrobial effects. *ACS Omega*, 8(31), 28109-28121. doi:10.1021/acsomega.3c00914
- Ferdous, Z., & Nemmar, A. (2020). Health impact of silver nanoparticles: A review of the biodistribution and toxicity following various routes of exposure. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(7), 2375. doi:10.3390/ijms21072375
- Frydrych, A., Jurowski, K., Milan, J., & Noga, M. (2023). Toxicological aspects, safety assessment, and green synthesis of silver nanoparticles: A review. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(6), 5133. doi:10.3390/ijms24065133
- Jha, A. K., & Sit, N. (2024). Encapsulation of bioactive compounds extracted from haritaki pulp (*Terminalia chebula* Retzius): Characterization of physical, thermal, and morphological properties. *Sustainable Food Technology*, 2(2), 362-372. doi:10.1039/D3FB00131H
- Jinukuti, M. G., & Giri, A. (2013). Antimicrobial activity of aqueous extract of *Terminalia chebula* Retz. *Recent Research in Science and Technology*, 5(4), 46-49.
- Kakakhel, M. A., Kunz, A., Everaert, G., Ruddick, K., & Denayer, J. F. (2021). Long-term exposure to high-concentration silver nanoparticles: Aquatic toxicity and environmental fate. *Environmental Sciences Europe*, 33, 14. doi:10.1186/s12302-021-00453-7
- Kang, D. Y., & Lee, J. S. (2024). Preparation and characterization of polyurethane nanofibers containing *Dendropanax moribiferus* extracts. *Journal of the Korean Society of Clothing and Textiles*, 48(4), 673-687. doi:10.5850/JKSC2024.48.4.673
- Kang, H. M., Moon, J. S., Jang, G. C., Kim, J. M., Song, M. D., & Yang, S. Y. (2005). Antibacterial effects of *Terminalia chebula* extract against major pathogens and methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA) from bovine mastitis milk. *Korean Journal of Veterinary Research*, 45(1), 113-119.

- Karypidis, M., Karanikas, E., Papadaki, A., & Andriotis, E. G. (2023). A mini-review of synthetic organic and nanoparticle antimicrobial agents for coatings in textile applications. *Coatings*, 13(4), 693. doi:10.3390/coatings13040693
- Khan, I., Ullah, Z., Shad, A. A., Fahim, M., & Ozturk, M. (2022). In vitro antioxidant, anticholinesterase inhibitory, and antimicrobial activity studies of Terminalia chebula (Retz) and Terminalia arjuna (Roxb). *South African Journal of Botany*, 146, 395-400. doi:10.1016/j.sajb.2021.11.016
- Kim, J. H., & Lee, J. S. (2016). Fabrication of electrospun juniperus chinensis extracts loaded PVA nanofibers. *Science of Emotion and Sensibility*, 19(2), 35-42. doi:10.14695/KJSOS.2016.19.2.35
- Kim, J. H., Kim, Y. J., Choi, Y. S., Lee, H. W., Kim, J. Y., Han, S. L., & Cho, J. H. (2023). Zea mays cob extract-containing polyurethane nanofiber webs. *Polymers Korea*, 47(5), 634-642. doi:10.7317/pk.2023.47.5.634
- Kim, J. R., Choi, J. S., & Hwang, J. H. (2024). Evaluation of PLA/ZnO electrospun nanofiber antibacterial efficiency against Staphylococcus aureus bacteria. *The Korean Society of Mechanical Engineers*, 48(2), 73-84. doi:10.3795/KSME-B.2024.48.2.073
- Lee, J. H., Jung, J. S., & Kim, S. H. (2020). Dyeing and antibacterial properties of chemically recycled PET thermal-bonded nonwovens dyed with Terminalia chebula dye. *Polymers*, 12(8), 1675. doi:10.3390/polym12081675
- Li, C., Li, X., Wang, C., Wang, X., Wang, X., Wang, Y., Zhang, H., & Zhang, M. (2024). Comprehensive review on fruit of Terminalia chebula: Traditional uses, phytochemistry, pharmacology, toxicity, and pharmacokinetics. *Molecules*, 29, 5547. doi:10.3390/molecules29235547
- Liu, Y., Liang, X., Wang, S., W Qin, W., & Zhang, Q. (2018). Electrospun antimicrobial polylactic acid/tea polyphenol nanofibers for food-packaging applications. *Polymers*, 10(5), 561. doi:10.3390/polym10050561
- Lv, H., Xu, H., Xu, E., Jin, Z., Zhao, H., Yuan, C., Zhao, M., Wu, Z., He, D., & Cui, B. (2024). Improving structural and functional properties of starch-catechin-based green nanofiber mats for active food packaging by electrospinning and crosslinking techniques. *International Journal of Biological Macromolecules*, 267, 131460. doi:10.1016/j.ijbiomac.2024.131460
- Mahmud, M. M., Zaman, S., Perveen, A., Jahan, R., Islam, F., & Arafat, T. (2020). Controlled release of curcumin from electrospun fiber mats with antibacterial activity. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 55, 101386. doi:10.1016/j.jddst.2019.101386
- Malekzadeh, F., Ehsanifar, H., Shahamat, M., Levin, M., & Colwell, R. (2001). Antibacterial activity of black myrobalan (Terminalia chebula Retz) against helicobacter pylori. *International Journal of Antimicrobial Agents*, 18(1), 85-88. doi:10.1016/S0924-8579(01)00352-1
- Maliszewska, I., & Czapka, T. (2022). Electrospun polymer nanofibers with antimicrobial activity. *Polymers*, 14(9), 1661. doi:10.3390/polym14091661
- Markert, A., Baumann, R., Gerhards, B., Gube, M., Kossack, V., Kraus, T., & Brand, P. (2016). Single and combined exposure to zinc- and copper-containing welding fumes lead to asymptomatic systemic inflammation. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 58(2), 127-132. doi: 10.1097/JOM.0000000000000652
- Mostafa, M. G., Rahman, M., & Karim, M. (2011). Antimicrobial activity of Terminalia chebula. *International Journal of Medicinal and Aromatic Plants*, 1(2), 175-179.
- Nam, K. Y., & Lee, J. S. (2014). Dyeing property and antimicrobial activity of protein fiber using Terminalia chebula Retzius extract. *Fashion & Textile Research Journal*, 16(3), 476-484. doi:10.5805/SFTI.2014.16.3.476
- Quirós, J., Borges, J. P., Boltes, K., Rodea-Palmares, I., & Rosal, R. (2015). Antimicrobial electrospun silver-, copper-, and zinc-doped polyvinylpyrrolidone nanofibers. *Journal of Hazardous Materials*, 299, 298-305. doi:10.1016/j.jhazmat.2015.06.028
- Rathinamoorthy, R., Udayakumar, S., & Thilagavathi, G. (2011). Antimicrobial efficacy of Terminalia chebula fruit extract-treated cotton fabric for healthcare applications. *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Nanotechnology*, 4(4), 1549-1556. doi:10.37285/ijpsn.2011.4.4.5
- Sadhupati, D. P., Lakshmisudha, R., Chakravarthy, K. N. K., & Naidana, P. S. (2024). A standardized combination of Terminalia chebula and Withania somnifera extracts enhances immune function in adults: a pilot randomized, double-blind, placebo-controlled clinical study. *Food & Nutrition Research*, 68, 29219. doi:10.29219/fnr.v68.10297
- Saleem, A., Husheem, M., Härkönen, P., & Pihlaja, K. (2002). Inhibition of cancer cell growth by crude extract and phenolics of Terminalia chebula fruit. *Journal of Ethnopharmacology*, 81(3), 327-336. doi:10.1016/S0378-8741(02)00099-5
- Song, J. E., Kim, S. M., & Kim, H. R. (2017). Improvement of dye affinity in natural dyeing using Terminalia chebula retzius (T. chebula) applied to leather. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 29(5), 610-626. doi:10.1108/IJCS-2017-0029
- Sultan, M. T., Anwar, M. J., Imran, M., Khalil, I., Saeed, F., Neelum, S., Alsagaby, S. A., Abdulmonem, W. A., Abdelgawad, M. A., Hussain, M., El-Ghorab, A., Umar, M., & Jbawl, E. A. (2023). Phytochemical profile and pro-healthy properties of Terminalia chebula: A comprehensive review. *International Journal of Food Properties*, 26(1), 526-551. doi:10.1080/10942912.2023.2166951
- Tamilarasi, G. P., Sabarees, G., Manikandan, K., Gouthaman, S., Alagarsamy, V., & Solomon, V. R. (2023). Advances in electrospun chitosan nanofiber biomaterials for biomedical applications. *Materials Advances*, 4(15), 3114-3139. doi:10.1039/D3MA00010A
- Tripathi, D., Rajinikanth, P. S., & Pandey, P. (2025). Electrospun chitosan nanofibers for regenerative wound healing: From molecular design to functional scaffolds. *Journal of Materials Chemistry B*, 13(35), 10743-10779. doi:10.1039/D5TB01405K
- Woo, H. W., & Lee, J. S. (2021). Characterization of electrospun Aronia melanocarpa fruit extract-loaded polyurethane nanoweb. *Fashion and Textiles*, 8, 12, doi:10.1186/s40691-021-00250-z

(Received December 1, 2025; 1st Revised December 15, 2025; 2nd Revised December 19, 2025; Accepted January 15, 2026)