에센셜 오일 기반 방충 액티브 패키징의 최근 연구 동향

Recent Trend of Essential Oils-based Insect-repellent Active Packaging

최재인, 김수현, 윤정아, 김형준, 박미경*

*경북대학교 식품공학부

School of Food Science and Biotechnology, Kyungpook National University, Daegu 41566, Republic of Korea

박 미 경

Correspondence to

Mi-Kyung Park, School of Food Science and Biotechnology, Kyungpook National University, Daegu 41566, Republic of Korea.
Tel: +82-53-950-5776
Fax: +82-53-950-6772
E-mail: parkmik@knu.ac.kr

서론

식품 포장은 식품의 제조 · 유통 · 소비 과정에서 물리적, 화학적, 생물학적 요인으로부터 식품을 보호하고 식품 품질 유지에 중요한 역할을 한다[1]. 최근, 국제 식품 무역량의 증가로 국가 간 수입 및 수출 식품의 이동이 증가하고 있어 식품 포장의 중요성이 더욱 강조되고 있다[2]. 식품 포장재로는 polypropylene (PP), polyvinyl chloride(PVC), low-density polyethylene (LDPE) 등과 같은 플라스틱 기반 포장재가 뛰어난 내습성과 우수한 기계적 강도로 인해 광범위하게 사용되고 있다[3]. 그러나 이들 플라스틱 기반 포장재는 비분해성으로 인해 폐기물 양이 해마다 급격히 증가하고 있으며, 이산화탄소와 일산화탄소를 방출하여 환경문제를 유발하고 있다[4]. 또한, 장기간 식품의 유통 및 보관 중 침투성 해충[화랑곡나방(*Plodia interpunctella*), 거짓쌀도둑거저리(*Tribolium castaneum*) 등]의 혼입이 빈번하게 발생하여 식품의 품질 저하 및 변질과 이로 인한 경제적 손실이 발생하고 있다[5),6)]. 또한, 최근 기후변화는 식품의 제조 및 유통 과정에서 해충의 유입 가능성을 더욱 증가시키고 있어 이에 대한 관리가 더욱 요구되고 있다.

따라서, 기존의 패시브 패키징(passive packaging) 방식에서 벗어나 방충 효과가 강화된 액티브 패키징(active packaging)에 대한 연구가 주목받고 있다. 액티브 패키징은 식품의 유통기한을 연장하거나 포장된 식품의 상태를 유지 또는 개선하기 위해 포장된 식품 또는 그 주변 환경으로 활성 물질(active compounds)을 방출하거나 흡수하도록 하는 포장 방식을 의미한다[7]. 최근, 에센셜 오일(essential oil, EO)은 인체 독성이 적고 그 효과가 기존의 화학합성 기피제와 유사하여 방충 액티

브 패키징의 활성 물질로 각광받고 있다. 주로 연구된 시트로넬라(*Cymbopogon nardus*), 오레가노(*Origanum vulgare*), 로즈마리(*Salvia rosmarinus*) 에센셜 오일은 항균 효과 뿐만 아니라 방충 효과가 보고되고 있어 방충 액티브 패키징 개발에 활용되고 있다[7]. 따라서, 본 원고에서는 국내 식품의 제조 · 유통 · 소비 단계에서 발생한 이물 현황과 식품 유형별 이물 실태를 조사하고 그 중 가장 빈번하게 발생하는 이물인 해충을 제어하기 위한 에센셜 오일 기반 액티브 패키징에 관한 최근 연구 동향을 소개하고자 한다.

(1) 연도별 식품 이물의 발생 현황 분석

국내 식품의약품안전처의 식품의약품안전백서(2022)에 따르면, 제조 · 유통 · 소비 단계에서 발생한 이물의 연도별 현황을 분석한 결과(Table 1), 지난 10년(2010–2021년) 동안 식품 이물 신고 건수는 약 6만 건으로 나타났으며, 주요 이물의 종류는 해충(35.5%), 곰팡이(10.8%), 금속(8.4%), 플라스틱(5.5%), 유리 (2.0%) 순으로 보고되었다. 특히, 해충은 평균 35.5%로 전체 리콜 원인 중 가장 높은 비율을 차지하고 있다. 또한, 식품 유형별 이물의 발생 현황에 따르면(Table 2), 해충은 과자류(18.6%), 커피류(15.0%), 면류(12.6%), 음료류(4.5%), 빵 · 떡류(3.3%) 순으로, 특히 과자류에서 가장 많이 발생하고 있는 것으로 보고되고 있다. 화랑곡나방, 거짓쌀도둑거저리는 식품에서 가장 빈번하게 보고되는 해충으로 날카로운 턱을 이용해 포장재를 뚫고 식품 내부로 침입하

Table 1. Occurrence status by major types of foreign substances (2010–2021)

Year	Insect	Fungi	Metal	Plastic	Glass	Other
2010	4,425 (51.5%)	637 (7.4%)	752 (8.7%)	500 (5.8%)	111 (1.3%)	2,171 (25.3%)
2011	3,031 (40.5%)	610 (8.1%)	647 (8.6%)	362 (4.8%)	95 (1.3%)	2,746 (36.7%)
2012	2,458 (37.6%)	624 (9.5%)	563 (8.6%)	304 (4.6%)	82 (1.3%)	2,509 (38.4%)
2013	2,276 (35.4%)	659 (10.2%)	528 (8.2%)	324 (5.0%)	91 (1.4%)	2,557 (39.7%)
2014	2,327 (36.3%)	667 (10.4%)	433 (6.7%)	101 (1.6%)	316 (4.9%)	2,567 (40.1%)
2015	2,251 (37.4%)	622 (10.3%)	438 (7.3 %)	95 (1.6%)	285 (4.7 %)	2,326 (38.7%)
2016	1,830 (34.3%)	552 (10.4%)	436 (8.2%)	310 (5.8%)	56 (1.1%)	2,148 (40.3%)
2017	938 (29.0%)	371 (11.5%)	303 (9.4%)	275 (8.5%)	60 (1.9%)	1,289 (39.8%)
2018	843 (27.5%)	383 (12.5%)	299 (9.8%)	243 (7.9%)	59 (1.9%)	1,234 (40.3%)
2019	990 (25.4%)	524 (13.4%)	387 (9.9%)	326 (8.4%)	47 (1.2%)	1,624 (41.7%)
2020	894 (22.1%)	767 (19.0%)	366 (9.1%)	361 (8.9%)	60 (1.5%)	1,596 (39.5%)
2021	885 (21.5%)	654 (15.9%)	313 (7.6%)	372 (9.0%)	54 (1.3%)	1,843 (44.7%)
Total	20,314 (35.5%)	6,462 (10.8%)	5,144 (8.4%)	3,350 (5.5%)	1,274 (2.0%)	24,079 (37.8%)

Table 2. Status of foreign substances occurrence by food group (2013–2021)

Food group	Insect	Fungi	Metal	Plastic	Glass	Other
Confectioneries	2,805 (18.6%)	1231 (21.4%)	885 (22.5%)	529 (16.9%)	72 (10.6%)	4,420 (22.9%)
Breads or Rice Cakes	496 (3.3%)	897 (15.6%)	452 (11.5%)	245 (7.9%)	32 (4.7%)	1,618 (8.4%)
Noodles	1,893 (12.6%)	451 (7.8%)	461 (11.7%)	305 (9.8%)	45 (6.6%)	1,496 (7.7%)
Coffee	2,256 (15.0%)	108 (1.9%)	275 (7.0%)	264 (8.5%)	33 (4.9%)	1,217 (6.3%)
Beverages	683 (4.5%)	796 (13.8%)	83 (2.1%)	117 (3.8%)	133 (19.6%)	1,151 (6.0%)
Other	6,931 (46.0%)	2268 (39.4%)	1783 (45.3%)	1662 (53.2%)	364 (53.6%)	9,438 (48.8%)
Total	15,064 (31.5)	5,751 (12.0)	3,939 (8.2)	3,122 (6.5)	679 (1.4)	19,340 (40.4)

여 주로 배설물과 탈피 껍질로 엉킨 거미줄을 형성하거나 불쾌한 냄새를 유발하여 식품의 전반적인 품질 저하를 초래한다[8]. 또한, 이들은 미생물 증식에 적합한 환경을 조성하여 곰팡이의 성장을 촉진시킴으로써, 식품의 리콜 및 경제적 손실을 야기할 수 있다[9),10)]. 화랑곡나방과 그 유충의 천공 능력에 대한 최근 연구[11)]에 따르면, 대표적인 플라스틱 기반 포장재인 PE, polystyrene (PS), aluminum foil (AF), polyethylene terephthalate (PET) 필름을 빠르게 침투할 수 있으며, PP와 PS의 경우 각각 20 μm와 30 μm의 두께에서 72시간 이내에 100% 침투되는 것으로 나타났다. 따라서, 이를 방지하기 위한 방충 소재의 개발과 이를 기반으로 한 액티브 패키징 연구가 필요하며, 이를 통해 식품의 판매 · 유통 · 소비 단계 전반에 걸친 전주기적 관리가 필요하다.

2. 방충 소재 및 방충 액티브 패키징 연구 동향

(1) 방충 소재 개발 연구

식품 포장은 단순히 물리적인 보호를 넘어서 식품의 품질 유지 및 안전성 향상을 위한 기능을 갖춰야 한다. 기존에 해충을 방지하기 위한 물리적 방법으로는 주로 저온 저장, 방사선 처리 등이 있으나, 설치 및 유지 비용이 많이 들어 식품 산업 현장에서 사용하기는 그 한계가 있다. 합성 살충제, methyl bromide와 같은 화학적 해충 방법의 경우, 살충제 내성, 인체에 대한 독성(발암성), 오존 파괴 등 환경 오염 문제, 식품 내 잔류 가능성 등 다양한 문제를 야기할 수 있다[12)]. 따라서, 친환경적이고 안전한 방충 액티브 패키징을 통해 해충의 혼입 및 침투뿐만 아니라 이로 인한 각종 미생물 및 다른 해충의 번식, 식품의 변질 등을 방지하는 것이 필요하다. 방충 액티브 패키징에 이용되는 대표적인 방충 소재로는 에센셜 오일, 유기산, 금속 나노입자 등이 있으며(Table 3), 식물 유래 물질 및 천연 추출물 등을 활용한 연구가 활발히 진행되고 있다.

특히, 그중에서도 에센셜 오일은 식물의 2차 대사산물 중 인체에 약리효과를 나타내는 성분으로 미국 식품의약국(FDA)에서 “일반적으로 안전한 것으로 간주됨(Generally Recognized as Safe; GRAS)”으로 분류되어 독성 걱정 없이 안전하게 사용할 수 있다[13)]. 다양한 식물에서 추출된 휘발성 화합물로 구성된 EO는 곤충의 신경계를 자극하거나 기피 효과를 일으켜 곤충의 접근을 차단함으로써 방충 효과를 나타낸다[14)]. EO의 방충 효과를 연구한 사례로는, Pourya의 연구에서 *Pistacia atlantica* EO와 *Pistacia khinjuk* EO가 해충 *Callosobruchus maculatus*에 대해 각각 82%, 76%의 방충 효과를 나

Table 3. Reported studies on insect-repellent agents for controlling penetrable insects

Classification	Insect-repellent agent	Conc.	Penetrable insect	Repellent efficacy	Ref.
EO	*Pistacia atlantica*	0.0234 µl/cm³	*Callosobruchus maculatus*	82%	Pourya et al., 2018
	Pistacia khinjuk	0.0234 µl/cm³	*Callosobruchus maculatus*	76%	Pourya et al., 2018
	Eucalytus saligna, Cupressus sempervirens	1.56 µl/cm2	*Sitophilus zeamai, Tribolium confusum*	〉70%	Tapondjou et al., 2005
	Artemisia annua	78.63 ml/cm2	*Tribolium castaneum, Lasioderma serricorne*	〉90%	Liu et al., 2019
	Artemisia princeps	200 µg/g	*Sitophilus oryzae*	95%	Liu et al., 2006
	Cinnamomum camphora	200 µg/g	*Sitophilus oryzae*	98%	Liu et al., 2006
	Alpinia katsumadai	3µl/ml	*Tribolium castaneum, Liposcelis bostrychophila, Lasioderma serricorne*	〉90%	Chen et al., 2019
EO-coated paper	*Azadirachta indica*	12.5 g/m2	*Sitophilus oryzae*	99%	Hou et al., 2004
	Azadirachta indica	12.5 g/m2	*Tribolium castaneum*	86%	Hou et al., 2004
Organic acid	Lactic, succinic, formic, and acetic acids	〉0.75 mg/g	*Pratylenchus vulnus*	84—100%	Fernandez-Bayo et al., 2020
	Ursolic acid	0.005 g/ml	*Spodoptera litura*	~92%	Shukla et al., 1996
Natural product	Hederagenin	0.00002 g/ml	*Spodoptera littoralis*	42%	Adel et al., 2000
Metal	Silver Nanoparticles	0.25 g/kg	Red flour beetle, Tribolium *castaneum*	〉75%	Alif et al., 2019
	Zinc Oxide Nanoparticles	100—500 ppm	*Spodoptera frugiperda*	~40%	Pittarate et al., 2021
	Gold nanoparticles	41.608 ppm	*Anopheles stephensi*	~90%	Murugan et al., 2015

타내었다. 또한, *Artemisia annua* EO가 *Tribolium castaneum*과 *Lasioderma serricorne*에 대해 모두 90% 이상의 방충 효과를 나타낸다고 보고하였다[15]. 이와 유사하게, Liu 등[16]의 연구에 따르면, *Artemisia princeps* EO와 *Cinnamomum camphora* EO는 *Sitophilus oryzae*에 대해 95% 이상의 방충 효과를 나타냈다. 또 다른 연구에서는 *Azadirachta indica* EO를 함유한 종이 소재가 *Sitophilus oryzae*, *Tribolium castaneum*에 대해 각각 99%, 86%의 높은 방충 효과를 보이며, EO의 방충 소재로서의 활용 가능성을 보고하였다[17]. 따라서, 에센셜 오일은 안전성과 우수한 방충 효과로 인해 방충 기능성 소재로서의 가능성이 입증되었으며, 향후 포장 소재에 첨가하여 방충 액티브 패키징을 개발하고 적용함으로써 식품 생산, 제조 및 유통 과정에서 효과적인 해충 방제 방법으로 활용될 수 있다.

(2) 에센셜 오일 기반 방충 액티브 패키징 연구 동향

방충 소재로써 에센셜 오일을 포장재에 첨가하여 사용할 경우, 식품과 직접 접촉하지 않아도 그 휘발성 성분이 공기 중에 방출되면서 해충 혼입 및 침투를 효과적으로 제어하는 것이 규명됨에 따라[27], 에센셜 오일 기반 액티브 패키징의 방충 효과에 대한 연구가 진행되고 있다. 최근 연구에 따르면 에센셜 오일을 PP와 LDPE와 같은 플라스틱 필름에 첨가한 방충 액티브 패키징을 통해 화랑곡나방, 거짓쌀도둑거저리, 줄알락명나방에 대해 높은 방충 효과를 보이는 것으로 보고되고 있다(Table 4). PP 필름에 시트로넬라(*C. nardus*) EO, 오레가노(*O. vulgare*) EO, 로즈마리(*S. rosmarinus*) EO를 4%의 농도로 코팅 후 거짓쌀도둑거저리 성충에 대한 방충 효과를 검토한 결과, 각각 최대 50%, 60%, 80%의 방충 효과를 나타냈으며 최대 48시간 동안 그 효과를 지속함을 확인하였다[28]. Lee 등[29]은 다층의 LDPE 필름에 마늘(*Amaryllidaceae*), 생강 (*Zingiberaceae*), 후추(*Piperaceae*), 양파(*Amaryllidaceae*), 회향(*Umbellifers*) EO를 5%의 농도로 각각 첨가 후 화랑곡나방 유충에 대한 방충 효과를 검토한 결과, 77.8%, 88.9%, 71.5%, 81.5%, 45.2%의 방충 효과를 72시간 동안 확인하였다. 오레가노(*O. vulgare*) EO와 제충국(*Tanacetum cinerariifolium*) EO를 1:3 비율로 혼합한 혼합물을 LLDPE 필름에 첨가 후, 화랑곡나방 유충과 줄알락명나방 유충에 대한 방충 효과를 검토한 결과, 14일 이후 각각 37%와 25%의 방충 효과를 나타내었다[30]. 이는 에센셜 오일 기반 액티브 패키징은 침투성 해충에 대해 효과적인 방충 효과를 나타냄을 확인하였고, 이를 활용함으로써 해충의 제어 및 식품 안전에 중요한 역할을 할 수 있음을 시사한다.

Table 4. Insect-repellent efficacy of essential oil-based active packaging

Essential oil	Conc.	Penetrable insect	Packaging film	Repellent efficacy		Ref.
				Repellency	Duration	
Citronella (*C. nardus*)	4%	*T. castaneum*	PP film	~50%	48 h	Licciardello et al. (2013)
Oregano (*O. vulgare*)	4%	*T. castaneum*	PP film	~60%	48 h	Licciardello et al. (2013)
Rosemary (*S. rosmarinus*)	4%	*T. castaneum*	PP film	~80%	48 h	Licciardello et al. (2013)
Garlic (*Amaryllidaceae*)	5%	*P. interpunctella*	Multilayered LDPE film	77.8%	72 h	Lee et al. (2017)
Ginger (*Zingiberaceae*)	5%	*P. interpunctella*	Multilayered LDPE film	88.9%	72 h	Lee et al. (2017)
Black pepper (*Piperaceae*)	5%	*P. interpunctella*	Multilayered LDPE film	71.5%	72 h	Lee et al. (2017)
Onion (*Amaryllidaceae*)	5%	*P. interpunctella*	Multilayered LDPE film	81.5%	72 h	Lee et al. (2017)
Fennel (*Umbellifers*)	5%	*P. interpunctella*	Multilayered LDPE film	45.2%	72 h	Lee et al. (2017)
Oregano (*O. vulgare*) Pyrethrin (*T. cinerariifolium*)	4%	*P. interpunctella*	LLDPE film	~37%	14 d	Kim et al. (2024)
Oregano (*O. vulgare*) Pyrethrin (*T. cinerariifolium*)	4%	*C. cautella*	LLDPE film	~25%	14 d	Kim et al. (2024)

결론

식품 포장은 물리적, 화학적, 생물학적 요인으로부터 식품을 보호하며, 식품의 안전성과 품질 유지에 중요한 역할을 한다. 특히 화랑곡나방, 거짓쌀도둑거저리와 같은 침투성 해충의 피해는 식품 산업에서 큰 경제적 손실을 초래하므로, 이를 제어하기 위한 효과적인 방충 액티브 패키징의 개발이 요구되고 있다. 최근 연구들은 화학합성 기피제의 친환경적인 대체재로써 에센셜 오일의 방충 효과를 검증하고, 이를 기반으로 한 방충 액티브 패키징의 활용 가능성을 제시하고 있다. 식물로부터 추출한 에센셜 오일을 첨가한 액티브 패키징은 식품에서 화랑곡나방과 거짓쌀도둑거저리, 줄알락명나방과의 침입을 효과적으로 방지하여 높은 방충 효과를 갖는 것으로 나타났다. 따라서, 에센셜 오일을 활용한 방충 액티브 패키징 기술은 식품의 유통 및 보관 중 발생하는 침투성 해충의 제어 및 이를 통한 식품 산업의 안전성 확보에 기여할 수 있음을 확인하였다. 다만 에센셜 오일을 활용한 방충 액티브 패키징의 연구는 랩 스케일(lab-scale) 수준에서 수행된 연구가 대부분이므로 이의 산업화 및 상용화를 위해서는 이의 공정 조건 최적화를 통한 파일럿 스케일(pilot scale) 수준에서의 생산에 대한 추가적인 연구가 필요한 것으로 사료된다.

참고 문헌

1. Lindh, H., Olsson, A., Williams, H., Consumer perceptions of food packaging: contributing to or counteracting environmentally sustainable development?. *Packag. Technol. Sci.*, *29(1)*, 3-23 (2016).
2. Chaudhari, A.K., Singh, V.K., Kedia, A., Das, S., Dubey, N.K., Essential oils and their bioactive compounds as eco-friendly novel green pesticides for management of storage insect pests: Prospects and retrospects. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 28, 18918-18940 (2021).
3. Jiang, S.J., Huang, J.Y., 2014. The technology and application of shrink packaging, 2015 International Conference on Material Science and Applications (icmsa-15), Atlantis Press, Paris, pp. 68-73.
4. Amin, U., Khan, M.K.I., Maan, A.A., Nazir, A., Riaz, S., Khan, M.U., Sultan, M., Munekata, P.E., Lorenzo, J.M., Biodegradable active, intelligent, and smart packaging materials for food applications. *Food Packag. Shelf Life.*, **33**, 100903 (2022).
5. Jo, H. J., Park, K. M., Min, S. C., Na, J. H., Park, K. H., Han, J., Development of an anti-insect sachet using a polyvinyl alcohol-cinnamon oil polymer strip against *Plodia interpunctella*. *J. Food Sci.*, **78**, E1713-E1720 (2013).
6. Nerio, L.S., Olivero-Verbel, J., Stashenko, E., Repellent activity of essential oils: a review. *Bioresour. Technol.*, **101**, 372-378 (2010).
7. Park, S., Ji, H., Choi, J., Imm, S., Chang, Y., Recent Research Trends in Antibacterial, Antifungal, and Antiviral Active Packaging. *Korean J. Packag. Sci. Tech.*, **29.1**, 15-25 (2023).
8. Mohandass, S., Arthur, F.H., Zhu, K.Y., Throne, J.E., Biology and management of *Plodia interpunctella* (Lepidoptera: Pyralidae) in stored products. *J. Stored Prod. Res.*, **43(3)**, 302-311 (2007).
9. Du, S.S., Wang, C.F., Li, J., Zhang, H.M., Liu, Q.Z., Liu, Z.L., Deng, Z.W., Antifeedant diterpenoids against *Tribolium castaneum* from the stems and twigs of *Ceriops tagal* (Rhizophoraceae). *Molecules*, **16(7)**, 6060-6067 (2011).

10. Gibson, R., Foreign bodies cause most recalls. *Nutr. Food Sci.*, **30(4)**, 187–191 (2000).

11. Lee, S. H., Kwon, S. J., Lee, S. E., Kim, J. H., Lee, J. S., Na, J. H., Han, J., Effects of type and thickness of flexible packaging films on perforation by plodia interpuntella. *Korean J. Food Sci. Technol.*, **46(6)**, 739–742 (2014).

12. Park, N.H., Park, H.J., Han, J.J., Lee, J.H., 2017. Development of food packaging materials with various effects (antimicrobial, insect-repellent, and antioxidant), Final report. Korea Institute of Industrial Technology, Sejong, Korea, pp. 141–143.

13. Pavoni, L., Pavela, R., Cespi, M., Bonacucina, G., Maggi, F., Zeni, V., Canale. A., Lucchi, A., Bruschi, F., Benelli, G., Green micro-and nanoemulsions for managing parasites, vectors and pests. *Nanomaterials*, **9(9)**, 1285 (2019).

14. Jankowska, M., Rogalska, J., Wyszkowska, J., Stankiewicz, M., Molecular targets for components of essential oils in the insect nervous system—a review. *Molecules*, **23(1)**, 34 (2017).

15. Liu, H., Guo, S.S., Lu, L., Li, D., Liang, J., Huang, Z.H., Zhou, Y.M., Zhang, W.J., Du, S., Essential oil from Artemisia annua aerial parts: composition and repellent activity against two storage pests. *Nat. Prod. Res.*, **35(5)**, 822–825 (2019).

16. Liu, C. H., Mishra, A. K., Tan, R. X., Tang, C., Yang, H., & Shen, Y. F., Repellent and insecticidal activities of essential oils from *Artemisia princeps* and *Cinnamomum camphora* and their effect on seed germination of wheat and broad bean. *Bioresour. Technol.*, **97(15)**, 1969–1973 (2006).

17. Hou, X., Fields, P., Taylor, W., The effect of repellents on penetration into packaging by stored-product insects. *J. Stored Prod. Res.*, **40(1)**, 47–54 (2004).

18. Pourya, M., Sadeghi, A., Ghobari, H., Taning, C.N.T., Smagghe, G., Bioactivity of *Pistacia atlantica* desf. Subsp. *Kurdica* (Zohary) Rech. F. and *Pistacia khinjuk* stocks essential oils against *Callosobruchus maculatus* (F, 1775)(Coloeptera: Bruchidae) under laboratory conditions. *J. Stored Prod. Res.*, **77**, 96–105 (2018).

19. Tapondjou, A.L., Adler, C.F. D.A., Fontem, D.A., Bouda, H., Reichmuth, C.H., Bioactivities of cymol and essential oils of *Cupressus sempervirens* and *Eucalyptus saligna* against *Sitophilus zeamais* Motschulsky and *Tribolium confusum* du Val. *J. Stored Prod. Res.*, **41(1)**, 91–102 (2005).

20. Chen, Z., Pang, X., Guo, S., Zhang, W., Geng, Z., Zhang, Z., Du, S., Deng, Z., Chemical composition and bioactivities of *Alpinia Katsumadai* Hayata seed essential oil against three stored product insects. *J. Essent. Oil Bear. Plants.*, **22(2)**, 504–515 (2019).

21. Fernandez-Bayo, J.D., Shea, E.A., Parr, A.E., Achmon, Y., Stapleton, J.J., VanderGheynst, J.S., Hodson, A.K., Simmons C.W., Almond processing residues as a source of organic acid biopesticides during biosolarization. *Waste Manag.*, **101**, 74–82 (2020).

22. Shukla, Y.N., Rani, A., Tripathi, A.K., Sharma, S., Antifeedant activity of ursolic acid isolated from *Duboisia myoporoides*. *Phytother. Res.*, **10(4)**, 359–360 (1996).

23. Adel, M.M., Sehnal, F., Jurzysta, M., Effects of alfalfa saponins on the moth Spodoptera littoralis. *J. Chem. Ecol.*, **26**, 1065–1078 (2000).

24. Alif Alisha, A. S., Comparative bioassay of silver nanoparticles and malathion on infestation of red flour beetle, Tribolium castaneum. *J. Basic Appl. Zool.*, **80**, 1–10 (2019).

25. Pittarate, S., Rajula, J., Rahman, A., Vivekanandhan, P., Thungrabeab, M., Mekchay, S., Krutmuang, P., Insecticidal effect of zinc oxide nanoparticles against *Spodoptera frugiperda* under laboratory conditions. Insects, **12(1017)**, 1–11 (2021).

26. Murugan, K., Benelli, G., Panneerselvam, C., Subramaniam, J., Jeyalalitha, T., Dinesh, D., Nicoletti, M., Hwang, J.S., Suresh, U., Madhiyazhagan, P., *Cymbopogon citratus*-synthesized gold nanoparticles boost the predation efficiency of copepod *Mesocyclops aspericornis* against malaria and dengue mosquitoes. *Exp. Parasitol.*, **153**, 129–138 (2015).

27. Marsin, A.M., Muhamad, I.I., Anis, S.N.S., Lazim, N.A.M., Ching, L.W., Dolhaji, N.M., Essential oils as insect repellent agents in food packaging: A review. *Eur. Food Res. Technol.*, **246**, 1519–1532 (2020).

28. Licciardello, F., Muratore, G., Suma, P., Russo, A., Nerín, C., Effectiveness of a novel insect-repellent food packaging incorporating essential oils against the red flour beetle (*Tribolium castaneum*). *Innov Food Sci Emerg Technol*, **19**, 173–180 (2013).

29. Lee, S.H., Chang, Y., Na, J.H., Han, J., Development of anti-insect multilayered films for brown rice packaging that prevent *Plodia interpunctella* infestation. *J. Stored Prod. Res.*, **72**, 153-160 (2017).

30. Kim, S. H., Kang, S. E., Kim, Y. D., & Park, M. K., Industrial-scale blown active packaging film with essential oils: Properties, dual-functional performance, and box packaging application of instant noodles. *Food Packag. Shelf Life*, **43**, 101276. (2024).