

전기방사 기반 콜드체인 모니터링 라벨



김영조

- 1997-1999. 한양대학교 공과대학원 섬유고분자공학과 석사
- 1999-2006. (주)효성 중앙기술원 생산기술연구소 책임연구원
- 2006-2010. (주)코오롱인더스트리 중앙기술원 산자연구소 수석연구원
- 2011-2019. (주)코오롱인더스트리 산업자재본부 산업자재 사업팀장
- 2020-2023. (주)가드넥 기술연구소 소장
- 2023-현재. (주)뉴처 기술연구소 소장

1. 개요

신선식품 및 의약품의 품질과 안전성을 유지하기 위한 저온 유통 시스템인 콜드체인의 중요성이 전 세계적으로 증대되고 있다. 글로벌 신선물류 시장은 식생활 수준의 전반적인 향상, 식의약품 물류 품질 향상, 부패한 음식물 폐기 감소, 그리고 물류 에너지 절감에 대한 요구 등으로 인해 급성장하고 있다. 특히 선진국의 경우 신선식품 시장이 전체 식품 시장의 80%에 달하는 등 그 성장 잠재력이 매우 높게 평가된다[1].

그러나 기존의 식품 신선도 관리 방식은 여러 한계를 내포하고 있다. 보관 단계에서는 부적절한 저장 시설과 기술 부족, 온도 관리 실패, 습도 문제 등으로 많은 식품이 변질되거나 손상되며 가공 및 유통 단계에서도 품질 기준 미달, 유통기한 초과, 물리적 파손 등으로 손실이 발생한다. 특히, 콜드체인 시스템 구축에 필요한 거대한 인프라(냉장설비, 다수 차량 등)의 부족은 물류 관리의 큰 어려움으로 지적된다.

이러한 기존 방식의 한계를 극복하기 위해 스마트 패키징 및 스마트 라벨 기술이 중요한 대안으로 부상하고 있다. 스마트 패키징은 단순히 제품을 담은 용기를 넘어, 식품의 상태를 모니터링하고, 환경 변화에 반응하며, 소비자에게 정보를 제공하는 지능형 포장 시스템을 의미한다. 이는 식품의 안전성을 높이고 불필요한 식품 폐기를 줄이는 데 기여하며 스마트 라벨은 포장된 내용물의 신선도와 품질 정보를 측정하고 표시하여 소비자에게 제품의 안전성과 신뢰성에 대한 정보를 제공하는 역할을 한다. 특정 물질의 농도 변화를 즉각적인 색상 변화나 염료 확산 등 가시적인 변화로 알려주며, QR코드나 e-라벨 등을 활용하여 필수 사항 외 이력 관리 등 추가 정보를 제공하고, 음성 및 동영상을 통해 시각/청각 장애인을 위한 정보 제공까지 가능하게 한다.

콜드체인 관리의 문제점은 단순히 식품 변질에 국한되지 않고, 물류 비효율성, 소비자 정보 불균형, 그리고 음식물 쓰레기라는 환경 문제까지 복합적으로 얽혀 있어, 스마트 라벨은 이러한 문제들을 개별적으로 해결하는 것을 넘어, 실시간 모니터링, 정보 투명성, 폐기물 감소 등 여러 측면에서 총체적인 해결책을 제시한다. 이는 스마트 라벨이 단순한 기술 도입을 넘어, 콜드체인 생태계 전반의 패러다임을 변화시키는 핵심적인 역할을 수행할 수 있음을 시사하며 스마트 라벨의 가치는 단일 기능에 있는 것이 아니라, 콜드체인 시스템의 총체적 효율성과 지속가능성을 향상시키는 데 있다. 이로 인해 기술 개발은 개별 센서 성능 향상 뿐만 아니라, 시스템 통합 및 정보 전달의 용이성에 중점을 두어야 한다[3].

이러한 스마트 라벨의 핵심 기능인 '감지'와 '정보 제공'을 극대화하는 데 전기방사(electrospinning) 기술이 결

정적인 역할을 한다. 전기방사 공법은 고전압을 이용하여 폴리머 용액이나 용융물에 정전기력을 가하여 섬유를 형성하는 기본적인 원리에 기반하는데, 액체 방울에 가해지는 전기적인 인력과 반발력의 균형이 표면 장력을 넘어서는 순간, 액체는 미세한 제트 형태로 방출되어 전기장 내에서 가속화되어 집전체로 향하게 된다. 이 과정에서 용매가 증발하거나 용융물이 냉각되면서 최종적으로 나노미터 크기의 섬유가 형성되는 원리이다. 넓은 범위의 원재료 사용 가능성, 간단한 공정, 작은 섬유 직경, 높은 다공성 등의 장점을 가지고 있어 스마트 패키징 분야, 특히 콜드체인 모니터링 라벨 개발에 유망한 기술로 부상하고 있다. 전기방사 기술의 고유한 특성인 높은 표면적, 높은 다공성, 작은 섬유 직경은 센서의 민감도와 반응 속도를 비약적으로 향상시켜 기존 기술로는 어려웠던 미량의 변화 감지나 빠른 반응을 가능하게 하여, 스마트 라벨이 '지능형'이라는 본연의 가치를 실현하는 데 결정적인 기여를 한다. 결과적으로 전기방사 기술은 스마트 라벨의 기능적 성능을 근본적으로 향상시키는 핵심적인 기술적 기반이 되며 전기방사 기반 라벨이 미래 콜드체인 모니터링 시장에서 경쟁 우위를 확보할 수 있는 중요한 이유이다[4,6,7].

2. 전기방사 기술의 원리 및 특성

2.1. 전기방사 공정의 정의 및 기본 원리

전기방사는 전기장의 힘을 이용하여 액체 상태의 고분자 용액이나 용융물을 마이크로미터에서 나노미터 직경을 갖는 연속적인 섬유 형태로 제조하는 기술로서, 비교적 간단하고 효율적이며, 생성된 나노섬유는 넓은 표면적과 높은 다공성을 특징으로 하여 다양한 분야에서 그 중요성이 점차 증대되고 있다. 특히, 섬유 직경을 나노미터 수준으로 정밀하게 제어하고 높은 비표면적을 확보할 수 있다는 점은 전기방사 공법이 다양한 첨단 응용 분야에서 핵심적인 역할을 수행하는 이유이다.

전기방사는 나노기술 및 재료 과학 분야의 발전에 중추적인 역할을 담당하고 있으며, 이 기술을 통해 기존 재료의 성능을 혁신적으로 향상시키거나, 이전에는 불가능했던 새로운 특성을 가진 재료를 설계 및 제조할 수 있다. 그 결과, 청정 에너지, 헬스케어, 환경 여과 시스템 등 광범위한 산업 분야에서 전기방사 기술의 응용이 활발하게 연구되고 있으며, 실질적인 제품 개발로 이어지고 있다.

전기방사 장치는 크게 세 가지 주요 구성 요소로 이루어져 있다. 첫째는 폴리머 용액 또는 용융물에 필요한 고전압을 공급하는 고전압 전원 장치, 둘째는 폴리머 용액 또는 용융물을 담고 있으며, 이를 미세한 제트 형태로 방출하는 방사 노즐이 포함

된 저장소 노즐, 방사된 섬유를 수집하여 나노섬유 웹을 형성하는 집전부로 구성되어 있다. 고전압 전원 장치는 노즐과 집전부 사이에 강한 전기장을 형성하며, 이 전기장이 폴리머 용액 또는 용융물의 방사를 유도하는 핵심적인 역할을 수행한다[4,5,8].



Figure 1. 전기방사 사진(좌), 모식도(우).

2.2. 테일러 콘 및 제트 형성 메커니즘

방사 노즐의 끝부분에 매달린 폴리머 용액 방울에 고전압이 가해지면, 용액 내부의 정전기적 반발력이 표면 장력을 점차적으로 능가하여 액체 방울의 끝이 뾰족한 원뿔 형태, 즉 테일러 콘(Taylor cone)으로 변형된다. 인가되는 전압이 특정 임계값을 초과하는 순간, 테일러 콘의 끝에서 매우 가느다란 액체 제트가 방출되어 집전체를 향해 빠른 속도로 이동하며 이때 용매의 증발이나 용융물의 냉각 과정을 거치면서 점차적으로 고형화되어 최종적인 나노섬유를 형성하게 된다[9].

형성된 나노섬유의 직경, 형태, 그리고 최종적인 배열은 다양한 요인에 의해 복합적으로 영향을 받는데, 이러한 요인에는 폴리머 용액 자체의 특성, 예를 들어 점도, 농도, 전도도, 표면 장력 등이 포함되며 공정 조건인 인가 전압의 크기, 폴리머 용액의 유속, 노즐과 집전체 사이의 거리 등도 중요한 역할을 한다. 또한, 주변 환경 조건인 온도와 습도 역시 나노섬유의 최종 형태에 영향을 미칠 수 있어, 원하는 특성을 가진 나노섬유를 얻기 위해서는 이러한 다양한 영향 요인들을 정밀하게 조절하고 최적화하는 것이 필수적이다.

3. 전기방사 기반 콜드체인 모니터링 라벨

전기방사 기술은 콜드체인 모니터링 라벨 분야에서 다양한 형태로 적용되어 식품의 신선도 및 안전성 관리에 기여하고 있다.

3.1. 신선도 지시계 (Freshness Indicators, FFI)

신선도 지시계는 식품의 변질 과정에서 발생하는 특정 화학 물질을 감지하여 식품의 신선도를 실시간으로 모니터링하는 역할을 하며 주요 감지 대상으로는 육류나 생선 부패 시 발생하

는 아민류(amines), 과일 발효 과정에서 생성되는 에탄올, 미생물 활동으로 증가하는 이산화탄소, 그리고 계란이나 육류의 신선도 지표 가스로 활용되는 황화수소(H₂S)나 생선 냄새를 유발하는 트리메틸아민(TMA) 등이 있다. 대부분의 신선도 지시계는 색 변화를 통해 결과를 표시하며, 예를 들어 녹색은 신선한 상태, 노란색은 주의 필요, 빨간색은 섭취 부적합 상태를 나타낼 수 있다.

전기방사 나노섬유는 이러한 신선도 지시계에 적용될 때 여러 이점을 제공하는데 나노섬유의 높은 비표면적과 다공성 덕분에 지시 물질과의 상호작용을 극대화하여 센서의 감도를 높이고 반응 시간을 단축시킨다. 특히 육류나 생선과 같은 단백질 식품이 부패하면 휘발성 아민(트리메틸아민, 디메틸아민, 암모니아)이 축적되어 포장 내부의 pH가 증가하는데, 전기방사 시안토시아닌(anthocyanin)과 같은 pH 민감성 염료를 첨가하여 나노 섬유를 제조하면 이러한 pH 변화를 색상 변화로 시각화할 수 있다. 예를 들어, 적양배추 안토시아닌(RCA)을 폴리카프로락톤(PCL) 나노섬유에 적용한 사례는 암모니아 농도에 따라 핑크에서 파랑으로의 가시적인 색 변화를 보여주었으며, 고등어 포장에 적용 시 부패 시점에 핑크에서 보라색으로 변하는 것을 육안으로 확인할 수 있다[10,11].

더 나아가, 신선도 지시계는 단순히 상태를 알리는 것을 넘어 식품의 신선도 유지 자체에도 기여할 수 있는데, 예를 들면 PLA/Ag-NP/VitaminE 나노섬유는 대장균(escherichia coli), 리스테리아 모노사이토게네스(listeria monocytogenes), 살모넬라 티피뮤리움(salmonella typhimurium)의 성장을 100% 억제하는 항균 활성과 94%의 항산화 활성을 보이며, 키토산 나노 섬유 또한 항균 작용을 통해 식품 부패를 지연시키는 데 큰 도움이 된다[12].

3.2. 시간-온도 지시계(Time-Temperature Indicators, TTI)

시간-온도 지시계(TTI)는 제품이 노출된 누적 시간과 온도를 나타내기 위해 색상이 변하는 라벨인데, 이는 제조업체에서 소비자에게 이르는 전 과정에서 제품의 무결성을 유지하는데 도움을 준다. TTI는 효소형, 고분자형, 미생물형 등으로 분류되며 온도의존성이 중요하여 적용 대상 식품의 온도의존성과 TTI의 색 변화 종료 시점이 일치하도록 맞춤형으로 제작되어야 한다.

최근 연구에서는 라카아제(laccase)를 전기방사 섬유에 고정화하여 LTTI 필름을 형성하고, 이를 구아이아콜(guaiacol) 용액과 반응시켜 발색하는 라카아제 시간-온도 지시계 라벨(laccase time-temperature indicator label, LTTIL)이 개발되었다. 이 라벨은 라카아제 고정화 필름(component B)과 구아이아콜 및

NaN₃(sodium azide)를 포함하는 기질 용액(component A)으로 구성되며, 라벨을 활성화하려면 component A의 용액을 반응창으로 짜내 component B의 라카아제 필름과 반응시키면 된다. 라카아제에 의해 촉진되는 산화 속도는 주변 온도 변동에 따라 달라지며, 이는 라벨의 발색으로 이어지며 발색은 투명에서 연한 갈색, 호박색, 그리고 최종적으로 적갈색으로 변한다. 여기에서 NaN₃는 라카아제의 산화 억제제로 농도가 높을수록 반응 속도 상수가 낮아지고 활성화 에너지가 더 많이 필요하여 발색 속도를 조절하고, TTI 색 변화가 식품 품질 저하를 더 정확하게 반영하도록 돕는다.

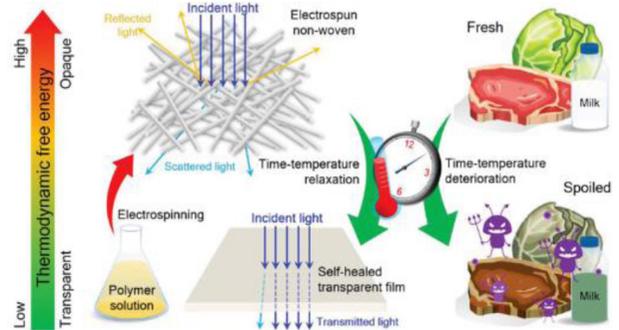


Figure 2. 나노오피 시간-온도 지시계 라벨 제작 및 사용 예시.

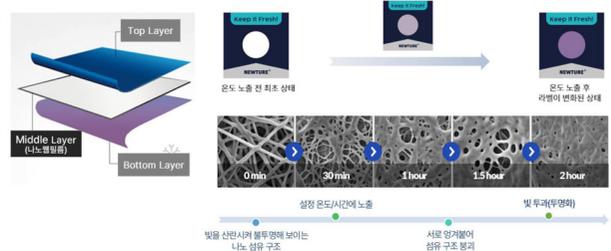


Figure 3. 나노오피 시간-온도 지시계 구성도 및 작동 메커니즘(예시).

3.3. 가스 센서 및 기타 지시계(Gas Sensors and Other Indicators)

전기방사 금속 산화물 나노섬유는 높은 다공성과 큰 비표면적 덕분에 높은 민감도와 빠른 응답/회복 시간을 제공하며, 특히 암모니아 가스와 이산화탄소 검출에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 나노기공성 비정질 실리카-알루미나 필름을 코팅한 센서는 실온에서 감도 높은 NH₃ 검출 능력을 입증하였으며 물 분자 흡착을 위한 흡착 사이트를 부여하여 습도 감지 성능을 향상시켜 고성능 습도 센서 분야에도 적용 가능할 것으로 보인다[13,14].

전기방사 나노섬유는 신선도 지시(FFI), 시간-온도 지시(TTI), 가스 센서, 심지어 항균 및 항산화 기능까지 동시에 포

는 개별적으로 구현할 수 있는 다기능성을 가지며 이는 단일 라벨이 여러 환경 변화를 동시에 모니터링하고, 나아가 식품의 보존 자체에 기여하는 '능동적(active)' 기능을 가질 수 있음을 의미한다. 이러한 다기능성 통합은 미래의 전기방사 기반 콜드체인 모니터링 라벨이 단순한 '지시계'를 넘어, '다기능성 지능형 패키징 시스템'으로 발전할 것임을 의미하며 복잡한 콜드체인 환경에서 더욱 포괄적이고 신뢰성 높은 정보를 제공하여, 식품 안전성과 품질 관리를 한 단계 끌어올릴 잠재력을 가진다[15,16,17].

전기방사 기반 지시계는 소비자가 고정된 유통기한에 의존하지 않고, 식품의 실제 신선도를 직접 확인하여 더 안전하고 경제적인 소비를 할 수 있도록 도와 '진정한 유통기한(True Shelf-Life)' 개념을 실현하여 음식물 쓰레기를 크게 감소시켜 환경 및 경제적으로도 큰 도움이 될 것이다.

4. 전기방사 기반 스마트 라벨의 이점 및 기대 효과

전기방사 기반 스마트 라벨은 콜드체인 시스템에 혁신을 가져오며 광범위한 이점과 긍정적인 파급 효과를 제공한다.

4.1. 음식물 쓰레기 감소 및 비용 절감

스마트 라벨은 상한 음식을 정확하게 구별할 수 있어 제품의 유통기한을 길게 하여 판매되거나 소비되기 전에 상할 가능성이 줄어들어 버려지는 음식의 양이 줄어들게 된다. 평균적으로 가정에서 구매한 식품의 약 15-25%가 낭비되는데, 이러한 유통기한 관리 시스템은 이 낭비를 최대 50%까지 줄일 수 있다는 연구 결과도 있다. 음식물 쓰레기 감소는 환경 보호뿐만 아니라 기업과 소비자의 비용 절감으로 이어지며 계획적인 쇼핑과 충동구매 감소를 통해 연간 식비를 평균 10-20% 절감할 수 있다.

스마트 라벨의 직접적인 이점은 식품 안전성, 품질, 효율성뿐만 아니라 음식물 쓰레기 감소로 천연자원 보호와 환경 보호에 기여하며, 소비자가 제품의 실제 상태를 인지하고 계획적인 소비를 하게 함으로써 '지속 가능한 소비문화'를 정착시키는 데 중요한 역할을 한다. 이는 스마트 라벨이 단순한 기술적 혁신을 넘어, 환경적, 사회적 가치를 창출하는 ESG(환경, 사회, 지배구조) 경영의 핵심 도구로 활용될 수 있음을 의미하며 기업들은 스마트 라벨 도입을 통해 재무적 이익뿐만 아니라 사회적 책임도 동시에 달성할 수 있다.

5. 시장 동향

Grand View Research에서 2020년 발표한 자료에 따르면, 글

로벌 콜드체인 시장은 2003~2019까지 연평균 성장률 3.6%를 기록하였으며, 2020년 이후 2025년까지 연평균 15% 수준의 성장률을 기록할 것으로 예상하고 있다. 콜드체인 시장은 크게 보관시장, 운송시장, 모니터링 시장으로 구분할 수 있으며, 이중 모니터링 시장의 성장률이 18.1%로 가장 높을 것으로 전망. 신선물류 수요 증가는 콜드체인 시장 성장을 견인하고 있으나, 최종 고객에게 제품이 전달되기까지 품질 저하를 차단하기 위한 효율적인 모니터링이 요구된다.

콜드체인 시장은 용도에 따라 유제품 및 냉동 디저트, 생선·육류·해산물 제품, 과일 및 야채, 베이커리 및 제과, 기타 등으로 분류할 수 있다. 2020년 Marketsandmarkets에서 발표한 'Cold Chain Market' 자료에 따르면, 유제품 및 냉동 디저트류가 26.2%의 점유율을 차지하고 있으며, 생선·육류·해산물 제품, 과일 및 야채, 베이커리 및 제과, 기타 순으로 비중을 나타내고 있다. 시장조사 전문기관인 MarketsandMarkets에서는 2020년 12월 'Fresh Food Packaging Market by Material'을 통해 신선식품 포장 시장에 대해 예측하였는데 글로벌 신선식품 포장 시장 규모는 2020년 798억 달러에서 2025년 952억 달러 규모로 성장할 것으로 전망(CAGR : 3.5%)하였고 육류, 채소, 해산물, 과일 등에 폭넓게 사용되는 폴리프로필렌 부문이 가장 높은 성장률을 나타낼 것으로 예측하였다[18,19].



Figure 4. 글로벌 콜드체인 시장규모 및 전망.

기존 신선식품 포장 부문의 목적은 신선식품 유통기한 연장이었으나, 간편식품의 증가, 신선도 모니터링의 요구 증가 등에 의해 스마트 패키징에 대한 관심이 높아지고 있으며 스마트 패키징 시장은 2020년 381.6억 달러에서 2026년 487.2억 달러로 연평균 4.15% 증가할 것으로 전망되고 있다. 스마트 패키징은 개인관리용품, 뷰티, 식품, 건강관리 및 의약품 산업 등 폭넓은 영역에 걸쳐 시장이 형성되어 있으며, 향후 적용 분야가 확대될 것으로 전망된다[20].

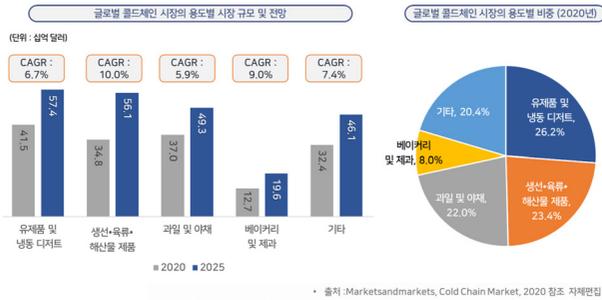


Figure 5. 글로벌 콜드체인 시장의 용도별 시장 규모 전망과 비중.

6. 연구 동향

스마트 라벨 시장에는 QR코드, RFID, 기존 TTI 등 다양한 기술이 존재하며 각각의 장단점이 있다. 전기방사 기반 라벨은 '높은 감도와 실시간성'이라는 차별화된 강점을 제공하지만, '상용화의 어려움'이라는 약점 있어 단일 기술로 수렴하기보다는 높은 정밀도와 실시간 모니터링이 필수적인 고부가가치 식품 예를 들면 신선 육류, 해산물, 의약품 등 시장을 초기 타겟으로 삼아 기술적 우위를 입증하고 점진적으로 시장을 확장하는 전략이 유효할 수 있다.

또한 이런 라벨을 개발하기 위해 전기방사 기술의 가장 큰 과제는 낮은 생산 수율과 고전압 사용의 안전성 문제가 있는데 이를 해결하기 위해 니들리스(needleless) 전기방사, 오픈 서페이스(open-surface) 전기방사, 멜트(melt) 전기방사와 같은 고급 제조 기술 개발을 통해 대량 생산성을 확보하고 효율성을 높이는 연구가 활발히 진행되고 있으며 또한, 생체 적합성 및 생분해성 고분자 등과 같은 소재의 다양화와 새로운 센싱 메커니즘 등이 활발히 연구 중에 있다[21,22].

7. 결 론

전기방사기술은 콜드체인 모니터링 라벨 분야에서 혁신적인 잠재력을 가진 나노섬유를 생산하는 핵심 기술로 자리매김하고 있으며 높은 비표면적, 다공성, 그리고 다양한 기능성 물질의 통합 능력 덕분에 신선도 지시계(FFI), 시간-온도 지시계(TTI), 가스 센서 등 다양한 스마트 라벨의 핵심 구성 요소로 활용될 수 있다[23]. 이러한 전기방사 기반 스마트 라벨은 식품 안전성 및 품질 향상, 음식물 쓰레기 감소, 유통 효율성 증대, 그리고 소비자 편의성 등 다각적인 이점을 제공한다. 또한, 음식물 쓰레기 감소를 통한 자원 효율성 증대, 친환경 포장재 사용 확대, 그리고 식품 안전성 강화를 통해 지속 가능한 소비 문화를

정착시키는 데 핵심적인 역할을 할 것이며 궁극적으로, 이 기술은 생산자에게는 신선한 제품의 지속적인 품질 유지를, 유통사에는 정확하고 편리한 콜드체인 관리를, 소비자에게는 유통(소비)기환에 대한 신뢰를 제공하며, 전반적인 콜드체인 생태계의 효율성과 지속가능성을 높이는 데 기여할 것이다.

참고문헌

1. 김종경, “신선물류 산업 현황 및 표준화 동향”, *KATS 기술보고서*, 2018. **107**, 1-19.
2. 이윤석, “식품 인텔리전트 패키징의 최신 동향”, *포장계*, 2018. pp.54-65.
3. <https://www.thinkfood.co.kr/news/articleView.html> (accessed September 19, 2023).
4. <https://en.wikipedia.org/wiki/Electrospinning>
5. Lebo Maduna and Asis Patnaik, “Challenges Associated with the Production of Nanofibers”, *MPDI*, 2024, 1-15.
6. Yongzhi Zu, Zaihua Duan, Zhen Yuan, Yadong Jiang and Huiling Tai, “Electrospun nanofiber-based humidity sensors: materials, devices, and emerging applications”, *Journal of Materials Chemistry A*, 2024, 27157-27179.
7. Kinga Halicka and Joanna Cabaj, “Electrospun Nanofibers for Sensing and Biosensing Applications-A Review”, *Int J Mol Sci.*, 2021, 6357-6368.
8. Yi-Sa Zhao, Jie Huang, Xingjian Yang, Weqiang Wang, Deng-Guang Yu, Hua He, Ping Liu and Kewei Du, “Electrospun nanofibers and their application as sensors for healthcare”, *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2025, pp.1-23.
9. <https://www.linarinanotech.com/blogs/learn/electrospinning-mechanism>
10. Luying Zhao, Gaigai Duan, Guoying Zhang, Haoqi Yang, Shuijian He, Shaohua Jiang, “Electrospun Functional Materials toward Food Packaging Applications, A Review”, *Nanomaterials(Basel)*, 2020, pp.1-32.
11. <https://www.inovenso.com/ourtechnology/>
12. Yanan Xiao, Hao Luo, Rongxing Tang and Jiazi Hou, “Preparation and applications of Electrospun Optically Transparent Fibrous Membrane”, *Polymer*, 2021, 1-28.
13. Sang Won Kim, Eun Seol Kim, Byeong Jae Park, Yong Woon Jung, Dong Hwa Kim and Seung Ju Lee, “Polycaprolactone/Anthocyanin-

- Based Electrospun Volatile Amines Gas Indicator with Improved Visibility by Varying Bi-Solvent Ratio: A Case of Intelligent Packaging of Mackerel”, *MDPI*, 2023, 3850-3864.
14. Niranjan N Prabhu, R.B. Jagadeesh Chandra, B V Rajendra, Gibin George, Abdel-Hamid Ismail Mourad and B Shivamurthy, “Electrospun Zinc Oxide Nanofiber Based Resistive Gas/Vapor Sensors - A Review”, *Engineered Science*, 2022, 59-82.
 15. Changdong Xu, Jianfeng Tan and Yingru Li, “Application of Electrospun Nanofiber-Based Electrochemical Sensors in Food Safety”, *Molecules*, 4412-4438.
 16. Nahal Aliheidari, Nojan Aliahmad, Mangilal Agarwal and Hamid Dalir, “Electrospun Nanofibers for Label-Free Sensor Applications”, *Sensors*, 2019, 3587-3603.
 17. Yan Li, Mohammed Abedalwafa, Liqin Tang and De Li, “Electrospun Nanofibers for Sensors”, *Nanofabrication and Applications*, 2019, 571-601.
 18. <https://spin.digitalpartner.com.tr/guncel/electrospinning/>
 19. Jie Shi, Junjie Tang, Mengfei Zhang, Yingqi Zou, Jie Pang and Chunhua Wu, “Recent Advances in Polysaccharide-Based Electrospun Nanofibers for Food Safety Detection”, *Sensors*, 2025, 2220-2236.
 20. <https://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=6185>
 21. Shiyi Liang, Jian Zhang, Shunfen Huang, Xingzi Lan, Wenlong Wang and Yadong Tang, “Functionalized Gelatin Electrospun Nanofibrous Membranes in Food Packaging: Modification Strategies for Fulfilling Evolving Functional Requirements”, *Polymers*, 2025, 1066-1097.
 22. <https://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=6817>
 23. 문영국, “식품신선도 판단용 산화물반도체형 가스센서 개발 동향”, *Ceramist*, 2023, 281-289.