식품 안전성 향상을 위한 항균 소재 및 항균 코팅 기술에 대한 종합적인 검토

A comprehensive review of antimicrobial materials and antimicrobial coating technologies for enhancing food safety

김용신 · 박현우

Yong-Shin Kim and Hyeon Woo Park*

고려대학교 식품생명공학과

Department of Food & Biotechnology, Korea University, Sejong 30019, Republic of Korea

박 현 우

Correspondence to

Hyeon Woo Park
Department of Food & Biotechnology, Korea University, Sejong 30019, Republic of Korea
Tel: +82-44-1441
E-mail: hw_park@korea.ac.kr

서론

식품 산업에서 미생물 오염은 제품의 안전성, 품질, 그리고 유통기한에 직결되는 핵심 문제이다. 식품의 생산, 가공, 저장, 유통 단계에서 병원성 또는 부패성 미생물이 증식하면 식중독 발생, 품질 저하, 경제적 손실이 불가피하다[1–3]. 이러한 문제를 해결하기 위해 살균, 소독, 포장 등 다양한 기술이 적용되어 왔으나, 전통적인 열처리나 화학 소독제 사용은 영양소 손실, 관능적 품질 저하, 환경 오염, 그리고 소비자의 안전성 우려를 동반한다[4]. 이에 따라 비열적(non-thermal), 지속적, 그리고 친환경적인 항균 기술의 개발이 식품 분야에서 지속적으로 요구되고 있다[5–7].

항균 소재 및 항균 코팅 기술은 이러한 요구를 충족할 수 있는 유망한 대안으로 주목받고 있다. 항균 소재는 자체적으로 미생물의 성장이나 생존을 억제하는 성질을 가지며, 항균 코팅은 이러한 소재를 표면에 적용하여 항균 기능을 부여하는 기술이다. 특히 포장재나 식품 접촉 표면에 적용 시 병원성 미생물의 부착과 증식을 억제할 수 있어 식품 안전성 향상과 유통기한 연장에 효과적이다[8–11].

항균 소재는 크게 무기계와 유기계로 구분되며, 무기계 소재는 은(Ag), 구리(Cu), 아연(Zn), 티타늄(Ti)과 같은 금속 또는 금속산화물 기반이며, 높은 열적 · 화학적 안정성과 광범위한 항균 활성을 바탕으로 다양한 식품 관련 환경에 적용되고 있다. 반면, 유기계 항균 소재는 키토산, 식물 유래 정유, 합성 항균제 등으로 구성되며, 생분해성, 인체 안전성, 특정 미생물에 대한 선택적 억제 효과 등의 장점을 가진다[1,2].

최근에는 나노기술을 활용한 항균 소재 개발이 활발히 이루어지고 있다. 은, 산화구리, 산화아연, 이산화티타늄 등 다양한 나노입자는 높은 비표면적과 반응성을 바탕으로 우수한 항균 활성을 나타내며, 소재 구조에 따라 항균 효과의 강도도 달라질 수 있다. 또한, 정유 성분의 캡슐화, 고분자 복합화 등 다양한 제형 기술이 개발되며 항균 지속성과 안정성을 높이는 연구가 진행되고 있다[12,13].

항균 소재 · 코팅의 상용화를 위해서는 안전성, 규제, 비용, 제조 용이성 등을 종합적으로 고려해야 한다. 예를 들어, 한국 식품의약품안전처(MFDS)는 「식품용 기구 · 용기 · 포장 기준 및 규격」에서 은, 구리, 아연 등의 식품 접촉재 사용 시 함량 및 용출 기준을 명시하고 있으며, 유럽식품안전청(EFSA)과 미국 FDA 또한 유사한 규제를 운영하고 있다[14-16]. 따라서 실제 적용에는 해당 소재의 물리 · 화학적 특성과 더불어 각국의 규제 요건 충족 여부가 필수적이다.

본 논문에서는 항균 소재와 항균 코팅 기술의 주요 분류와 특성을 고찰하고, 최신 연구 동향 및 식품 산업에서의 적용 가능성을 중심으로 분석하였다. 이를 통해 항균 기술의 활용 방향성과 과제를 종합적으로 제시하고자 한다.

본론

1. 무기 항균 소재

무기 항균 소재는 금속 또는 금속 산화물과 같이 무기 화합물을 기반으로 하며, 넓은 스펙트럼의 항균성을 가지고 내성 발생 가능성이 낮다는 장점이 있다. 특히 열적 · 화학적 안정성이 높아 가공 · 저장 환경에서 안정적으로 항균 기능을 유지할 수 있어 식품 포장재, 표면 코팅, 가공 설비 등에 폭넓게 적용된다. 대표적으로 은(Ag), 산화구리(CuO), 아연 산화물(ZnO), 이산화티타늄(TiO_2) 등이 연구와 산업 분야에서 널리 사용되고 있다(Table 1).

1.1. 은(Ag)

은은 고대부터 살균 · 방부 목적으로 활용되어 온 대표적인 항균 금속으로, 세균, 곰팡이, 바이러스 등 광범위한 항균 스펙트럼을 가진다[17,18]. 은은 이온 형태와 나노입자 형태 모두에서 항균 활성을 나타내며, 식품 포장재, 냉장고 및 전자레인지 내부 코팅 등 다양한 제품에서 활용된다[19,20]. 은 나노입자는 입자 크기, 반응성, 온도, 이온 강도 등에 따라 그 항균성이 달라진다[21]. 특히 수 나노미터 크기의 은 나노입자는 세포막 표면에 결합하여 투과성을 변화시키고, 호흡작용에 영향을 주며, 단백질 변성, 효소 활성 저해, DNA 복제 억제 등의 기전을 통해 미생물을 사멸시킨다[8,9]. 최근 연구에 따르면, 실리카 지지체 위에 −OH, −Ph, −SH, −COOH 등 다양한 유기 리간드로 기능화한 AgNP를 합성하였을 때, −COOH로 기능화된 은 나노입자의 최소억제농도(MIC)는 8 – 16 μg/mL로, *Escherichia coli*에 대해 가장 우수한 항균 활성을 나타냈다[22]. 은 나노입자를 함침한 폴리에틸렌 필름을 신선편이 채소 포장에 적용 시 4℃ 저장 조건에서 부패 속도를 유의적으로 지연시키는 효과가 또한 보고된 바 있다[6].

1.2. 산화 구리(CuO)

구리는 식품 내에서 이온이나 염 형태로 존재하는 잘 알려진 원소이다. 그중 산화구리는 구리의 가장 순수한 형태로, 다양한 용도로 널리 활용되고 있다. 산화구리는 비교적 저렴하고, 높은 용해성을 가지며, 극성 액체 및 고분자와도 안정적으로 작용하는 물리 · 화학적 안정성을 보유한다[23]. 산화구리 나노입자는 항균 활성이 있는 소재로 주목받고 있으며, 여러 연구에서 *Staphylococcus aureus*와 *E. coli* 등 다양한 세균에 대해 억제 효과가 보고되었다. 더 나아가 산화구리 나노입자를 은 나노입자와 결합시킨 복합소재는 최적의 이온 방출을 통해 미생물 사멸 능력을 현저하게 향상시킨 것으로 나타났다[24-26]. 따라서 구리 기반 코팅은 가공 설비 표면, 도마, 조리대 등 식품 접촉 표면에 적용 시 매우 효과적인 항균 활성을 나타낸다. 그러나 구리는 장기간 노출 시 산화에 따른 색 변화와 용출로

Table 1. Examples of inorganic antimicrobial agents for enhancing food safety

Classification of agents	Mechanism	Form	Target microorganisms	Observations	References
Ag	Disrupts membrane permeability and inhibits enzymatic activity	Ag deposition on polypyrrole films	*S.aureus* *S.epidermidis*	• *S.aureus* ATCC 25923 : Inhibitory zone is 12–16mm, highest sensitivity. • *S. epidermidis* : Inhibitory zone is 8–10mm, lower sensitivity.	19)
		Nanoparticles	Heterotrophic cells in activated sludge sample	• In non-settled sludge, 1 mg/L Ag nanoparticles (24 h) reduced the total bacterial count by ~ 1 log CFU/mL.	21)
CuO	Induces membrane damage and exerts toxicity via released Cu^{2+} ions	Copper and lactic acid	*E.coli* (H1730, 43895+, 43895–, 86.24)	• Combination of 40ppm Cu and 0.2% lactic acid reduced *E.coli* by 3.93-log CFU on lettuce and 3.39-log CFU on tomato surface.	24)
		CuO nanoparticles	EMRSA 16	• 10% CuO-Polyurethane reduced EMRSA-16 survival to 〈 50% at 1 h, ~ 10% at 2 h, and completely killed within 4 h.	26)
ZnO	Adsorbs to cell surface, alters membrane integrity, and suppresses gene expression	ZnO coating PVC film	*E.coli* *S.aureus*	• After 24 h, inhibitory zone increased with concentration : E.coli 17.5 → 19.8 mm; *S.aureus* 18.5 → 20.5 mm (ZnO 93.75 → 187.5 ㎍/cm2)	29)
		Nanoparticles	*E.coli*	• Inhibitory zone decreased with particle size : 12nm = 31mm; 45nm = 27mm; 2 ㎛ = 22mm.	32)
TiO_2	Generates photocatalytic oxidative stress leading to membrane and nucleic acid damage	Nanoparticles coating film (MEK)	*E.coli*	• After 3 days exposure (0.11g TiO2/100 mL MEK film) : under fluorescent light, reduction is 0.37 log CFU/g; under UV light, reduction is 0.53 log CFU/g.	39)
		Nanoparticles coating film (OPP)	*E.coli*	• After 3 h exposure under black-light, reduction is 3 log CFU/ml.	40)

인한 금속 맛 부여 가능성이 있어 적용 환경에 대한 고려가 필요하다[27].

1.3. 산화 아연(ZnO)

산화아연은 필수 미량원소인 아연의 산화물 형태로, 다양한 나노구조로 합성되어 광범위한 항균 활성을 나타낸다. 산화아연 *Candida albicans*를 포함한 여러 미생물에 대해 50 – 90%의 억제 효과가 보고되었으며[28–30], 그 기전은 세포 표면 흡착 후 세포막 투과성 교란, 세포 내 물질 유출, 그리고 세포벽 관통에 따른 유전자 발현 억제와 증식 저해로 설명된다. 산화아연의 항균 활성은 구조적 차이에 따라 달라지며, 특히 콜리플라워형 구조가 가장 강력한 활성을 나타낸 바 있다[31]. 특히 산화아연 나노입자는 열적으로 안정하고 높은 생체적합성을 지니며, 그람양성 및 그

람음성 세균 모두에 대해 효과적이다. 보고된 주요 항균 메커니즘은 세포막 손상, 세포벽 파괴, 세포 내 물질 유출 등 물리적 손상[32,33], H_2O_2 및 O_2와 같은 활성산소(ROS)의 생성에 의한 산화적 스트레스이며[34], 자외선(UV) 조사 시 그 항균 효과가 더욱 향상된다고 알려져 있다[35]. 다만 나노 크기 산화아연의 잠재적 독성 가능성에 대한 연구가 진행 중이며, 인체와 환경 안전성 확보를 위한 추가 검증이 요구되고 있다[36].

1.4. 이산화티타늄(TiO2)

이산화티타늄은 강한 광촉매 활성으로 세포막 손상 및 핵산 분해를 유도함으로써 그 강력한 항균 활성을 나타낸다[37]. 특히, 식품 포장재 표면에 이산화티타늄을 코팅하면 광조사 조건에서 미생물 증식을 효과적으로 억제할 수 있음이 다수의 연구에서 보고되었다[38]. LDPE 필름에 이산화티타늄 나노입자를 코팅하여 채소를 포장한 경우, UV-A 조사 강도와 시간이 증가할수록 *E. coli* 수가 현저히 감소하였으며, UV-A 조건에서 약 3 log 수준의 저감 효과가 확인되었다[39]. OPP필름에 이산화티타늄을 코팅한 경우에도 UVA 조사 시 유사한 수준의 항균 효과가 나타나, 단순 광조사보다 훨씬 우수한 항균 활성을 보였다[40]. 이러한 결과는 이산화티타늄 코팅이 신선편이 채소와 같이 표면 오염 위험이 높은 식품의 미생물 안전성을 향상시키고 저장 기간을 연장하기 위해 효과적으로 사용될 수 있음을 나타낸다.

2. 유기 항균 소재

유기 항균 소재는 주로 천연 유래 성분이나 합성 고분자를 기반으로 하며, 생분해성, 인체 안전성, 특정 미생물에 대한 선택적 억제 효과 등에서 장점을 가진다. 단독 사용뿐 아니라 고분자 매트릭스, 나노입자, 복합재 형태로 가공하여 식품 포장재, 표면 코팅, 세척 · 살균제 등 다양한 용도로 활용된다. 대표적인 소재군으로는 키토산, 식물 유래 정유, 이소티아졸리논, 4급 암모늄염 등이 있으며, 각 소재는 구조적 · 화학적 특성에 따라 다른 작용 메커니즘과 응용 범위를 가진다(Table 2).

2.1. 키토산(Chitosan)

키토산은 갑각류의 키틴을 탈아세틸화하여 얻는 양전하성 다당류로, 세포막의 음전하와 결합하여 세포막 투과성을 변화시키고 세포 내용물의 유출을 유도하는 한편, 금속 이온 킬레이션을 통해 미생물 성장에 필요한 영양소를 고갈시켜 항균 효과를 나타낸다[41]. 전통적으로 키토산은 중성 또는 알칼리 조건에서 용해도가 낮아 식품 보존 응용에 제약이 있었으나, N-알킬화된 이당류 키토산 유도체는 이러한 한계를 극복하면서 중성 pH 환경에서도 *E. coli* 및 *S. aureus*에 대해 효과적인 항균성을 유지하는 것으로 보고되었다. 최근 식품 포장용 일회용 복합 멤브레인 개발에서는, 키토산을 S-니트로소-N-아세틸-D-페니실라민(SNAP) 및 나노셀룰로오스와 조합하여 사용한 연구도 있다. 이 SNAP-혼합 키토산 멤브레인은 여러 균주(*S. aureus, Listeria monocytogenes, Enterococcus faecalis*)에 대해 뚜렷한 항균 영역을 형성하며, 식품 포장 응용의 유망한 후보 중 하나임을 시사한다[42]. 한편, 키토산은 전기방사를 통한 섬유화가 어렵지만, 이를 ε-폴리리신과 병합하여 전기방사한 나노섬유 형태는 식품 포장용 항균 소재로서 매우 유망한 효과를 보였다. 해당 나노섬유는 *Salmonella* Typhimurium 및 *S.* Enteritidis에 대해 온도 25 ℃에서 약 8.2 - 8.4 log CFU/g 수준이던 세균 수를 약 5.0 - 5.3 log CFU/g 수준으로 감소시켰으며, 포장된 닭의 색상과 맛도 안정적으로 유지하였다[43]. 이처럼, 키토산 및 그 유도체는 식품 표면 항균, 저장 수명 연장, 품질 유지에 유리한 생체적합성, 생분해성 특성을 갖추고 있어, 다양한 식품 시스템에서 활성 포장 기술로 활용될 수 있는 유망한 소재임을 보여주고 있다[41-43].

2.2. 식물 유래 정유(Essential oils)

정유는 주로 방향성 식물에서 얻어지는 개별 휘발성 화합물로, 항균 활성을 포함한 다양한 생물학적 특성을 지닌다[44]. 미국 식품의약국(FDA)에서는 정유를 천연 식물 추

Table 2. Examples of organic antimicrobial agents for enhancing food safety

Classification of agents	Mechanism	Form	Target microorganisms	Observations	References
Chitosan	Disrupts membrane permeability and chelates metal ions essential for microbial growth	Chitosan edible film	*L. monocytogenes*	• At 500 and 1,000 μg/mL, inhibitory zone were 23 mm and 26 mm.	41)
		ε-polylysine/chitosan nanofibers	*S. typhimurium* *S. enteritidis*	• At 25 ℃, control groups reached 8.21 and 8.37 log CFU/g, whereas ε-polylysine/chitosan nanofiber groups decreased to 5.03 and 5.25 log CFU/g.	43)
Essential oils	Damages membrane structure, increases permeability, and disrupts energy metabolism	Chitosan-cinnamic acid nanogel	*A. flavus*	• Under sealed conditions, MICs were 2100 ppm (free oil) and 500 ppm (encapsulated oil). Encapsulated oil also showed superior performance at 800 ppm under non-sealed conditions.	45)
		Natural	*S. aureus* *E. coli*	• MIC range: 50 – 6400 μg/mL; 〈400 μg/mL inhibited 30 EOs (S. aureus), 12 EOs (E. coli); Azadirachta indicamost active (50 & 200 μg/mL)	46)
Isothiazolinone	Reacts with nucleophilic cellular components, inhibiting enzymes and inducing apoptosis	Cosmetics	Human subjects (Hand)	• Sensitization rates: 4.5% (MCI/MI, 2012), 6.0% (MI, 2012), 7.2% (MI, 2013); mostly middle-aged women with hand/face dermatitis from cosmetics.	50)
		Synthetic preservative	Human patients with suspected contact	• MI sensitization increased : 1.5% (2010) → 3.3% (2011) → 5.6% (2012)	51)
Quaternary ammonium compounds (QACs)	Disrupts membrane via electrostatic interaction with phospholipids, causing leakage and cell lysis	Quaternary ammonium salts	*L. panamensis* Human U-937 cells	• Cytotoxic to U-937 cells (LC_{50}: 9 – 46 μg/mL). Antileishmanial activity = 14 – 57 μg/mL (axenic), 17 – 50 μg/mL (intracellular).	55)

출물 기반의 안전한 항균제로서 Generally Recognized as Safe(GRAS) 물질로 분류하고 있으며, 이를 안전한 식품 첨가물로 활용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 최근 식품 산업에서는 정유를 고분자 재질과 결합하여 천연 항균제로 사용하는 접근이 주목받고 있으며, 이는 각 소재의 장점을 극대화하고 단점을 보완할 수 있는 방법으로 평가된다. 정유는 강한 향과 높은 휘발성으로 인해 직접 첨가 시 식품의 관능 품질에 영향을 줄 수 있는 한계가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 나노에멀전, 마이크로캡슐화, 고분자 매트릭스 내 제어방출 기술이 적용되고 있으며, 이는 정유의 안정성을 높이고 장기간 지속적인 항균 효과를 발휘할 수 있도록 돕는다[45-47]. 일부 연구에서는 정유를 소량 입자 형태로 캡슐화하거나 고분자 필름에 직접 첨가하여 식품 보존에 활용하고 있으며, 이를 통

해 항균 효능을 유지하면서 관능적 영향을 최소화하는 방안이 제시되고 있다. 이와 같이, 정유는 강력한 항균력을 가진 천연 재료로 식품 포장 분야에서 잠재력이 큰 소재이며, 적절한 제형화 기술과 결합하면 안전성과 기능성을 모두 충족하는 활성 포장재로 활용 가능하다[44,48].

2.3. 이소티아졸리논 (Isothiazolinone)

이소티아졸리논은 강력한 합성 유기계 항균소재로, 식품 포장 산업을 포함해 광범위한 산업 분야에서 보존제로 사용된다. 이소티아졸리논은 보존제 및 소독제로서 전 세계적으로 곰팡이 성장과 세균 감염을 억제하는 데 널리 활용되어 오고 있다[49]. 대표적인 유도체로는 methylchloroisothiazolinone (MCI), octylisothiazolinone (OIT), benzisothiazolinone (BIT), methylisothiazolinone (MI) 등이 있으며, 이들은 세균 세포막과 진균 세포벽을 투과하여 세포 내로 확산된 후, N–S 결합의 전자결핍성 황 원자가 세포 구성 성분의 친핵성 기와 반응함으로써 효소 활성을 차단하고 최종적으로 세포 사멸을 유도한다[50–52]. 그러나 이소티아졸리논계 화합물은 장기간 혹은 부적절한 사용 시 인체에 부작용을 초래할 수 있다. 1980년대 MI/MCI의 광범위한 사용 이후, 패치 테스트 환자의 약 9%(전체 인구의 1%)에서 알레르기 반응이 보고되었으며, 이는 직 · 간접 노출로 인한 접촉성 피부염 위험성을 시사한다. 따라서 식품 포장재 적용 시, 유효성뿐 아니라 안전성 평가와 사용 농도 규제가 병행되어야 한다[53].

2.4. 4급 암모늄염(Quaternary ammonium compounds, QACs)

QACs는 이온성 양전하를 띠는 질소 원자가 세포막 인지질과 전기적으로 강하게 결합하여 막 구조를 손상시키고, 세포 내용물의 유출과 용해를 유도해 세균 사멸에 이르게 한다[54]. 이러한 계면활성 특성으로 *E. faecium, S. aureus, Klebsiella pneumoniae, Acinetobacter baumannii, Pseudomonas aeruginosa, Enterobacter spp.* 등 다양한 세균에 효과적이며, 곰팡이와 바이러스에 대해서도 활성을 가진다[55]. QACs는 사전 기능화된 헤테로고리 질소 원자를 이용해 제조가 용이하며, quaternate chitosan과 ammonium bromides 등의 중합을 통해 합성되어 다양한 미생물에 적용될 수 있다. 이러한 광범위 항균 특성으로 인해, 식품 소재의 부패 및 오염 방지를 위한 표면 보호 코팅 소재로 연구 · 활용되고 있다[56]. 그러나 일부 QACs는 독성과 환경 잔류성이 보고되고 있어, 사용 농도 제한과 규제 준수가 필수적이다. 규제 측면에서 EFSA는 QACs의 식품 접촉 표면 용출 기준을 0.01 mg/kg으로 제한하며, MFDS도 유사한 기준을 적용하고 있다[14,15].

3. 항균 코팅 기술

식품 안전성 강화를 위한 항균 기술 중, 코팅은 비교적 간단하면서도 다양한 식품군에 적용 가능한 유연한 접근 방식으로 주목받고 있다. 특히, 항균 소재를 식품 표면, 포장재, 가공 장비 등 다양한 기질에 도포함으로써 병원성 미생물의 부착과 증식을 효과적으로 억제할 수 있으며, 기존 살균 소독 기술의 한계를 보완하는 역할을 수행한다. 항균 코팅은 적용 대상과 방식에 따라 농산물 표면용, 식품 포장재용, 식품 접촉 장비용 등으로 나뉘며, 각 분야에서의 특성 및 요구 조건에 따라 설계 방식 또한 달라지게 된다.

3.1. 농산물에서의 항균 코팅

신선 농산물은 수분 함량이 높고 호흡 활성이 활발하여 병원성 및 부패성 미생물의 성장에 적합한 조건을 제공하며, 이로 인해 저장성 및 품질 저하 문제가 빈번히 발생한다[57–60]. 특히 신선편이 채소 및 과일은 절단 및 세척 과정을 거치면서 오염 가능성이 높아져, 식중독 발생 가능성 및 유통기한 단축의 주요 원인이 된다[61]. 이에 따라, 농산물의 미생물 오염을 제어하고 저장 중 품질을 유지하기 위한 방안으로 다양한 항균 기술이 도입되고 있으며, 그중

항균 코팅은 효과적인 오염 억제 수단으로 주목받고 있다[61,62]. 농사물에서의 항균 코팅은 제품 표면에 직접 적용되는 얇은 층의 식용 가능 물질로 구성되며, 다당류, 단백질, 지질 또는 이들의 복합체가 주로 사용된다[63-65]. 적용 방식은 담금, 분사, 브러싱, 압출 또는 용매 주조 방식으로 구현되며, 실제 식품과 함께 섭취되기 때문에 독성이 없어야 하고 경제성이 높으며 식품의약품안전처나 FDA 등의 승인 기준을 충족해야 한다[64,66,67]. 최근에는 식물 추출물 기반의 천연 항균제를 식용 코팅에 혼합하여 적용하는 방식이 주목받고 있다. 이들은 얇은 물리적 장벽을 형성함으로써 표면의 병원성 미생물 부착 및 증식을 억제하여 안전성과 저장성을 향상시킬 수 있다[68]. 대표적으로 키토산, 알로에 베라 젤, 검류 등이 식용 코팅제로 널리 활용되며, 유의적인 미생물 성장 억제 효과가 보고되고 있다[69-72]. 항균 활성은 코팅제의 농도 및 종류 뿐만 아니라, 혼합된 기능성 물질의 농도, 입자 크기, 방출 특성, 작용 방식 등에 다양한 이자에 따라 그 항균 활성이 달라진다[73,74]. 특히 서로 다른 항균 성분 간의 상호작용은 단일 성분보다 더 높은 항균 효능을 발휘할 수 있어, 이를 고려한 다성분 기반의 코팅제 설계가 효과적으로 활용될 수 있다[73,75].

3.2. 식품 포장재에서의 항균 코팅

식품 포장재에 적용되는 항균 코팅은 포장 기질의 표면에 일관된 얇은 층으로 형성되어, 기체 차단, 소수성/친수성 조절, 자외선 차단, 기계적 강도 향상 등의 기능을 제공할 수 있다[76-78]. 특히 고분자 기반의 포장재는 기질 자체의 기능성을 강화하기 위해 다양한 첨가제를 포함하거나, 고성능 소재로 재설계되는 경우가 많으며, 이를 통해 보존기간 연장 및 식품 안정성 확보가 가능해진다[79-81]. 식품 포장에 활용되는 대표적인 합성 고분자 소재로는 LDPE, HDPE, PET, PP, PS, PA, EVOH, PLA, PVOH 등이 있으며, 각 소재는 용도에 따라 적합한 특성이 요구된다. 예를 들어, PET는 투명성과 기체 차단력이 우수하여 탄산음료나 생수병 등에 사용되며, PP는 내열성이 뛰어나 전자레인지용 포장재에 적합하다[82]. 그러나 이러한 합성 고분자는 생분해성이 낮고 환경 오염의 우려가 있어, 이를 대체할 수 있는 생분해성 고분자 기반 포장재 개발이 활발히 진행되고 있다[83,84].

3.3. 식품 접촉면 및 가공 장비에서의 항균 코팅

식품 가공 과정에서 접촉 표면의 교차오염은 식중독 원인균의 주요 전파 경로로 알려져 있으며, 실제 미국 등지에서 발생한 식중독 사례에서는 아이스크림(*L. monocytogenes*), 땅콩버터(*S.* Tennessee), 멜론(*Listeria*) 등의 가공 장비 또는 식품 접촉면 오염이 감염원인으로 지목되었다[85-90]. 특히 *L. monocytogenes*는 환경 내 생존력이 높고 다양한 표면에 부착 및 증식할 수 있는 특성을 가지므로, 식품 접촉 표면에서의 제어가 매우 중요하다[91,92]. 기존의 살균 소독 방법만으로는 이러한 환경 병원균의 완전한 제거가 어렵기 때문에, 병원균의 부착과 정착을 사전 차단할 수 있는 코팅 기술의 개발이 요구된다. 일반적으로 병원성 미생물은 수분, 고형물, 공기 중 에어로졸 등 다양한 매체를 통해 표면에 이식될 수 있으며, 이러한 경로를 차단할 수 있는 특이적 표면 코팅 기술이 필요하다[93]. 최근에는 친수성 또는 소수성 특성이 조절된 특수 표면 처리를 통해 미생물의 부착을 억제하는 접근이 주목받고 있으며, 일부 연구에서는 탄소나노튜브-PTFE(CNT-PTFE), 이산화티타늄 등을 처리한 스테인리스 표면에서 최대 80%까지 부착 세균 수가 감소한 것으로 나타났다[93,94]. 이와 같은 표면 개질 기술은 물리적으로 세균의 정착을 억제하는 방식으로, 바이오필름 형성을 방지하는 데 효과적이다. 또한, 항균제가 서서히 방출되는 방식의 표면 코팅은 접촉 표면에 존재하는 세균의 부착 뿐 아니라 사멸 효과도 제공할 수 있으나, 시간이 지남에 따라 활성이 저하된다는 단점이 있다[93]. 따라서 식품 접촉면에서 사용될 항균 코팅은 비활성적이고 식품 접촉에 안전한 물질을 기반으로 하여야 하며, 다양한 가공 조건에서도 안정적인 항균 효과를 유지할 수 있어야 한다. 이와 함께 초소수성 코팅, 항부착 성분, 항균제 복합화 등의 전략

적 설계를 통해 식품 가공 환경에서의 교차오염 및 병원균 전이를 효과적으로 억제할 수 있을 것으로 기대된다[95-97].

요약

본 연구에서는 식품의 미생물 안전성을 확보하고 저장 수명을 연장하기 위한 무기 및 유기 항균 소재와 항균 코팅 기술의 최신 연구 동향을 조사하였다. 특히, 은, 산화구리, 산화 아연, 이산화티타늄 등의 무기 항균 소재와, 키토산, 식물 유래 정유, 이소티아졸리논. 4급 암모늄염 등의 유기 항균 소재를 대상으로 주요 특성과 식품 적용 사례를 정리하였다. 무기 항균 소재는 강력하고 지속적인 항균 효과를 제공하나 금속 이온 용출 등 안전성 평가가 필요하며, 유기 항균 소재는 친환경성과 다양한 적용 가능성을 갖추었으나 안정성 확보와 사용 규제에 대한 고려가 요구된다. 또한 농산물 표면, 식품 포장재, 가공 장비 등 적용 대상별 항균 코팅 기술의 특성과 장단점을 분석하였다. 이러한 기술들은 미생물 부착과 증식을 억제하고, 식품 품질을 유지하며, 저장 기간을 연장하는 데 효과적이었다. 항균 코팅 기술은 식품 접촉면 및 포장재 등의 다양한 식품 환경에서의 활용 가능성을 보여주며, 기존 살균·세척 기술의 한계를 보완하는 전략으로 주목받고 있다. 이러한 연구는 식품 안전 향상을 위한 실용적 접근을 제시하며, 향후에는 소재 간 조합, 제형화 기술의 고도화, 실제 식품 환경에서의 적용 검증을 통해 상용화가 촉진될 것으로 사료된다.

참고 문헌

1. Cushen, M., Kerry, J., Morris, M., Cruz-Romero, M., Cummins, E., Nanotechnologies in the food industry – Recent developments, risks and regulation. *Trends Food Sci. Technol.*, 24(1), 30–46 (2012).

2. Duncan, T.V., Applications of nanotechnology in food packaging and food safety: Barrier materials, antimicrobials and sensors. *J. Colloid Interface Sci.*, 363(1), 1–24 (2011).

3. Park, H.W., Earles, J.M., Nitin, N., Infrared thermal image processing technique for evaluating superheated steam as a dry sanitation method. *Food Res. Int.*, 201, 115604 (2025).

4. Park, H.W., Park, S.W., Inactivation kinetics of *Escherichia coli* O157:H7 on baby-cut carrots during gaseous chlorine dioxide treatment: The impact of relative humidity. *Food Bioprocess Technol.*, 17(11), 4195–4203 (2024).

5. Appendini, P., Hotchkiss, J.H., Review of antimicrobial food packaging. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, 3(2), 113–126 (2002).

6. Rai, M., Yadav, A., Gade, A., Silver nanoparticles as a new generation of antimicrobials. *Biotechnol. Adv.*, 27(1), 76–83 (2009).

7. Park, H.W., Balasubramaniam, V.M., Infrared thermal image processing technique for evaluating superheated steam as a dry sanitation method. *Food Bioprocess Technol.*, 18, 1417–1430 (2025).

8. Morones, J.R., Elechiguerra, J.L., Camacho, A., Holt, K., Kouri, J.B., Ramírez, J.T., Yacaman, M.J., The bactericidal effect of silver nanoparticles. *Nanotechnology*, 16(10), 2346–2353 (2005).

9. Li, W.R., Xie, X.B., Shi, Q.S., Zeng, H.Y., Ou-Yang, Y.S., Chen, Y.B., Antibacterial activity and mechanism of silver nanoparticles on *Escherichia coli*. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 85, 1115–1122 (2010).

10. Martínez-Abad, A., Sánchez, G., Fuster, V., Lagarón, J.M., Ocio, M.J., Antibacterial performance of solvent cast polycaprolactone (PCL) films containing essential oils. *Food Control*, 34(1), 214–220 (2013).

11. Sánchez-González, L., Vargas, M., González-Martínez, C., Chiralt, A., Cháfer, M., Use of essential oils in

bioactive edible coatings: *A review*. *Food Eng. Rev*., 3(1), 1–16 (2011).

12. Lithi, I.J., Nakib, K.I.A., Chowdhury, A.S., Hossain, M.S., A review on the green synthesis of metal (Ag, Cu, Au) and metal oxide (ZnO, MgO, Co_3O_4, TiO_2) nanoparticles using plant extracts for developing antimicrobial properties. *Nanoscale Adv*., 7(9), 2446–2473 (2025).

13. Eker, F., Akdaşçi, E., Duman, H., Bechelany, M., Karav, S., Green synthesis of silver nanoparticles using plant extracts: A comprehensive review of physicochemical properties and multifunctional applications. *Int. J. Mol. Sci.*, 26(13), 6222 (2025).

14. Ministry of Food and Drug Safety (MFDS), Standards and specifications for utensils, containers, and packages (2023).

15. European Food Safety Authority (EFSA), Scientific opinion on the safety evaluation of silver nanoparticles for use in food contact materials. *EFSA J.*, 19(1), 6341 (2021).

16. U.S. Food and Drug Administration (FDA), Inventory of Effective Food Contact Substance (FCS) Notifications (2023).

17. Koizhaiganova, M., Yaşa, I., Gülümser, G., Assessment of antibacterial activity of lining leather treated with silver doped hydroxyapatite. *Int. Biodeterior. Biodegradation*, 105, 262–267 (2015).

18. Mirzaee, M., Vaezi, M., Palizdar, Y., Synthesis and characterization of silver doped hydroxyapatite nanocomposite coatings and evaluation of their antibacterial and corrosion resistance properties in simulated body fluid. *Mater. Sci. Eng. C*, 69, 675–684 (2016).

19. Saugo, M., Flamini, D.O., Brugnoni, L.I., Saidman, S.B., Silver deposition on polypyrrole films electrosynthesised onto Nitinol alloy. Corrosion protection and antibacterial activity. *Mater. Sci. Eng. C*, 56, 95–103 (2015).

20. Silver, S., Schottel, J., Weiss, A., Bacterial resistance to toxic metals determined by extrachromosomal R factors. *Int. Biodeterior. Biodegradation*, 48(1–4), 263–281 (2001).

21. Sun, X., Sheng, Z., Liu, Y., Effects of silver nanoparticles on microbial community structure in activated sludge. *Sci. Total Environ*., 443, 828–835 (2013).

22. Xue, P., Shan, Y., Shen, Q., Li, Y., Jiang, J., Liu, Y., Liu, X., Potential impact of organic ligands on the antibacterial activity of silver nanoparticles. *New J. Chem*., 43(7), 2870–2874 (2019).

23. Grass, G., Rensing, C., Solioz, M., Metallic copper as an antimicrobial surface. *Appl. Environ. Microbiol.*, 77(5), 1541–1547 (2011).

24. Gyawali, R., Ibrahim, S.A., Abu Hasfa, S.H., Smqadri, S.Q., Haik, Y., Antimicrobial activity of copper alone and in combination with lactic acid against *Escherichia coli* O157:H7 in laboratory medium and on the surface of lettuce and tomatoes. *J. Pathog*., 2011, 650968 (2011).

25. Ren, G., Hu, D., Cheng, E.W.C., Vargas-Reus, M.A., Reip, P., Allaker, R.P., Characterisation of copper oxide nanoparticles for antimicrobial applications. *Int. J. Antimicrob. Agents*, 33(6), 587–590 (2009).

26. Ahmad, Z., Vargas-Reus, M.A., Bakhshi, R., Ryan, F., Ren, G.G., Oktar, F., Allaker, R.P., Antimicrobial properties of electrically formed elastomeric polyurethane–copper oxide nanocomposites for medical and dental applications. *Methods Enzymol*., 509, 87–99 (2012).

27. Vincent, M., Hartemann, P., Engels-Deutsch, M., Antimicrobial applications of copper. *Int. J. Hyg. Environ. Health*, 219(7), 585–591 (2016).

28. Espitia, P.J.P., Soares, N.F.F., Coimbra, J.S.R., de Andrade, N.J., Cruz, R.S., Medeiros, E.A.A., Zinc oxide nanoparticles: Synthesis, antimicrobial activity and food packaging applications. *Food Bioprocess Technol.*, 5(5), 1447–1464 (2012).

29. Li, X., Xing, Y., Jiang, Y., Ding, Y., Li, W., Antimicrobial activities of ZnO powder-coated PVC film to inactivate food pathogens. *Int. J. Food Sci. Technol.*, 44(11), 2161–2168 (2009).

30. Mijnendonckx, K., Leys, N., Mahillon, J., Silver, S., Van Houdt, R., Antimicrobial silver: Uses, toxicity and potential for resistance. *Biometals*, 26(4), 609–621 (2013).

31. Singh, S., Barick, K.C., Bahadur, D., Shape-controlled hierarchical ZnO architectures: Photocatalytic and antibacterial activities. *CrystEngComm*, 15(23), 4631–4639 (2013).

32. Padmavathy, N., Vijayaraghavan, R., Enhanced bioactivity of ZnO nanoparticles—An antimicrobial study. *Sci. Technol. Adv. Mater.*, 9(3), 1–7 (2008).

33. Tiwari, V., Mishra, N., Gadani, K., Solanki, P.S., Shah, N.A., Tiwari, M., Mechanism of anti-bacterial activity of zinc oxide nanoparticle against carbapenem-resistant *Acinetobacter baumannii*. *Front. Microbiol.*, 9, 1218 (2018).

34. Dimapilis, E.A.S., Hsu, C.S., Mendoza, R.M.O., Lu, M.C., Zinc oxide nanoparticles for water disinfection. *Sustain. Environ. Res.*, 28(2), 47–56 (2018).

35. Raghupathi, K.R., Koodali, R.T., Manna, A.C., Size-dependent bacterial growth inhibition and mechanism of antibacterial activity of zinc oxide nanoparticles. *Langmuir*, 27(7), 4020–4028 (2011).

36. Vandebriel, R.J., De Jong, W.H., A review of mammalian toxicity of ZnO nanoparticles. *Nanotechnol. Sci. Appl.*, 5, 61–71 (2012).

37. Foster, H.A., Ditta, I.B., Varghese, S., Steele, A., Photocatalytic disinfection using titanium dioxide: Spectrum and mechanism of antimicrobial activity. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 90, 1847–1868 (2011).

38. Nakata, K., Fujishima, A., TiO_2 photocatalysis: Design and applications. *J. Photochem. Photobiol. C*, 13(3), 169–189 (2012).

39. Othman, S.H., Abd Salam, N.R., Zainal, N., Kadir Basha, R., Talib, R.A., Antimicrobial activity of TiO_2 nanoparticle-coated film for potential food packaging applications. *Int. J. Photoenergy*, 2014, 945930 (2014).

40. Chawengkijwanich, C., Hayata, Y., Development of TiO_2 powder-coated food packaging film and its ability to inactivate *Escherichia coli* in vitro and in actual tests. *Int. J. Food Microbiol.*, 123(3), 288–292 (2008).

41. Muñoz-Tebar, N., Pérez-Álvarez, J.A., Fernández-López, J., Viuda-Martos, M., Chitosan edible films and coatings with added bioactive compounds: Antibacterial and antioxidant properties and their application to food products: A review. *Polymers*, 15(2), 396 (2023).

42. Sundaram, J., Pant, J., Goudie, M.J., Mani, S., Handa, H., Antimicrobial and physicochemical characterization of biodegradable, nitric oxide-releasing nanocellulose-chitosan packaging membranes. *J. Agric. Food Chem.*, 64(25), 5260–5266 (2016).

43. Lin, L., Xue, L., Duraiarasan, S., Haiying, C., Preparation of ε-polylysine/chitosan nanofibers for food packaging against Salmonella on chicken. *Food Packag. Shelf Life*, 17, 134–141 (2018).

44. Hyldgaard, M., Mygind, T., Meyer, R.L., Essential oils in food preservation: Mode of action, synergies, and interactions with food matrix components. *Front. Microbiol.*, 3, 12 (2012).

45. Beyki, M., Zhaveh, S., Khalili, S.T., Rahmani-Cherati, T., Abollahi, A., Bayat, M., Tabatabaei, M., Mohsenifar, A., Encapsulation of *Mentha piperita* essential oils in chitosan-cinnamic acid nanogel with enhanced antimicrobial activity against Aspergillus flavus. *Ind. Crops Prod.*, 54, 310–319 (2014).

46. Biddeci, G., Cavallaro, G., Di Blasi, F., Lazzara, G., Massaro, M., Milioto, S., Parisi, F., Riela, S., Spinelli, G., Halloysite nanotubes loaded with peppermint essential oil as filler for functional biopolymer film. *Carbohydr. Polym.*, 152, 548–557 (2016).

47. Wen, P., Zhu, D.H., Wu, H., Zong, M.H., Jing, Y.R., Han, S.Y., Encapsulation of cinnamon essential oil in electrospun nanofibrous film for active food packaging. *Food Control*, 59, 366–376 (2016).

48. Thielmann, J., Muranyi, P., Kazman, P., Screening essential oils for their antimicrobial activities against the foodborne pathogenic bacteria *Escherichia coli*, *Salmonella enterica*, *Listeria monocytogenes*, and *Staphylococcus aureus*. *Heliyon*, 5(6), e01860 (2019).

49. Omachel, W., Kreczmer, B., Barbasz, A., Isothiazolinones as preservatives: Physicochemical characteristics, biological activity, and safety assessment. *Toxicol. Mech. Methods*, 35(5), 361–400 (2025).

50. Aerts, O., Baeck, M., Constandt, L., Dezfoulian, B., Jacobs, M.C., Kerre, S., Lapeere, H., Pierret, L., Wouters, K., Goossens, A., The dramatic increase in the rate of methylisothiazolinone contact allergy in Belgium: A multicentre study. *Contact Dermatitis*, 71(1), 41–48 (2014).

51. Hosteing, S., Meyer, N., Waton, J., Barbaud, A., Bourrain, J.L., Raison-Peyron, N., Felix, B., Milpied-Homsi, B., Ferrier Le Bouedec, M.C., Castelain, M., Vital-Durand, D., Outbreak of contact sensitization to methylisothiazolinone: An analysis of French data from the REVIDAL-GERDA network. *Contact Dermatitis*, 70(5), 262–269 (2014).

52. Silva, V., Silva, C., Soares, P., Garrido, E.M., Borges, F., Garrido, J., Isothiazolinone biocides: Chemistry, biological, and toxicity profiles. *Molecules*, 25(4), 991 (2020).

53. Aerts, O., Goossens, A., Lambert, J., Lepoittevin, J.P., Contact allergy caused by isothiazolinone derivatives: An overview of non-cosmetic and unusual cosmetic sources. *Eur. J. Dermatol.*, 27(2), 115 - 122 (2017).

54. Nadagouda, M.N., Vijayasarathy, P., Sin, A., Nam, H., Khan, S., Parambath, J.B., Mohamed, A.A., Han, C., Antimicrobial activity of quaternary ammonium salts: Structure - activity relationship. *Med. Chem. Res.*, 31(10), 1663 - 1678 (2022).

55. Duque-Benítez, S.M., Ríos-Vásquez, L.A., Ocampo-Cardona, R., Cedeño, D.L., Jones, M.A., Vélez, I.D., Robledo, S.M., Synthesis of novel quaternary ammonium salts and their in vitro antileishmanial activity and U-937 cell cytotoxicity. *Molecules*, 21(4), 381 (2016).

56. Moore, A.N., Silva, T.L.L., Carrejo, N.C., Marmolejo, C.A.O., Li, I.C., Hartgerink, J.D., Nanofibrous peptide hydrogel elicits angiogenesis and neurogenesis without drugs, proteins, or cells. *Biomaterials*, 161, 154 - 163 (2018).

57. Momin, M.C., Jamir, A.R., Ankalagi, N., Henny, T., Devi, O.B., Edible coatings in fruits and vegetables: A brief review. *Pharma Innov. J.*, 10(7), 71 - 78 (2021).

58. Mohammad, Z.H., Yu, H., Neal, J.A., Gibson, K.E., Sirsat, S.A., Food safety challenges and barriers in southern United States farmers markets. *Foods*, 9(1), 12 (2019).

59. Pollack, S.L., Consumer demand for fruit and vegetables: The US example. Changing Structure Glob. *Food Consum. Trade*, 6, 49 - 54 (2001).

60. Ryser, E.T., Hao, J., Yan, Z., Internalization of pathogens in produce. In: Mi*crobial Safety of Fresh Produce*, 55 - 80 (2009).

61. Basumatary, I.B., Mukherjee, A., Katiyar, V., Kumar, S., Biopolymer-based nanocomposite films and coatings: Recent advances in shelf-life improvement of fruits and vegetables. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, 62(7), 1912 - 1935 (2022).

62. Al-Tayyar, N.A., Youssef, A.M., Al-Hindi, R.R., Edible coatings and antimicrobial nanoemulsions for enhancing shelf life and reducing foodborne pathogens of fruits and vegetables: A review. *Sustain. Mater. Technol.*, 26, e00215 (2020).

63. Radev, R., Pashova, S., Application of edible films and coatings for fresh fruit and vegetables. *Qual. Access Success*, 21(177), 108 - 112 (2020).

64. Guilbert, S., Gontard, N., Gorris, L.G., Prolongation of the shelf-life of perishable food products using biodegradable films and coatings. *LWT-Food Sci. Technol.*, 29(1 - 2), 10 - 17 (1996).

65. Dhall, R.K., Advances in edible coatings for fresh fruits and vegetables: A review. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, 53(5), 435 - 450 (2013).

66. Thakur, R., Pristijono, P., Bowyer, M., Singh, S.P., Scarlett, C.J., Stathopoulos, C.E., Vuong, Q.V., A starch edible surface coating delays banana fruit ripening. *LWT*, 100, 341 - 347 (2019).

67. Yousuf, B., Qadri, O.S., Srivastava, A.K., Recent developments in shelf-life extension of fresh-cut fruits and vegetables by application of different edible coatings: A review. *LWT*, 89, 198 - 209 (2018).

68. Jianglian, D., Shaoying, Z., Application of chitosan-based coating in fruit and vegetable preservation: A review. *J. Food Process Technol.*, 4(5), 227 (2013).

69. Gad, M.M., Zagzog, O.A., Mixing xanthan gum and chitosan nanoparticles to form new coating for maintaining storage life and quality of elmamoura guava fruits. *Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci.*, 6(11), 1582 - 1591 (2017).

70. Deng, Z., Jung, J., Simonsen, J., Wang, Y., Zhao, Y., Cellulose nanocrystal reinforced chitosan coatings for improving the storability of postharvest pears under both ambient and cold storages. *J. Food Sci.*, 82(2), 453 - 462 (2017).

71. Tahir, H.E., Xiaobo, Z., Mahunu, G.K., Arslan, M., Abdalhai, M., Zhihua, L., Recent developments in gum edible coating applications for fruits and vegetables preservation: A review. *Carbohydr. Polym.*, 224, 115141 (2019).

72. Martinez, L.R., Mihu, M.R., Tar, M., Cordero, R.J., Han, G., Friedman, A.J., Friedman, J.M., Nosanchuk, J.D., Demonstration of antibiofilm and antifungal efficacy of chitosan against candidal biofilms, using an in vivo central venous catheter model. *J. Infect. Dis.*, 201(9), 1436 - 1440 (2010).

73. Wei, X., Yang, Z., Tay, S.L., Gao, W., Photocatalytic TiO_2 nanoparticles enhanced polymer antimicrobial coating. *Appl. Surf. Sci.*, 290, 274–279 (2014).

74. Xing, Y., Xu, Q., Che, Z., Li, X., Li, W., Effects of chitosan–oil coating on blue mold disease and quality attributes of jujube fruits. *Food Funct.*, 2(8), 466–474 (2011).

75. Ribeiro, A.I., Dias, A.M., Zille, A., Synergistic effects between metal nanoparticles and commercial antimicrobial agents: A review. *ACS Appl. Nano Mater.*, 5(3), 3030–3064 (2022).

76. Egodage, D.P., Jayalath, H.T., Samarasekara, A.M., Amarasinghe, D.A., Madushani, S.P., Senerath, S.M., Novel antimicrobial nano coated polypropylene based materials for food packaging systems. In: *Proc. 2017 Moratuwa Eng. Res. Conf. (MERCon)*, 88–92 (2017).

77. Müller, K., Bugnicourt, E., Latorre, M., Jorda, M., Echegoyen Sanz, Y., Lagaron, J.M., Miesbauer, O., Bianchin, A., Hankin, S., Bölz, U., Pérez, G., Review on the processing and properties of polymer nanocomposites and nanocoatings and their applications in the packaging, automotive and solar energy fields. *Nanomaterials*, 7(4), 74 (2017).

78. Suriati, L., Utama, I.M., Harsojuwono, B.A., Gunam, I.B., Effect of additives on surface tension, viscosity, transparency and morphology structure of aloe vera gel–based coating. *Front. Sustain. Food Syst.*, 6, 831671 (2022).

79. Baig, N., Kammakakam, I., Falath, W., Nanomaterials: A review of synthesis methods, properties, recent progress, and challenges. *Mater. Adv.*, 2(6), 1821–1871 (2021).

80. Duncan, T.V., Applications of nanotechnology in food packaging and food safety: Barrier materials, antimicrobials and sensors. *J. Colloid Interface Sci.*, 363(1), 1–24 (2011).

81. Duncan, T.V., The communication challenges presented by nanofoods. *Nat. Nanotechnol.*, 6(11), 683–688 (2011).

82. Tajeddin, B., Arabkhedri, M., Polymers and food packaging. In: *Polymer Science and Innovative Applications*, 525–543 (2020).

83. Jin, T., Zhang, H., Biodegradable polylactic acid polymer with nisin for use in antimicrobial food packaging. *J. Food Sci.*, 73(3), M127–M134 (2008).

84. Mallegni, N., Phuong, T.V., Coltelli, M.B., Cinelli, P., Lazzeri, A., Poly(lactic acid) (PLA) based tear resistant and biodegradable flexible films by blown film extrusion. *Materials*, 11(1), 148 (2018).

85. Yemmireddy, V.K., Farrell, G.D., Hung, Y.C., Development of titanium dioxide (TiO_2) nanocoatings on food contact surfaces and method to evaluate their durability and photocatalytic bactericidal property. *J. Food Sci.*, 80(8), N1903–N1911 (2015).

86. Chasseignaux, E., Gérault, P., Toquin, M.T., Salvat, G., Colin, P., Ermel, G., Ecology of *Listeria monocytogenes* in the environment of raw poultry meat and raw pork meat processing plants. *FEMS Microbiol. Lett.*, 210(2), 271–275 (2002).

87. Meylheuc, T., Renault, M., Bellon–Fontaine, M.N., Adsorption of a biosurfactant on surfaces to enhance the disinfection of surfaces contaminated with *Listeria monocytogenes*. *Int. J. Food Microbiol.*, 109(1–2), 71–78 (2006).

88. Pouillot, R., Klontz, K.C., Chen, Y., Burall, L.S., Macarisin, D., Doyle, M., Bally, K.M., Strain, E., Datta, A.R., Hammack, T.S., Van Doren, J.M., Infectious dose of *Listeria monocytogenes* in outbreak linked to ice cream, United States, 2015. *Emerg. Infect. Dis.*, 22(12), 2113 (2016).

89. Chang, A.S., Sreedharan, A., Schneider, K.R., Peanut and peanut products: A food safety perspective. *Food Control*, 32(1), 296–303 (2013).

90. McCollum, J.T., Cronquist, A.B., Silk, B.J., Jackson, K.A., O'Connor, K.A., Cosgrove, S., Gossack, J.P., Parachini, S.S., Jain, N.S., Ettestad, P., Ibraheem, M., Multistate outbreak of listeriosis associated with cantaloupe. *N. Engl. J. Med.*, 369(10), 944–953 (2013).

91. Frank, J.F., Microbial attachment to food and food contact surfaces. *Adv. Food Nutr. Res.*, 43, 319–370 (2001).

92. Ferreira, V., Wiedmann, M., Teixeira, P., Stasiewicz, M.J., *Listeria monocytogenes* persistence in food–associated environments: Epidemiology, strain characteristics, and implications for public health. *J. Food Prot.*, 77(1), 150–170 (2014).

93. DeFlorio, W., Liu, S., White, A.R., Taylor, T.M., Cisneros–Zevallos, L., Min, Y., Scholar, E.M., Recent developments in antimicrobial and antifouling coatings

to reduce or prevent contamination and cross-contamination of food contact surfaces by bacteria. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, 20(3), 3093-3134 (2021).

94. Yoon, S.H., Rungraeng, N., Song, W., Jun, S., Superhydrophobic and superhydrophilic nanocomposite coatings for preventing *Escherichia coli* K-12 adhesion on food contact surface. *J. Food Eng.*, 131, 135-141 (2014).

95. Ferreira, V., Wiedmann, M., Teixeira, P., Stasiewicz, M.J., *Listeria monocytogenes* persistence in food-associated environments: Epidemiology, strain characteristics, and implications for public health. *J. Food Prot.*, 77(1), 150-170 (2014).

96. Carpentier, B., Cerf, O., Persistence of *Listeria monocytogenes* in food industry equipment and premises. *Int. J. Food Microbiol.*, 145(1), 1-8 (2011).

97. Jordan, K., Hunt, K., Lourenco, A., Pennone, V., *Listeria monocytogenes* in the food processing environment. *Curr. Clin. Microbiol. Rep.*, 5(2), 106-119 (2018).