

항균, 항진균 및 항바이러스 액티브 패키징의 최근 연구 동향

박시연 · 지하니 · 최지은 · 임슬기 · 장윤지*

국민대학교 식품영양학과

Recent Research Trends in Antibacterial, Antifungal, and Antiviral Active Packaging

Siyeon Park, Hani Ji, Jieun Choi, Seulgi Imm, and Yoonjee Chang*

Department of Food and Nutrition, Kookmin University, Seoul, 02707, Republic of Korea

Abstract Since the COVID-19 crisis, the use of disposable packaging materials and delivery services, which raise environmental and social issues with waste disposal, has significantly increased. Antimicrobial active packaging has emerged as a viable solution for extending the shelf-life of foods by minimizing microbial growth and decomposition. In this review article, we provide a comprehensive overview of current research trends in antimicrobial active film and coating published over the last five years. First, we introduced various polymer materials such as film and coating that are used in active packaging. Next, various types of antimicrobial (antibacterial, antifungal, and antiviral) packaging including essential oil, extracts, biological material, metal, and nanoparticles were introduced and their activities and mechanisms were discussed. Finally, the current challenges and prospects were discussed. Overall, this review provides insights into the recent advancements in antimicrobial active packaging research and highlights the potential of the technology to enhance food safety and quality.

Keywords: active packaging; antibacterial; antifungal; antiviral; research trends

서 론

포장은 물품 공급 과정에서 효율적인 운송을 가능하게 하고, 물리적인 손상을 방지한다. 또한 화학적, 생물학적 변화를 예방하여 생산부터 최종 소비까지 제품의 품질 및 안전을 유지할 수 있도록 한다. 활성 포장(active packaging)은 유통기한을 연장하거나 포장된 식품의 상태를 유지 또는 개선하기 위하여 포장된 식품 혹은 식품을 둘러싼 환경으로 활성 물질(active compound)을 방출하거나 흡수하도록 하는 포장을 말한다. 그러므로 활성 포장은 포장재가 보관 및 보호 이상의 기능을 수행하여 상업적 응용 분야에서 큰 잠재력을 가진다. 또한 유통 기한, 안전성 및 포장 상품의 품질을 개선한다는 공통의 목표를 가지고 식품, 의약품 및 소비재 제품의 다양한 포장에 적용된다.

미생물 오염은 식품의 질감, 맛, 향 등 감각적 특성에 영향을 미쳐 세계적으로 막대한 식량 손실을 일으키며³⁾ 해로운 미생물(세균, 곰팡이 및 바이러스)이나 독소가 포함된 음식을 인체가 섭취하는 경우 위대한 식중독이 발생한다⁴⁾. 특히, 바이러스는 사람 간의 직접적인 전염 외에도 물, 공기, 음식 등 환경을 통한 이동으로 질병의 전파를 촉진시킨다⁵⁾. 지금까지 일반적으로 미생물에 의한 위해를 제어하고 제품의 저장성을 연장하는 방법으로 주로 화학적 처리에 기반하여 다양한 방부제 및 오염 제거법이 사용되어 왔다. 하지만 화학 방부제 및 처리제의 사용은 소독제 잔류물, 부산물 및 세포막의 산화 스트레스로 인해 인체에 해를 끼치고 세포 독성 효과를 유발할 수 있다는 보고가 있어 이를 대체할 방법이 필요한 실정이다⁶⁾. 한편, 2019년 말부터 시작된 COVID-19 팬데믹으로 전 세계적으로 전염병으로 인한 두려움이 증가하고 폐쇄 상황이 지속되었다. 이에 따라 식품의 온라인 배송이 증가하였고 일회용 플라스틱 포장 폐기물이 급격히 증가하였으며, 식품 및 포장을 통한 바이러스 감염의 확산이 증가하였음이 보고되었다⁷⁾. 이렇듯 건강과

*Corresponding Author: Yoonjee Chang
Department of Food and Nutrition, Kookmin University, Seoul, 02707, Republic of Korea
Tel: +82-910-4775, Fax: +82-910-5249
E-mail: ychang@kookmin.ac.kr

환경 지속 가능성에 대한 소비자의 우려가 증가함에 따라 기존의 식품 포장보다 상위 기능을 갖춘 활성 포장과 같은 식품 포장에 대한 소비자의 기대가 더욱 강해지고 있다⁸⁾.

포장 형태 중 필름과 코팅은 고유한 특성과 장점으로 인해 광범위하게 연구되었다. 필름 및 코팅 제제는 물리적 손상에 대한 보호가 가능하며, 대기 조성을 조절하고 가스, 증기 및 물에 대한 반투과성 장벽 역할을 한다. 또한 필름 및 코팅은 항균제 등과 같은 다양한 기능성 성분을 포함할 수 있다⁹⁾. 활성 포장의 형태 중 필름 제형은 접착되는 표면으로 방출되지 않음에도 불구하고 효과가 있기 때문에 육류, 수산물, 유제품, 채소, 빵 등 다양한 식품 포장에 성공적으로 적용될 수 있다¹⁰⁾. 이러한 포장은 보통 다당류, 단백질, 지질 등 세가지 종류의 생체고분자와 첨가제로서 유효화제, 가스제 또는 천연/합성 보존 성분을 포함한다¹¹⁾. 또한 미생물로 인하여 쉽게 토양으로 분해되는 식물성 생체고분자인¹²⁾ polylactic acid (PLA), polycaprolactone (PCL), polyhydroxybutyrate (PHB) 등과 같은 생분해성 물질이 식품 포장에 사용되며 주목받고 있다¹³⁾. 예를 들어 최근에는 식물의 대사산물인 에센셜 오일을 식품 필름이나 코팅에 포함시켜 항균성을 유지하거나¹⁴⁾ 미생물에 의해 쉽게 분해되는 천연고분자를 활용하여 석유 유래 플라스틱의 사용감소에 기여하는 활성 포장 방법이 사용되고 있다¹⁵⁾.

이러한 활성 포장 기술은 미래 식품산업에 중요한 자산으로 기존의 포장 기능을 뛰어넘는 혁신이라 할 수 있다²⁾. 따라서 본 총설에서는 최근 5년간 연구되는 항균, 항진균, 항바이러스 활성을 띠는 필름 및 코팅에 대한 연구 동향을 분석하고자 하였다.

재료 및 방법

1.1. 고분자 소재

고분자 소재는 유연성, 내구성, 경량성과 같은 고유 특성으로 인하여 다양한 응용 분야에 널리 사용된다. 식품의 저장 기간을 늘리기 위한 주요 전략으로 활성 포장 시스템은 석유 또는 바이오 기반의 고분자 용매에 향미생물 화합물을 혼합하여 제작한 필름 및 코팅 제제를 내세우고 있다. 석유 기반의 합성 고분자는 일반적으로 식품 응용 분야에서 플라스틱 포장재를 생산하는 데 사용하는 소재이다. 합성 고분자에는 polyethylene (PE), polypropylene (PP), polystyrene, polyvinyl chloride (PVC), 그리고 polyethylene terephthalate (PET) 등이 포함된다. 플라스틱 소재의 구조 및 특성을 결정하는 기본 요소에는 고분자의 분자 구조, 결정, 배열과 고분자 간의 결합력 등이 있으며¹⁶⁾, 결정된 고분자의 특성은 필름의 밀도, 필름을 통한 가스 및 증기의 투과성, 식품으로의 첨가제 확산 메커니즘 및 활성포장 시스템의 효율성에 영향을 미친다¹⁷⁾.

하지만 온라인 및 배달 서비스로 음식을 주문하는 소비자의 행동 변화에 의해 합성 고분자의 남용이 발생했다. 플라스틱의 생산에서 폐기 및 소각에 이르기까지 모든 단계에서 발생하는 합성 고분자 소재의 잔류물질은 전세계적인 환경 위기로 부각되고 있다¹⁸⁾. 따라서 친환경적 특성을 가지며 지속가능한 생산이 가능한 바이오 기반 고분자 소재의 개발이 최근 큰 주목을 받고 있다. 바이오 기반 고분자 소재는 다당류, 단백질, 지질 및 이들의 합성물에서 파생되며 심지어 미생물과 같은 재생 가능한 바이오매스에서 생산할 수 있다¹⁹⁾. 바이오 기반 폴리머 소재는 비분해성과 분해성 고분자 소재로 나뉜다. 비분해성 고분자 소재는 옥수수 전분, 사탕수수 및 식물성 기름과 같은 재생 자원에서 추출되며, 플라스틱과 유사한 특성을 지니며 기계적 성질이 우수하여 바이오 플라스틱으로도 알려져 있다. 비분해성 고분자 소재의 예시로는 bio-polyethylene (bio-PE), bio-polypropylene (bio-PP), bio-polyethylene-terephthalate (bio-PET), bio-polytrimethylene terephthalate (Bio-PTT) 및 bio-polyamide (bio-PA) 등이 있다²⁰⁾.

분해성 고분자 소재는 효소, 열 또는 빛과 같은 생물학적 또는 화학적 과정에 의해 천연 화합물로 분해된다. 분해성 고분자 소재는 물, 이산화탄소, 바이오매스로 분해되는 생분해성 고분자와 유기물과 부식질로 분해되는 퇴비화성 고분자, 즉 두가지 범주로 분류할 수 있다. 생분해성 고분자 소재의 예로는 전분, 셀룰로스, 알긴산, 카라기난, 곤약, 글루코만난 등의 다당류 소재가 있으며, 젤라틴, 아르헨티나 멀치 분리 단백질 및 유청 단백질 등의 단백질 소재, 그리고 에폭시화 식물성 오일(epoxidized vegetable oils), 피마자유 기반 폴리올(castor oil-based polyols) 등의 지질 소재가 포함된다. 또한 PLA, polyhydroxyalkanoates (PHA), PHB, polybutylene succinate (PBS) 등을 들 수 있다²¹⁾.

1.2. 항균 액티브 패키징의 연구 현황

항균 활성 포장은 식품 내 유해한 식중독 세균의 성장을 방지하여 식인성 질환의 위험을 줄일 수 있는 유망한 연구 개발 분야이다. 또한 오염으로 인한 식품의 품질 저하를 방지해 저장 수명을 연장할 수 있어 식품 공급의 안전과 품질을 크게 향상시킬 수 있는 잠재력이 있다고 평가되고 있다. 따라서 최근 다양한 항균 활성을 가진 물질들을 포장에 적용하여 기능적 특성을 향상시키고 미생물의 오염을 방지하는 다기능성 포장재의 연구가 활발히 진행되고 있다. 주로 정유, 추출물과 같은 유기 화합물, 무기 화합물, 바이오생물 소재 등이 다양하게 사용된다^{14,15,22)}.

유기 화합물은 다양한 추출원과 안전성으로 인해 전통적인 화학 약품의 대체제로 떠오르고 있다. 에스테르, 에폭사이드, 알데히드, 케톤, 아민 및 황화합물 등은 생물학적 항균 활성에 영향을 미친다고 알려져 있는 주요 화합물로, 세

Table 1. Antibacterial packaging film or coating materials

Classification	Antifungal agents	Polymer materials	Methods of preparation	Type of packaging	Observations	References	
Natural compound	Frankincense oil (FO) and chitosan biguanidine hydrochloride (CBg)	Carboxymethyl cellulose (CMC)	Solvent casting	Film	<ul style="list-style-type: none"> FO (5%) containing CMC/CBg system increased the antibacterial activities by 26.7%, 50.8%, and 36.9% against <i>S. pneumoniae</i>, <i>B. subtilis</i>, and <i>E. coli</i>. 	26)	
	Thyme essential oil (TEO)	Konjac glucomannan (KGM)	Solvent casting	Film	<ul style="list-style-type: none"> The inhibition zone of KGM-based films against <i>S. aureus</i>, <i>L. monocytogenes</i> was detected at the concentration of 0.8% TEO, and <i>E. coli</i> O157:H7 at the concentration of 1.2% TEO, at the concentration of 1.2% TEO. 	23)	
	Orange essential oil (OEO) and silver nanoparticles (AgNPs)	Cellulose nanofibers	Deacetylation	Nanofiber	<ul style="list-style-type: none"> The combination effect of OEO and AgNPs showed a halo zone of 9.8 ± 1.7 mm against <i>E. coli</i>. 	27)	
	Zinc oxide nanoparticles (ZnONPs) and fennel essential oil (FEO)	Potato starch	Solvent casting	Film	<ul style="list-style-type: none"> In the disc diffusion test, the highest antibacterial activities against <i>S. aureus</i> (146.15 mm^2), <i>E. coli</i> (124.37 mm^2), and <i>A. flavus</i> (104.88 mm^2) were obtained for films with the 5% ZnONPs and 3% FEO. 	28)	
	Pineapple peel extract (PPE) and aloe vera gel (AVG)	Chitosan (C), gelatin (G), and starch (S)	Solvent casting	Film	<ul style="list-style-type: none"> In the disc diffusion test, The C/G/S film mixed with 30% PPE and 30% AVG showed inhibition zones of 13.10 mm and 13.90 mm for <i>S. aureus</i>. The mixture of 30% PPE and 30% AVG with C/G/S film showed an 11.3% and 9% increased inhibition zone compared to pure film against <i>E. coli</i>. 	57)	
	Grapefruit seed extract (GSE) and nanoparticle	Alginate	Coating solution	Coating	<ul style="list-style-type: none"> The 1% alginate + 1% GSE coating and its nanoparticle inhibited the growth of <i>S. Typhimurium in vitro</i> (0.9-log CFU/g and 1.4-log CFU/g reduction, respectively) and delayed the growth of <i>S. Typhimurium</i> on cherry tomatoes up to 8 days of storage. 1% alginate + 1% GSE coating delayed the growth of <i>S. Typhimurium</i> on cherry tomatoes up to 8 days of storage. 	24)	
	Longan (<i>Dimocarpus longan</i>) peel extract	Rice straw paper (RSP)	Coating	Film	<ul style="list-style-type: none"> The coated RSPs with longan peel extract showed antibacterial activities against Gram-positive bacteria <i>S. aureus</i> and <i>B. cereus</i>. 	25)	
	Silver nanoparticles (AgNPs)	CMC and cellulose nanocrystals (CNC)	Coating	Film	<ul style="list-style-type: none"> Films containing 7% AgNPs showed growth inhibition against <i>E. coli</i> and <i>S. aureus</i> (inhibition zones of 5.50 ± 0.41 mm and 6.10 ± 0.50 mm). The 7% AgNPs-coated paper can extend the shelf-life of strawberries to 7 days under ambient conditions. 	29)	
	Inorganic compounds	Gold nanoparticles (AuNPs), graphene oxide (GO), and glutaraldehyde (GA)	Polyvinyl alcohol (PVA)	Solvent casting	Film	<ul style="list-style-type: none"> A film containing GA and AuNPs in PVA (PVA-Glyoxal-AuNPs) formed an inhibition zone of 13 mm against <i>E. coli</i>. PVA-Glyoxal-AuNPs minimized the formation of black spots for up to 5 days and provided the best preservation for bananas. 	30)
		GSE and zinc oxide nanoparticles (ZnONPs)	CMC	Solvent casting	Film	<ul style="list-style-type: none"> The strongest antibacterial activity was shown by the films containing 3% ZnONPs and GSE. 	58)
Sulfur nanoparticles (SNPs)		Alginate	Solvent casting	Film	<ul style="list-style-type: none"> <i>L. monocytogenes</i> colonies exposed to alginate films containing 3% SNPs showed complete removal after 12 h, and <i>E. coli</i> showed a 7-log CFU reduction on the same films. 	31)	
Titanium dioxide (TiO ₂) and Cu-doped TiO ₂ (Cu-TiO ₂)		CMC	Solvent casting	Film	<ul style="list-style-type: none"> <i>L. monocytogenes</i> and <i>E. coli</i> showed 6- and 4-log CFU/mL reduction, respectively, by treating the Cu-TiO₂-loaded CMC film. 	22)	
Biologic compounds	Bacteriophage T4	Polycaprolactone (PCL)	Spread	Film	<ul style="list-style-type: none"> PCL films chemically functionalized with bacteriophage T4 showed a 2.44-log reduction in bacterial population after 120 h. The chemically functionalized film of T4 significantly reduced the number of bacteria in raw meat after 120 h of storage. 	15)	
	Bacteriophage PBSE191	PVA	Solvent casting	Film	<ul style="list-style-type: none"> The PVA film loaded with bacteriophage PBSE191 showed an immediate bactericidal effect within 30 min, and the released phage lysed <i>S. Enteritidis</i> for 4 h. 	33)	

균 및 진균의 세포막에 작용해 쉽게 파괴될 수 있도록 유도하며 특히 원형질막의 파괴를 유도하고 미토콘드리아의 기능을 불활성화시키는 것으로 밝혀졌다¹⁴⁾. Liu와 Lin²³⁾에서 백리향 정유를 혼입하여 개발된 정유 0.8% 필름은 *Staphylococcus aureus*와 *Listeria monocytogenes*에 대하여 제어능을 보였으며 1.2% 혼입 필름은 *Escherichia coli*에 대한 억제 능력을 보이는 것으로 보고되었다. 또한 포도씨 추출물을 첨가한 Baek과 Lee²⁴⁾의 연구에서는 *Salmonella* Typhimurium에 대하여 0.9-log CFU 감소능을 보였으며 새우에서의 위해균 생장을 8일까지 지연시켜 저장성 연장 효과를 보였다. 그러나 Chollakup과 Kongtud²⁵⁾에서는 벗짚 종이로 로딩된 용안껍질 추출물이 그람 양성균에서는 강한 항균 활성을 보였으나 그람 음성균에서는 효과가 나타나지 않았다. 이러한 차이는 그람 음성균과 그람 양성균 세포막의 인지질 이중층 구조에서 기인한 것이며, 유기물에 대하여 공통적으로 관찰되었다. 따라서 유기 화합물의 항균 효과를 증진시키고 감각적 특성을 감소시켜 실제 산업에 적용하기 용이한 포장재 개발을 위해 여러가지 항균물질과의 혼용이 활발히 진행되고 있다^{24,26-28)}.

TiO₂, ZnO, AgNPs를 포함하는 무기 화합물은 가혹한 가공 조건에 저항성을 보이며, 식중독 병원균에 강력한 살균 효과를 보인다. 따라서 무기 화합물의 효과적인 항균 활성에 대해 광범위하게 논의가 이루어지고 있다. He와 Li²⁹⁾의 연구에서는 silver nanoparticle 필름이 *E. coli* 및 *S. aureus*에 대한 높은 항균 활성을 나타냈으며 딸기에 적용하여 약 7일의 유통기한을 연장하였다. Gold nanoparticle을 포함한 필름의 항균활성에 대하여 보고한 Chowdhury와 Teoh³⁰⁾의 연구에서는 *E. coli*의 사멸을 유도하는 기작을 밝혔으며 최대 5일까지 바나나의 보존 기한을 연장하였다. 또한 Priyadarshi와 Kim³¹⁾의 연구에서는 sulfur nanoparticle을 알긴산에 첨가한 필름이 *E. coli*와 *L. monocytogenes*에 대해 강한 항균 활성을 보였으며, 동일한 병원균에 대해 Ezati와 Riahi²²⁾의 연구에서는 금속 산화 무기물인 TiO₂와 Cu가 합성된 TiO₂이 강한 억제능을 보이는 것으로 보고되었다. 따라서 무기 화합물은 잠재력 있는 항균물로 평가되고 있으며 활성 포장에 다양하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

박테리오파지(파지)는 식인성 병원균을 제거하기 위한 환경 친화적인 생물 제제이다. 바이러스로 분류되며 숙주로 삼는 균을 특이적으로 감염시키므로 식품 산업의 유망한 생물학적 방제제로 주목받고 있다. 따라서 최근 파지를 폴리머에 고정하여 식품 포장재로 활용하려는 시도가 이어지고 있다. Choi와 Yoo³²⁾의 연구에 따르면 *E. coli*를 숙주로 삼는 파지 T4를 PCL 필름에 적용하여 120시간 후 PCL 단일 필름보다 2.44-log CFU의 감소를 보였으며, 생고기 포장 시 효과적으로 균을 제어하며 항균활성을 입증하였다.

Kim과 Chang³³⁾의 연구에서는 새롭게 분리된 *Salmonella* 파지 PBSE191을 PVA 필름에 적용하여 30분 이내에 살균 효과를 나타낸다고 보고하였으며, 달걀 껍질에 적용하여 24시간 후 약 2-log CFU의 감소를 관찰하였다.

이처럼 항균 활성 포장재의 개발을 위한 연구는 다양한 물질들을 기반으로 이루어지고 있다. 그러나 연구실 단위의 포장 시스템과 실제 산업의 포장 시스템 사이에는 여전히 격차가 존재한다. 따라서 이러한 간극을 줄이기 위해 지속적인 개발뿐만 아니라 법제화, 상용화 등 다양한 분야에서 추가적인 노력을 기울여야 본격적인 상용화가 이루어질 수 있을 것이다.

1.3. 항진균 액티브 패키징의 연구 현황

효모 및 곰팡이로 인한 식품 부패는 과일, 채소, 곡물 및 가공품 등 다양한 식품 산업에서 큰 경제적 손실을 초래한다. 또한 일부 진균류(*Fusarium*, *Penicillium*, *Aspergillus*, *Alternaria*)들은 마이코톡신(Mycotoxin)이라 불리는 2차 대사산물을 생성할 수 있으며, 이는 식품 품질의 저하, 관능적(맛, 질감) 손실, 잠재적인 건강상의 위험을 초래할 수 있다³⁴⁾. 이를 제어하기 위한 항진균 활성 포장은 식품의 저장 및 운송 과정에서 진균류의 성장을 방지할 수 있는 유망한 기술로서 그 적용 방안에 대한 관심이 증가하는 추세이다.

항진균 활성 포장은 주로 포장에 사용되는 고분자 매트릭스에 항진균 소재를 통합하여 식품에 접촉시키는 방식으로, 이는 진균의 성장을 지속적으로 억제하여 식품의 저장 수명을 연장하는데 유용하다³⁵⁾. 활성 포장에 이용되는 대표적인 항진균 소재는 크게 천연 화합물, 합성 유기계 화합물, 비유기계(무기계) 화합물로 분류할 수 있으며, 이와 같이 다양한 소재를 통합하여 개발된 항진균 활성 포장에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다³⁶⁾.

특히, 식품 및 식품 포장에 화학 소재를 대체하여 천연 소재를 이용하는 것에 대한 관심이 최근 몇 년 동안 증가하고 있다. 이와 관련하여 정유(essential oil, EO)와 같은 식물 유래 물질 및 천연 추출물 등이 안전한 소재로 인정받고 있으며, 특히 정유를 구성하는 테르펜테르페노이드 성분은 포자 형성 및 발아를 효과적으로 제어하여 진균 억제를 위한 유망한 천연 소재로서 연구되고 있다¹⁴⁾. Chein와 Sadiq³⁷⁾이 수행한 연구는 시나몬 정유(cinnamon EO)를 함유한 키토산(chitosan) 코팅이 *Aspergillus flavus* 및 *Penicillium citrinum*에 대해 각 9.8%와 13.4%의 감염 억제능을 보임을 확인하였다. 또 다른 연구는 오레가노 정유(oregano EO)를 함유하는 셀룰로오스 아세테이트(cellulose acetate) 필름이 사상균(filamentous fungi)의 증식을 억제하여 햄버거 빵의 유통기한을 12일에서 27일까지 연장하였다고 보고하였다³⁸⁾. 또한, 오레가노 및 타임(thyme) 정유에서 유래된 주요 성분의 일종인 티몰(thymol)은 광범위한 진균류에 대한

Table 2. Antifungal packaging film or coating materials

Classification	Antifungal agents	Polymer materials	Methods of preparation	Type of packaging	Observations	References
Natural compound	Cinnamon EO	Chitosan	Solvent casting	Film/coating	<ul style="list-style-type: none"> The coating with 4% cinnamon EO effectively controlled the <i>A. flavus</i> and <i>P. citrinum</i> contamination to 9.8% and 13.4%, respectively, in artificially inoculated peanut kernels for 14 days. 	37)
	Oregano EO	Cellulose acetate	Solvent casting	Film	<ul style="list-style-type: none"> The film-containing 0.5% oregano EO extended the shelf life of hamburger buns from 12 to 27 days by suppressing the growth of filamentous fungi. 	60)
	Thymol	PLA/PBSA	Extrusion	Film	<ul style="list-style-type: none"> The films containing 6 % thymol exhibited significant fungal growth inhibition against <i>Aspergillus</i> spp. (61.7–80.45% reduction) and <i>Penicillium</i> spp. (55.9–74.1% reduction) at 25°C for 7 days. 	40)
	<i>Trans</i> -cinnamaldehyde	PLA and PBAT blends	Extrusion	Film	<ul style="list-style-type: none"> Films containing <i>trans</i>-cinnamaldehyde effectively suppressed fungal growth in bread, giving non-detected microorganisms as compared to conventional PP film (4.0 log CFU g⁻¹). 	61)
	Neem oil nanoemulsion	High-methoxyl pectin	Solvent casting	Film/coating	<ul style="list-style-type: none"> Neem oil nanoemulsion/pectin bionanocomposite film showed anti-fungal properties against storage fungi (<i>Aspergillus flavus</i> and <i>Penicillium citrinum</i>) in seeds. 	62)
	Sodium benzoate (SB) and potassium sorbate (PS)	PBAT and thermoplastic starch blends (TPS)	Blown-extrusion	Film	<ul style="list-style-type: none"> Films containing sodium benzoate and potassium sorbate effectively inhibited the growth of <i>Aspergillus niger</i> and <i>Rhizopus</i> sp. with reduced total viable count and yeast/mold account in fresh noodles. 	44)
	Potassium sorbate	CMC and candelilla wax blend	Dipping	Coating	<ul style="list-style-type: none"> Potassium sorbate-loaded coating was effective against <i>Botrytis cinerea</i> and <i>Monilia fructigena</i>. The coating solution significantly delayed softening of apricots 	43)
Synthetic organic compounds	Sorbic acid	PP	Extrusion	Film	<ul style="list-style-type: none"> The sorbic acid-containing film showed effective inhibitory activity against <i>Aspergillus niger</i>. 	63)
	Sorbic acid (SA) and benzoic acid (BA)	Argentine anchovy protein isolate	Solvent casting	Film	<ul style="list-style-type: none"> Films containing 1.5% of sorbic acid or benzoic acid exhibited inhibitory activity against <i>A. flavus</i> of 5.55 and 8.22 mm, respectively, compared to the control group. 	64)
	CuO nanoparticle (CuONPs)	Polyurethane	Solvent casting	Film/coating	<ul style="list-style-type: none"> The film containing CuONPs (1%, 2%, and 5%) formed an inhibition zone against <i>penicillium</i>, and the zone expanded by increasing the concentration of nanoparticles up to 2%. 	65)
	CuO, ZnO, and CuO/ZnO nanoparticle blends	PVA/starch/glycerol	Solvent casting	Film	<ul style="list-style-type: none"> Strawberries wrapped in films containing nanoparticles inhibited fungi generation and maintained freshness longer than fruits wrapped in pure PVA/starch/glycerol film after 7 days of storage at 25°C. 	46)
	ZnO/chitin nanoparticle blends	Bovine gelatin-based nanocomposite, emulsion, and PE	Solvent casting	Film	<ul style="list-style-type: none"> The cakes packed in gelatin-based films with ZnO/chitin nanoparticles exhibited less fungal growth than cakes packed in commercial PE film after 7, 14, 21, and 28 days. 	47)
	TiO ₂ nanoparticle (TiO ₂ NPs)	k-carrageenan/konjac glucomannan	Solvent casting	Film	<ul style="list-style-type: none"> The film containing 7% TiO₂NPs exhibited effective photocatalytic anti-fungal activity (79%) for <i>Penicillium viridicatum</i> after irradiating 6 h through generating reactive oxygen species thus destroying the fungi. 	66)
	Silver nanoparticles (AgNPs)	Hydroxypropyl methylcellulose (HPMC)	Solvent casting	Film/Coating	<ul style="list-style-type: none"> HPMC coating with 0.25% AgNPs reduced the incidence and severity of <i>Colletotrichum gloeosporioides</i> and decreased the weight loss of papayas during storage. 	67)
Inorganic compounds						

효과적인 제어 능력을 나타내며³⁹⁾, 이전 연구결과에 따르면 티몰을 함유한 PLA/PBSA 필름은 *Aspergillus spp.* 및 *Penicillium spp.*에 대해 강력한 억제 능력을 보였다고 보고하였다⁴⁰⁾.

다음으로 합성 유기계 화합물로서 무기산(염) 및 유기산(염) 등이 이용되고 있다. 특히 유기산(염)의 일종인 락트산, 아세트산, 소르빈산(칼륨), 및 안식향산(나트륨) 등은 미국 FDA에서 지정한 안전한(GRAS) 식품 보존제이며 이의 효과적인 항진균 활성은 식품 접촉형 액티브 패키징 소재로서 적합하다 여겨지고 있다^{41, 42)}. Kowalczyk와 Kordowska-Wiater⁴³⁾ 연구에 따르면, 소르빈산칼륨(potassium sorbate)이 포함된 카복시메틸 셀룰로오스(carboxymethyl cellulose)와 칸델라 왁스(candelilla wax) 기반의 복합 코팅 용액은 *Botrytis cinerea* 및 *Monilia fructigena*에 대한 강력한 항진균 효능을 보이며 보관 중 살구의 연화를 지연하였다. 더불어 소르브산칼륨(potassium sorbate)과 안식향산나트륨(sodium benzoate)을 함께 함유한 PBAT/TPS 필름은 *A. niger*에 의한 포자 형성 및 균사체 성장을 억제하였으며, 포장된 생면의 총 효모/곰팡이 수를 유의미하게 감소시켰다⁴⁴⁾.

또한 무기 화합물로서 금속(metal), 나노입자(nanoparticle) 등이 사용되고 있다. 나노 입자는 곰팡이와 접촉 시 영양 수송 채널을 통해 막 지질 이중층으로 확산된 후 세포 과정을 유도하여 곰팡이를 신속하게 사멸하기 위한 소재로서 연구되고 있다⁴⁵⁾. 그 예시로, 산화구리(CuO) 및 산화아연(ZnO)의 단일, 복합 나노입자를 함유한 필름으로 포장된 딸기는 억제된 곰팡이 생성을 보이며 순수 필름으로 포장된 과일보다 신선도를 오래 유지했다⁴⁶⁾. 이와 유사하게, 산화아연과 키틴(chitin) 복합 나노입자를 포함하는 젤라틴(gelatin) 기반 필름으로 포장된 케이크는 상업적 PE 필름에 포장된 케이크보다 진균 성장이 제어된 것으로 나타났다⁴⁷⁾.

이와 같이 다양한 항진균 소재를 함유한 활성 포장은 곰팡이 오염을 방지하고 식품의 유통기한을 연장할 수 있는 혁신적인 해결책이다. 이는 식품 산업에 광범위하게 적용될 수 있으며, 식품 안전성 향상에 기여하는 동시에 식품 폐기물로 인한 경제적 손실을 최소화할 수 있다. 이러한 기대를 바탕으로 최근 몇 년간 해당 분야에 대한 활발한 연구가 이루어졌으나, 항진균 활성 포장재의 기능성 유지 및 사용의 최적화를 위해서는 추가적인 검토가 필요하다.

1.4. 항바이러스 액티브 패키징의 연구 현황

2019년 말 발생한 COVID-19 팬데믹은 약 6억 77만 명의 감염자와 680만 명의 사망자를 기록하며 전 세계에 막대한 경제적 손실 및 파급효과를 일으켰다⁷⁾. 이후, 수억 명의 사람들을 감염시킬 수 있는 바이러스에 대한 우려가 커지며 바이러스 질병에 대한 관심도 또한 증가하고 있다. SARS-CoV-2 외에도 Human influenza, enteric viruses (e.g.

hepatitis A, rotavirus) 및 norovirus 등 다양한 바이러스는 번식하기 위해 살아있는 숙주 세포 내에 침투하여 유전물질을 방출한다⁵⁾. 이러한 바이러스의 성장, 확산을 제어할 수 있는 활성 포장 기술의 필요성이 대두되며 최근 연구의 수가 증가하고 있다.

식품 적용을 위한 항바이러스 활성 포장은 식품 표면의 교차 오염을 방지하거나 식중독 바이러스를 비활성화하여 식품 안전을 개선하는 것을 목표로 한다¹⁾. 항바이러스 활성 포장 시스템에는 다양한 화합물이 사용되는데, 화합물은 크게 비유기계 화합물과 유기계 화합물로 분류할 수 있다. 비유기계 화합물은 금속, 금속 산화물 및 나노 입자 등을 포함하며, 특히 비유기계 물질의 항바이러스 작용 기전 연구가 최근 활발하게 진행 중이다. Gurunathan과 Qasim⁴⁸⁾이 수행한 연구는 바이러스 표면의 당단백질에 결합하여 숙주 세포와의 흡착 및 상호작용을 차단하고 reactive oxygen species (ROS)를 발생시켜 바이러스를 비활성화하는 나노 입자의 항바이러스 작용기전을 밝혔다. Melk와 El-Hawary⁴⁹⁾가 수행한 또 다른 연구에서는 산화아연 나노 입자가 virus와 숙주 세포 간의 상호작용을 차단하는 사실을 알아냈다. 그리고 숙주세포에서 Zn²⁺ 이온을 방출해 다양한 RNA 바이러스의 복제를 방해함으로써 항바이러스 활성을 발휘한다는 사실을 밝혔다. 그 외에도 금속 혹은 금속 산화물로 박막 코팅하였을 때의 항바이러스 효과에 관한 논문을 다수 확인할 수 있었다^{50, 51)}.

다음으로 유기계 화합물은 주로 자연에서 유래된 정유(essential oil)와 식물 추출물 등을 포함한다. Alginate, lipid, 녹차추출물 및 포도씨 추출물 기반의 식용 필름은 murine norovirus (MNV)와 hepatitis A virus (HAV)에 대한 항바이러스 활성이 관찰되었다⁵²⁾. MNV와 HAV에 alginate 1 g당 0.75 g의 추출물이 함유된 필름을 노출했을 때 약 2 log의 바이러스 활성 감소를 확인할 수 있었으며, 녹차추출물을 첨가했을 때에는 포도씨 추출물을 첨가했을 때보다 효능이 우수한 것으로 확인되었다. 또 다른 연구에서는 페르시아 검(persian gum), 젤라틴, 알릴 이소티오시아네이트(AITC) 기반의 식용 필름이 MNV에 효과적이라는 사실을 검증하였으며, 냉장 조건이 필름에 첨가된 allyl isothiocyanate 항바이러스 활성의 최적화 조건임을 밝혀냈다. 2018년 이후로 식품에 적용할 수 있는 총 6개의 항바이러스 활성 식용 필름 혹은 코팅이 조사되었으며, 전체 논문 중 5개(약 83.3%)의 논문이 식물, 채소, 차, 과일 등에서 발견되는 페놀 화합물을 첨가한 것으로 파악되었다⁵³⁾. 페놀 화합물의 항바이러스 메커니즘은 바이러스 구조를 파괴하고, 바이러스 효소를 억제하여 바이러스 복제를 방해하며, 사이토카인 생성을 유도하는 능력을 포함한다^{54,55)}. 해당 필름 및 코팅은 바이러스의 전파 가능성을 감화하고 식품 안전성 및 품질을 향상하는 데 유용하다. 이 외에도 표면 개질 공정, 화

Table 3. Antiviral packaging film or coating materials

Classification	Antifungal agents	Polymer materials	Methods of preparation	Type of packaging	Observations	References
Organic compound	GTE, GSE	Alginate acid sodium salt/lipids blends	Solvent casting	Film	<ul style="list-style-type: none"> <i>In vitro</i> test, the alginate composite films containing 50 and 75% (w/w) GTE showed significant virus growth inhibition against murine norovirus (MNV) (2.00 and 1.92 log TCID₅₀/mL reduction, respectively) and Hepatitis A virus (HAV) (1.25 and 1.92 log TCID₅₀/mL reduction, respectively) at 37°C. At 37°C, alginate composite films containing 50 and 75% (w/w) GSE inhibited MNV (0.96 and 1.67 log TCID₅₀/mL reduction, respectively) and HAV (1.38 and 1.5 log TCID₅₀/mL reduction, respectively). 	52)
	GTE, GSE	Alginate/oleic acid blends	Solvent casting	Film/Coating	<ul style="list-style-type: none"> During the 4-day storage period at 10°C compared to the controls, the infectivity of the MNV and HAV in fresh strawberries after coating was reduced by about 1.5–2 log, and complete inactivation of both viruses were found following overnight storage at 25°C. 	68)
	GSE	Chitosan	Solvent casting	Film	<ul style="list-style-type: none"> In water, the chitosan films containing 2.5 and 5.0% GSE show that samples produced MNV-1 titer reductions of 2.68 and 4.00 log PFU/ml, respectively. 	69)
	Mixtures of rosemary, raspberry, and pomegranate CO ₂ extracts	Low-density polyethylene (LDPE)	Extrusion	Film	<ul style="list-style-type: none"> In the influence of Φ6 particles on the <i>P. syringae</i> growth test, the LDPE active film with an active mixture of extracts was observed to be significant reduction after incubation for 12 h. 	70)
	GTE	κ-, ι- and λ-carrageenans	None	Coating	<ul style="list-style-type: none"> The infectivity of MNV in fresh blueberries after coating at 25°C was decreased below the detection limit for κ- and ι-carrageenan films involving GTE and by approximately 3.54 log for λ-carrageenan coatings containing GTE. When blueberries were stored at 10°C, the remarkable potential was demonstrated, with reductions of 2.38 and 3.13 log obtained after 4 days of storage, respectively, while MNV infectivity was below the detection limit for raspberries coated with λ-carrageenan coatings with GTE. 	66)
	Allyl isothiocyanate (AITC)	Persian gum/gelatin blends	Spread	Film/Coating	<ul style="list-style-type: none"> MNV titers were reduced by 3.25 log TCID₅₀/mL and 3.00 log TCID₅₀/mL for 0.1% and 0.5% AITC, respectively, after overnight incubation at 37°C. 	71)

학 코팅, 펄스 전장 등과 같은 포장재의 물리 장벽 특성을 증가시키는 기술도 연구되고 있는 것으로 조사되었다⁵⁶⁾.

바이러스의 전파를 제어하기 위한 안전 장벽으로서 활성 포장 기술은 근 5년간 상당한 주목을 받으며 성장하고 있다. 현재 항바이러스 활성물질에 대한 연구는 활발하게 진행되고 있으나 현재까지 대다수의 연구는 활성 물질의 항바이러스 특성을 파악하는 데 집중되어 있으므로 항바이러스 활성을 띠는 필름 또는 식품 코팅 방안에 대한 심도 있는 연구는 부족한 실정이다. 그러므로 운송 저장 및 시장에서 식품을 보호할 수 있는 보다 효과적이고 내구성 있는 항바이러스 활성 포장 시스템을 개발하기 위한 추가 연구가 필요하다. 더불어 실험실 내에서의 항바이러스 활성은 관찰된 바 있으나, 실제 식품까지 적용한 예가 드물다. 따라서 항바이러스 활성 포장의 실제 식품 적용 연구를 차후 수행한다면 식품 산업에 큰 반향을 일으킬 것이라 사료된다.

요 약

본 연구는 식품의 저장 수명을 연장하기 위하여 식품 포장재로 활용되는 향미생물 활성 액티브 패키징의 최신 연구 동향을 파악하기 위하여 수행되었다. 특히, 최근 5년간 발표된 향미생물 활성 필름 및 코팅 연구를 분석하였으며, 연구에서 활용한 고분자 소재와 향미생물 소재를 정리하였다. COVID-19 대유행으로 인한 플라스틱 오염 문제가 격화되면서 식품 포장재의 고분자 소재로는 바이오 기반의 분해성 소재가 주목받고 있으며, 분해성 소재에 향미생물 화합물을 혼합하여 기능적 특성을 부가한 액티브 필름 및 코팅 제제에 관한 연구가 활발하게 수행되었다. 항균 액티브 패키징 개발에 주요하게 활용된 소재는 정유, 추출물 등의 유기 화합물, TiO₂, ZnO, AgNPs 등의 무기 화합물과 박테리오파지 및 엔도라인 등의 생물 소재로 관찰되었다. 또한 주요하게 사용된 항진균 소재는 정유 등의 천연 화합물, 무기산(염) 및 유기산(염)을 포함하는 합성 유기계 화합물과 금속 및 나노입자 등의 무기화합물로 분류되었다. 한편, 항바이러스 소재로는 GTE, GSE 및 AITC 등의 유기 화합물 관련 연구만이 주로 관찰되었다. 동향 분석 결과, 항균 및 항진균 액티브 패키징의 효능 평가는 활발하게 수행되어 왔으나, 이들의 물리 화학적 특성 개선 연구가 미흡하여 산업화로 이어지는 것에 한계가 있어, 이에 대한 추가 연구가 필요하다고 판단된다. 또한 분해성 항바이러스 액티브 패키징에 대한 산업체에서의 수요가 증가할 것으로 예상되므로, 항바이러스 소재 발굴 및 패키징 적용을 위한 활발한 노력이 요구된다.

감사의 글

이 성과는 2023년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로

로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No. 2021R1F1A1058773). 또한, 본 연구는 2022년도 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원(KEITI)의 지원을 받아 수행한 과제입니다.

참고문헌

- Yildirim, S., Röcker, B., Pettersen, M.K., Nilsen-Nygaard, J., Ayhan, Z., Rutkaite, R., Radusin, T., Suminska, P., Marcos, B., Coma, V. 2018. Active packaging applications for food. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* 17(1): 165-199.
- Bastarrachea, L.J., Wong, D.E., Roman, M.J., Lin, Z., Goddard, J.M. 2015. Active packaging coatings. *Coatings*, 5(4): 771-791.
- Mahmud, J., Sarmast, E., Shankar, S., Lacroix, M. 2022. Advantages of nanotechnology developments in active food packaging. *Food Res. Int.* 154: 111023.
- Hue, V.T., Long, N.M. Linh, T.T. Anh, D.N., Khanh, H.N. Thuy, M.N.T. Dinh, T.C. 2022. Food poisoning: A case study in Vietnam. *Case Stud. Chem. Environ. Eng.* 7: 100295.
- Wang, W., Kang, S., Zhou, W., Vikesland, P.J. 2023. Environmental routes of virus transmission and the application of nanomaterial-based sensors for virus detection. *Environ. Sci.: Nano* 10, 393.
- Xue, W., Macleod, J., Blaxland, J.. 2023. The use of ozone technology to control microorganism growth, enhance food safety and extend shelf life: A promising food decontamination technology, *Foods* 12(4): 814.
- Priyadarshi, R., Purohit, S.D., Roy, S., Ghosh, T., Rhim, J.W., Han, S.S. 2022. Antiviral biodegradable food packaging and edible coating materials in the COVID-19 era: A mini-review. *Coatings*, 12(5): 577.
- Weligama Thuppahige, V.T., Moghaddam, L., Welsh, Z.G., Karim, A. 2023. Investigation of morphological, chemical, and thermal properties of biodegradable food packaging films synthesised by direct utilisation of cassava (*monihot esculanta*) bagasse. *Polymers*, 15(3): 767.
- Guimaraes, A., Abrunhosa, L., Pastrana, L.M., Cerqueira, M.A. 2018. Edible films and coatings as carriers of living microorganisms: A new strategy towards biopreservation and healthier foods. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* 17(3): 594-614.
- John, A., Črešnar, K.P., Bikiaris, D.N., Zemljič, L.F. 2023. Colloidal solutions as advanced coatings for active packaging development: Focus on PLA systems. *Polymers*, 15(2): 273.
- Jakubowska, E., Gierszewska, M., Szydłowska-Czeraniak, A., Nowaczyk, J., Olewnik-Kruszkowska, E. 2023. Development and characterization of active packaging films based on chitosan, plasticizer, and quercetin for repassed oil storage. *Food Chem.* 399:133934.
- Wei, X., Guo, G., Gong, C., Gou, M., Qian, Z.Y. 2011. Biodegradable polymers: research and applications. In: *A handbook of applied biopolymer technology: synthesis,*

- degradation and applications. Ed. Sharma, S.K. and Mudhoo, A. UK: The Royal Society of Chemistry, pp. 365-387.
13. Pawar, P.P., Purwar, A.H. 2013. Biodegradable polymers in food packaging. *Am. J. Eng. Res.* 2(5): 151-164.
 14. Mutlu-Ingok, A., Devecioglu, D., Dikmetas, D.N., Karbancioglu-Guler, F., Capanoglu, E. 2020. Antibacterial, antifungal, antimycotoxigenic, and antioxidant activities of essential oils: An updated review. *Molecules*, 25(20): 4711.
 15. Choi, I., Chang, Y., Kim, S.Y., Han, J. 2021. Polycaprolactone film functionalized with bacteriophage T4 promotes antibacterial activity of food packaging toward *Escherichia coli*. *Food Chem.* 346: 128883.
 16. Bhat G, Kandagor V. 2014. Synthetic polymer fibers and their processing requirements. In *Advances in Filament Yarn Spinning of Textiles and Polymers*, Woodhead Publishing, pp. 3-30.
 17. Muriel-Galet, V., Cran, M.J., Bigger, S.W., Hernández-Muñoz, P., Gavara, R. 2015. Antioxidant and antimicrobial properties of ethylene vinyl alcohol copolymer films based on the release of oregano essential oil and green tea extract components. *J. Food Eng.* 149: 9-16.
 18. Scalenghe, R. 2018. Resource or waste? A perspective of plastics degradation in soil with a focus on end-of-life options. *Heliyon*, 4(12): e00941.
 19. Bioplastics, E. 2019. *Bioplastics Market Development Update 2019*. European Bioplastics, Berlin, Germany, pp. 3-30.
 20. Rahman, M.H., Bhoi, P.R. 2021. An overview of non-biodegradable bioplastics. *J. Cleaner Prod.* 294: 126218.
 21. RameshKumar, S., Shaiju, P., O'Connor, K.E. 2020. Bio-based and biodegradable polymers-State-of-the-art, challenges and emerging trends. *Curr. Opin. Green and Sustainable Chem.* 21: 75-81.
 22. Ezati, P., Riahi, Z., Rhim, J.W. 2022. CMC-based functional film incorporated with copper-doped TiO₂ to prevent banana browning. *Food Hydrocolloids*, 122: 107104.
 23. Liu, Z., Lin, D., Shen, R., Zhang, R., Liu, L., Yang, X. 2021. Konjac glucomannan-based edible films loaded with thyme essential oil: Physical properties and antioxidant-antibacterial activities. *Food Packag. Shelf Life*, 29: 100700.
 24. Baek, J.H., Lee, S.Y., Oh, S.W. 2021. Enhancing safety and quality of shrimp by nanoparticles of sodium alginate-based edible coating containing grapefruit seed extract. *Int. J. Biol. Macromol.* 189: 84-90.
 25. Chollakup, R., Kongtud, W., Sukatta, U., Premchookiat, M., Piriyaatits, K., Nimitkeatkai, H., Jarerat, A. 2021. Eco-friendly rice straw paper coated with longan (*dimocarpus longan*) peel extract as bio-based and antibacterial packaging. *Polymers*, 13(18): 3096.
 26. Salama, H.E., Abdel Aziz, M.S., Sabaa, M.W. 2019. Development of antibacterial carboxymethyl cellulose/chitosan biguanidine hydrochloride edible films activated with frankincense essential oil. *Int. J. Biol. Macromol.* 139: 1162-1167.
 27. Phan, D.N., Khan, M.Q., Nguyen, V.C., Vu-Manh, H., Dao, A.T., Thanh Thao, P., Nguyen, N.M., Le, V.T., Ullah, A., Khatri, M., Kim, I.S. 2022. Investigation of mechanical, chemical, and antibacterial properties of electrospun cellulose-based scaffolds containing orange essential oil and silver nanoparticles. *Polymers*. 14(1): 85.
 28. Babapour, H., Jalali, H., Mohammadi Nafchi, A. 2021. The synergistic effects of zinc oxide nanoparticles and fennel essential oil on physicochemical, mechanical, and antibacterial properties of potato starch films. *Food Sci. Nutr.* 9(7): 3893-3905.
 29. He, Y., Li, H., Fei, X., Peng, L. 2021. Carboxymethyl cellulose/cellulose nanocrystals immobilized silver nanoparticles as an effective coating to improve barrier and antibacterial properties of paper for food packaging applications. *Carbohydr. Polym.* 252: 117156.
 30. Chowdhury, S., Teoh, Y.L., Ong, K.M., Rafflismann Zaidi, N.S., Mah, S.K. 2020. Poly(vinyl) alcohol crosslinked composite packaging film containing gold nanoparticles on shelf life extension of banana. *Food Packag. Shelf Life*. 24: 100463.
 31. Priyadarshi, R., Kim, H.J., Rhim, J.W. 2021. Effect of sulfur nanoparticles on properties of alginate-based films for active food packaging applications. *Food Hydrocolloids*, 110: 106155.
 32. Choi, I., Yoo, D.S., Chang, Y., Kim, S.Y., Han, J. 2021. Polycaprolactone film functionalized with bacteriophage T4 promotes antibacterial activity of food packaging toward *Escherichia coli*. *Food Chem.* 346: 128883.
 33. Kim, S., Chang, Y. 2022. Anti-Salmonella polyvinyl alcohol coating containing a virulent phage PBSE191 and its application on chicken eggshell. *Food Res. Int.* 162: 111971.
 34. Oufensou, S., Ul Hassan, Z., Balmas, V., Jaoua, S., Migheli, Q. 2023. Perfume guns: Potential of yeast volatile organic compounds in the biological control of mycotoxin-producing fungi. *Toxins*. 15(1): 45.
 35. Van Long, N.N., Joly, C., Dantigny, P. 2016. Active packaging with antifungal activities. *Int. J. Food Microbiol.* 220: 73-90.
 36. Nazzaro, F., Fratianni, F., Coppola, R., De Feo, V. 2017. Essential oils and antifungal activity. *Pharm.* 10(4): 86.
 37. Chein, S.H., Sadiq, M.B., Anal, A.K. 2019. Antifungal effects of chitosan films incorporated with essential oils and control of fungal contamination in peanut kernels. *J. Food Process. Preserv.* 43(12): e14235.
 38. Fernandes, F.G., Grisi, C. V. B., da Costa Araújo, R., Botrel, D. A., Sousa, S. 2022. Active cellulose acetate-oregano essential oil films to conservation of hamburger buns: Antifungal, analysed sensorial and mechanical properties. *Packag. Technol. Sci.* 35: 175-182.
 39. Park, M.A., Chang, Y., Choi, I., Bai, J.W., J., Na, J.H., Han, J. 2018. Development of a comprehensive biological hazard-proof packaging film with insect-repellent, antibacterial, and antifungal activities. *J. Food Sci.* 83(12): 3035-3043.
 40. Suwanamornlert, P., Kerddonfag, N., Sane, A., Chinsirikul, W., Zhou, W., Chonhenchob, V. 2020. Poly(lactic acid)/poly(butylene-succinate-co-adipate) (PLA/PBSA) blend films containing thymol as alternative to synthetic preservatives for

- active packaging of bread. *Food Packag. Shelf Life*, 25: 100515.
41. Cruz-Romero, M.C., Murphy, T., Morris, M., Cummins, E., Kerry, J.P. 2013. Antimicrobial activity of chitosan, organic acids and nano-sized solubilisates for potential use in smart antimicrobially-active packaging for potential food applications. *Food Control*, 34(2): 393-397.
 42. Guimarães, JER., de la Fuente, B., Pérez-Gago, M.B., Andradás, C., Carbó, R., Mattiuz, B.H., Palou, L. 2019. Antifungal activity of GRAS salts against *Lasiodiplodia theobromae* in vitro and as ingredients of hydroxypropyl methylcellulose-lipid composite edible coatings to control *Diplodia* stem-end rot and maintain postharvest quality of citrus fruit. *Int. J. Food Microbiol.* 301: 9-18.
 43. Kowalczyk, D., Kordowska-Wiater, M., Złotek, U., Skrzypek, T. 2018. Antifungal resistance and physicochemical attributes of apricots coated with potassium sorbate-added carboxymethyl cellulose-based emulsion. *Int. J. Food Sci. Technol.* 53(3): 728-734.
 44. Wangprasertkul, J., Siriwananapong, R., Harnkarnsujarit, N. 2021. Antifungal packaging of sorbate and benzoate incorporated biodegradable films for fresh noodles. *Food Control*, 123: 107763.
 45. Erazo, A., Mosquera, S.A., Rodríguez-Paéz, J.E. 2019. Synthesis of ZnO nanoparticles with different morphology: Study of their antifungal effect on strains of *Aspergillus niger* and *Botrytis cinerea*. *Mater. Chem. Phys.* 234: 172-184.
 46. Francis, D.V., Thaliyakattil, S., Cherian, L., Sood, N., Gokhale, T. 2022. Metallic nanoparticle integrated ternary polymer blend of PVA/Starch/Glycerol: A promising antimicrobial food packaging material. *Polymers*, 14(7): 1379.
 47. Sahraee, S., Milani, J.M., Ghanbarzadeh, B., Hamishehkar, H. 2020. Development of emulsion films based on bovine gelatin-nano chitin-nano ZnO for cake packaging. *Food Sci. Nutr.* 8(2): 1303-12.
 48. Gurunathan, S., Qasim, M., Choi, Y., Do, J.T., Park, C., Hong, K., Kim, J.H., Song, H. 2020. Antiviral potential of nanoparticles-can nanoparticles fight against coronaviruses? *Nanomater.* 10(9): 1645.
 49. Melk, M.M., El-Hawary, S.S., Melek, F.R., Saleh, D.O., Ali, O.M., El Raey, M.A., Selim, N.M. 2021. Antiviral activity of zinc oxide nanoparticles mediated by *Plumbago indica* L. Extract Against Herpes Simplex Virus Type 1 (HSV-1). *Int. J. Nanomed.* 16: 8221-33.
 50. Boldogkői, Z., Csabai, Z., Tombácz, D., Janovák, L., Balassa, L., Deák, Á., Tóth, P.S., Janáky, C., Duda, E., Dékány, I. 2021. Visible light-generated antiviral effect on plasmonic Ag-TiO₂-based reactive nanocomposite thin film. *Front. Bioeng. Biotechnol.* 9: 709462.
 51. Delumeau, L.V., Asgarimoghaddam, H., Alkie, T., Jones, A.J.B., Lum, S., Mistry, K., Aucoin, M.G., DeWitte-Orr, S., Musselman, K.P. 2021. Effectiveness of antiviral metal and metal oxide thin-film coatings against human coronavirus 229E. *APL Mater.* 9(11): 111114.
 52. Fabra, M.J., Falcó, I., Randazzo, W., Sánchez, G., López-Rubio, A. 2018. Antiviral and antioxidant properties of active alginate edible films containing phenolic extracts. *Food Hydrocolloids*, 81: 96-103.
 53. Alara, O.R., Abdurahman, N.H., Ukaegbu, C.I. 2021. Extraction of phenolic compounds: A review. *Curr. Res. Food Sci.* 4: 200-14.
 54. Srinivasan, V., Brognaro, H., Prabhu, P.R., de Souza, E.E., Günther, S., Reinke, P.Y., Lane, T.J., Ginn, H., Han, H., Ewert, W. 2022. Antiviral activity of natural phenolic compounds in complex at an allosteric site of SARS-CoV-2 papain-like protease. *Commun. Biol.* 5(1): 805.
 55. Wu, Y.H., Zhang, B.Y., Qiu, L.P., Guan, R.F., Ye, Z.H., Yu, X.P. 2017. Structure properties and mechanisms of action of naturally originated phenolic acids and their derivatives against human viral infections. *Curr. Med. Chem.* 24(38): 4279-302.
 56. Rakowska PD, Tiddia M, Faruqui N, Bankier C, Pei Y, Pollard AJ, Zhang J, Gilmore IS. 2021. Antiviral surfaces and coatings and their mechanisms of action. *Communications Materials*, 2(1): 53.
 57. Gürlér, N. 2023. Development of chitosan/gelatin/starch composite edible films incorporated with pineapple peel extract and aloe vera gel: Mechanical, physical, antibacterial, antioxidant, and sensorial analysis. *Polym. Eng. Sci.* 63(2): 426-40.
 58. Priyadarshi, R., Kim, S.M., Rhim, J.W. 2021. Carboxymethyl cellulose-based multifunctional film combined with zinc oxide nanoparticles and grape seed extract for the preservation of high-fat meat products. *Sustainable Mater. Technol.* 29: e00325.
 59. Prakash, J., Cho, J., Mishra, Y.K. 2022. Photocatalytic TiO₂ nanomaterials as potential antimicrobial and antiviral agents: Scope against blocking the SARS-COV-2 spread. *Micro Nano Eng.* 14: 100100.
 60. Fernandes, F.G., Grisi, C.V.B., da Costa Araújo, R., Botrel, D.A., de Sousa, S. 2022. Active cellulose acetate-oregano essential oil films to conservation of hamburger buns: Antifungal, analysed sensorial and mechanical properties. *Packag. Technol. Sci.* 35(2): 175-82.
 61. Srisa, A., Harnkarnsujarit, N. 2020. Antifungal films from trans-cinnamaldehyde incorporated poly (lactic acid) and poly (butylene adipate-co-terephthalate) for bread packaging. *Food Chem.* 333: 127537.
 62. de Castro e Silva, P., Pereira, L.A.S., Lago, A.M.T., Valquíria, M., de Rezende, É.M., Carvalho, G.R., Oliveira, J.E., Marconcini, J.M. 2019. Physical-mechanical and antifungal properties of pectin nanocomposites/neem oil nanoemulsion for seed coating. *Food Biophys.* 14: 456-66.
 63. Fasihnia, S.H., Peighambaroust, S.H., Peighambaroust, S.J., Oromiehie, A. 2018. Development of novel active poly-propylene based packaging films containing different concentrations of sorbic acid. *Food Packag. Shelf Life*, 18: 87-94.
 64. Da Rocha, M., Prietto, L., de Souza, M.M., Furlong, E.B., Prentice, C. 2018. Effect of organic acids on physical-mechanical and antifungicidal properties of anchovy protein

- films. *J. Aquat. Food Prod. Technol.* 27(3): 316-326.
65. Ghorbani, H.R., Alizadeh, V., Mehr, F.P., Jafarpourgolroudbary, H., Erfan, K., Yeganeh, S.S. 2018. Preparation of polyurethane/CuO coating film and the study of antifungal activity. *Prog. Org. Coat.* 123: 322-325.
66. Duan N, Li Q, Meng X, Wang Z, Wu S. 2021. Preparation and characterization of k-carrageenan/konjac glucomannan/TiO₂ nanocomposite film with efficient anti-fungal activity and its application in strawberry preservation. *Food Chem.* 364: 130441.
67. Vieira, A.C.F., de Matos Fonseca, J., Menezes, N.M.C., Monteiro, A.R., Valencia, G.A. 2020. Active coatings based on hydroxypropyl methylcellulose and silver nanoparticles to extend the papaya (*Carica papaya* L.) shelf life. *Int. J. Biol. Macromol.* 164: 489-498.
68. Falcó, I., Flores-Meraz, P.L., Randazzo, W., Sánchez, G., López-Rubio, A., Fabra, M.J.. 2019. Antiviral activity of alginate-oleic acid based coatings incorporating green tea extract on strawberries and raspberries. *Food Hydrocolloids*, 87: 611-618.
69. Amankwaah, C., Li, J., Lee, J., Pascall, M.A. 2020. Development of antiviral and bacteriostatic chitosan-based food packaging material with grape seed extract for murine norovirus, *Escherichia coli* and *Listeria innocua* control. *Food Sci. Nutr.* 8(11): 6174-6181.
70. Ordon, M., Zdanowicz, M., Nawrotek, P., Stachurska, X., Mizielińska, M. 2021. Polyethylene films containing plant extracts in the polymer matrix as antibacterial and antiviral materials. *Int. J. Mol. Sci.* 22(24): 13438.
71. Sharif, N., Falcó, I., Martínez-Abad, A., Sánchez, G., López-Rubio, A., Fabra, M.J. 2021. On the use of persian gum for the development of antiviral edible coatings against murine norovirus of interest in blueberries. *Polymers*, 13(2): 224.

투고: 2023.03.08 / 심사완료: 2023.03.27 / 게재확정: 2023.03.27