최근 LED 광을 이용한 식중독균 제어 연구 동향

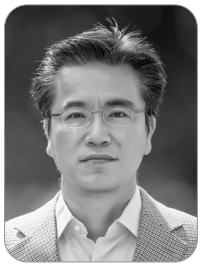
Recent Trends in Research on Controlling food Poisoning Bacteria using LED Light

김수진, 신예진, 김연우, 방우석*

Kim, Su-Jin, Sin, Ye-Jin, Kim, Yeon-Woo, Bang, Woo-Suk*

영남대학교 식품영양학과

Department of Food Science and Nutrition, Yeungnam University



방 우 석

Correspondence to

Bang, Woo-Suk, Department of Food Science and Nutrition, Yeungnam University, 280 Daehak-Ro, Gyeongsan, Gyeongbuk 38541, Republic of Korea (38541 Korea)
Tel.: +82-53-810-2877,
Fax: +82-53-810-4666
E-mail: wsbang@ynu.ac.kr

서론

지속적으로 식품 산업은 생산량 증가와 더불어 다양한 유통경로로 인하여, 그에 따른 미생물 오염의 위험도 함께 증가하고 있다. 특히 *Salmonella spp.*, *Escherichia coli*O157:H7, *Listeria monocytogenes*와 같은 주요 식중독 원인균은 다양한 식품 매트릭스에서 오랜 시간 생존이 가능하며, 더구나 냉장 조건에서도 생육과 증식이 가능한 균이 있어 식품 가공 및 소비 과정 전반에 걸쳐 식품 안전에 위협이 되고 있다.[5, 14]. 세계보건기구(World Health Orgnization, WHO)와 미국 질병통제예방센터(Center for Disease Control Protection, CDC)는 이러한 병원성 미생물이 매년 수백만 건의 식중독 사례를 유발한다고 보고하며, 특히 고령자, 영유아, 면역 저하자 등 고 위험군에게는 심각한 건강 피해를 초래할 수 있다고 경고하고 있다[14]. 이에 따라 식중독균의 효과적인 제어는 식품 위생 관리의 핵심 과제로 자리 잡았으며, 고온 살균, 화학적 소독제, 방사선 조사 등 기존의 방법에 대한 대체 기술 개발이 활발히 이루어지고 있다. 특히 신선 편의 식품, 저온 유통 제품, 비 가열 가공식품 등의 경우 고온 처리나 강한 화학 처리가 어려워, 비 가열과 화학적 살균 보존제 사용이 없이 품질 저하를 최소화하고 미생물을 제어할 수 있는 기술에 대한 수요가 높아지고 있다[7]. 근래에 주목받고 있는 발광다이오드(Light Emitting Diode, LED) 기반 광 살균 기술은 이러한 요구를 충족할 수 있는 유망한 대안으로 평가되고 있다.

최근 발표된 LED 광원을 이용한 식중독균 제어 연구를 중심으로, 각 균 종의 특성, 적용 파장, 조사 조건, 병용 항균제, 식품 유형에 따른 반응 등을 통합적으로 분

석하고자 한다. 이를 통해 LED 기반 미생물 제어 기술의 과학적 원리, 적용 현황, 장단점, 향후 연구 방향 및 산업적 활용 가능성에 대해 고찰하고자 하며, 식품안전 및 위생 관리 분야에서 LED 기술이 실용적 솔루션으로 자리매김할 수 있도록 과학적 · 기술적 기반을 제공하는 데 본 리뷰의 목적이 있다.

본론

1. LED 광기반 살균 기술의 개요 및 장점

발광다이오드(Light Emitting Diode, LED)는 특정 파장(예: 자외선, 청색광, 적색광 등)을 선택적으로 방출할 수 있는 반도체 소자로서, 기존의 자외선 살균 램프보다 에너지 효율이 높고, 수명이 길며, 수은 등 유해물질을 포함하지 않아 친환경적이다[7]. LED를 이용한 살균 메커니즘은 주로 광역학 살균(photodynamic inactivation, PDI)에 기반한다. 이는 박테리아 세포 내 존재하는 내인성 광감작 물질(예: 포르피린, 리보플라빈 등)이 특정 파장의 빛(주로400–460 nm)은 그람 양성 및 그람 음성 균 모두에 대해 일정 수준의 살균 효과를 나타내며, 외부 광감작제(예: 카페산, 키토산, 커큐민 등)와 병용 시 살균력이 더욱 증가하는 것으로 보고되고 있다[10,15–16].

자외선LED(UV–A, 365 – 395 nm)의 경우 기존UV–C보다 살균력이 낮지만 인체에 상대적으로 안전하며, 외부 감광제를 활용할 경우 충분한 미생물 억제 효과를 얻을 수 있다[8]. 이러한LED 기술은 기기 크기가 작고 열 발생이 적어 식품 가공 라인, 저장창고, 식품 포장 내부, 또는 소비자 가정용 기기에까지 다양한 형태로 적용이 가능하다. 또한 연속적 또는 주기적인 조사 시스템 설계가 가능하다는 점에서, 향후 식품 위생의 실시간 제어 및 스마트 관리 기술로의 확장이 기대된다[1, 8].

2. 주요 병원성 세균에 대한LED 살균 연구의 확산

최근 발표된 여러 연구에 따르면, 청색광 또는UV–A LED를 활용한 식중독균 제어 연구는 급증하고 있으며, 특히 *Salmonella spp.*, *E. coli*O157:H7, *L. monocytogenes*는 다양한 식품 유형에 적용된 대표적 모델 균주로 활용되고 있다. 이들 세 균주는 식품 제조 · 가공 · 유통 · 조리 전 과정에 걸쳐 오염 가능성이 높고, 소량으로도 병원성을 유발할 수 있다는 점에서, 효과적이고 안전한 제어 기술 확보가 절실하다[12, 15].

연구에 따르면 *L. monocytogenes*는 청색광LED에 상대적으로 높은 감수성을 보이며, 단독 조사를 통해서도 5 log 이상 감소가 가능하다는 보고가 있다[3, 13]. 반면 *Salmonella spp.*와 *E. coli*O157:H7은 그람 음성균으로서 외막 구조상 청색광의ROS 생성 효과가 제한적이며, 천연 광감작제와 병용 시에만 검출 한계까지의 억제가 가능하다고 보고된다[8, 12, 17].

이러한 기술은 멜론, 딸기, 샐러드 채소류, 육류, 달걀, 액상 주스, 반려동물푸드, 포장재 등 다양한 식품 매트릭스에 적용되어, 실제 산업 적용 가능성을 높이고 있다. 특히LED 살균 처리는 식품의pH, 수분함량, 광투과성, 표면 구조 등에 따라 살균 효율이 달라지는 특성이 있으므로, 향후 식품 유형별 맞춤 설계와 조사 조건 최적화가 병행되어야 한다는 연구도 제시되고 있다[6, 9, 11].

3. 파장에 따른 살균 효과

파장별 LED 살균 효과를 살펴보면, 청색광(405 – 470 nm) LED가 가장 우수한 살균력을 나타내는 것으로 보인다[2]. 예를 들어, 405 nm LED를 48시간 동안 조사 시 *L. monocytogenes*나 *Staphylococcus aureus*등과 같은 그람양성균에서 5 – 6 log 수준의 감소가 확인되었으며, 이는 일반적으로 그람음성균보다 높은 살균 효과를 의미한다[5].그에 반하여, 적색(≥630 nm) 또는 녹색(520 – 558 nm)의 단독 조사는 살균 효과가 미미한 편이며, 이러한 파장은 주로 전구체(예: 5–ALA)와 병용하여 광역학처리 방식으로 활용되는 연구가 이루어지고 있다. UV–A(365 – 395 nm) LED는 UV–C에 비해 인체에 덜 유해하지만, 단독 조사 시에는 살균력이 상대적으로 낮

은 것으로 알려져 있다. 고강도 365 nm LED를 약 658 J 조사한 경우, 건조 반려동물푸드내 *Salmonella*는 약 0.8 log 감소하였으나[14], 같은 조건에서 대장균은 검출 한계까지 제거되지 않았다.

그러나 카페산, 커큐민, 카르바크롤 같은 천연물과 결합하면, UV-A 파장에서도 식중독균을 검출 한계까지 억제할 수 있다는 연구 결과가 보고된 바 있다[7, 12]. 이와같은결과들을 종합하면, 청색광 LED는 내인성 광감작 물질을 통한 산화손상이 효과적이며, UV-A LED는 외부 광감작제의 병용을 통해 살균 효과가 증대될수 있다고 사료된다. 대부분의 LED 조사에서는 수십 분에서 수십 시간에 이르는 장시간 조사가 요구된다. 예를 들어, 405 nm LED를 48시간 동안(약 86.4 J/cm^2) 조사했을 때 *E. coli*는 약 1.3 log, *S. aureus*는 5.7 log 수준으로 감소하였다[5]. 또한, 460 nm 청색 LED는 4℃에서 45분(≈약 91 J/cm^2) 조사 시 *Salmonella*를 6.96 log 이상 감소시킨 바 있다[2]. 조사 강도는 밀도, 박막 여부, 이동여부(교반) 등 실험 조건에 따라 달라지며, 조사 중 표면 온도 상승과 수분 손실이 함께 발생하여 건조 식품의 경우 살균 효율이 일부 온열 효과와 결합된다[14]

LED 조사에 천연 항균제(예: 키토산, 비타민 B_2, 폴리페놀 등)를 병용 시 살균 효과가 증진된다. 멜론 절편에 460 nm LED와 0.5-1% 키토산을 병용 처리한 결과, *Listeria*가 다른 두 균종보다 큰 감소폭이 확인되어 두 처리 간의 시너지 효과가 입증되었다[10]. 또한, 405 nm LED와 커큐민/카르바크롤을 활용한 광역학 처리는 냉장 온도 달걀 껍질의 *Salmonella*를 30-45분 내 검출 한계까지 제거한 사례도 보고되었다[1].

4. 식품 특성에 따른 살균효과

조사 대상인식품매트릭스(액상, 고체, 표면 등)에 따라 현저한 차이를 보인다.일반적으로 단층액막(수분) 상태에서는 빛의 투과가 제한되어 살균 효율이 저하되는 반면, 다공성 또는 반사면에서는 살균 효과가 상대적으로 강화되는 경향을보이고 있다[5]. 405 nm LED 조사 시 포장용기(HDPE, SS 등) 표면에서는 3.1-6.3 log의 살균 효과가 관찰된 반면, 동일 조건의 얇은 액상막에서는 1-2 log 수준에 머무른 것으로 보고되었다[5]. 식품 특성에 따라서는 pH가 산성에 가까울수록 LED의 살균력이 더욱 증가하는경향을나타내었다. 실제 약산성 환경(pH 3.5)에서 461 nm 청색 LED를 15℃에서 2시간 조사한 결과 *E. coli*와 *S. aureus*가 4-5 log 감소하였으나, 중성(pH 7.2)에서는 살균 효과가 급격히 감소하는 것으로 나타났다[2]. 이러한 결과는 농산물 및 육류 등의 저장 및 처리 조건과 연계하여 LED 살균 효율을 최적화할 수 있음을 시사한다.

5. 식중독균 종에 따른 살균 효과

*Salmonella spp.*는LED 단독 조사 시 대체로 높은 저항성을 보인다. 예를 들어, 365 nm LED(658 J)를 이용한 조사에서 건조된 반려동물푸드 내 *S.* Typhimurium은 약 0.79 log 감소에 그쳤으며[14], 그람 음성균 특성상 대장균보다 살균 효과가 낮은 편이다. 그러나 효모나 폴리페놀을 병용하는 연구에서는 *Salmonella*를 검출 한계까지 억제하는 결과가 보고되었다. 카페산+UV-A(365 nm, 3 mM, 4 J/cm^2)를 적용한 처리로 *S.* Typhimurium이 검출 한계까지 감소하였으며, 405 nm LED + 카르바크롤 병용(45분)으로 달걀 껍데기 내 *S.* Enteritidis를 완전히 제거하였다[4]. 다시말해 *Salmonella*제어에는 추가 광감작제 또는 보조 처리가 유용하다 할 수 있다.

*Escherichia coli*O157:H7는 일반적으로 LED에 대해 *Salmonella*보다 더 높은 저항성을 가진다. 앞서 언급한 반려동물푸드 연구에서 동일 조건 하에 건조된 *E. coli*는 *Salmonella*에 비해 더 적은 사멸을 보여, 건조 상태에서는 특히 더 높은 광량이 필요함이 확인되었다[7]. 한편, 카페산+UV-A(3 mM, 3 J/cm^2) 병용 처리로 *E. coli*O157:H7를 검출 한계까지 제거할 수 있었고[12], 강산 조건(pH 3.5)과 청색광 병용 시 4-5 log의 큰 사멸 효과가 나타났다[2]. 그람 음성균 특성상 LED 단독보다 추가적인 보조 처리가 권장된다.

Table 1. Recent studies have exposed food to various conditions of LEDs

Strains and Foods	Condition o LED of	Results
E. coli O157:H7, Salmonella spp., *L. monocytogenes* – 신선멜론(조각)	청색광460 nm + 키토산(0.5 – 1.0%), 4℃/10℃	LED 단독대비키토산병용시살균율증가. L. mono. 감소가가장큼[10]
Salmonella Enteritidis PT4 – 달걀껍데기	405 nm LED + 커큐민/카르바크롤, 조사15 – 45분(4 – 37℃)	Carvacrol+LED: 4℃에서30분, 25 – 37 ℃에서45분에전멸. Curcumin+LED: 4 – 25℃ 45분에서 모두 사멸[7]
E. coli O157:H7, S. Typhimurium – 건조반려동물푸드	365 nm LED, 총조사량≈658 J	*Salmonella* 0.79 log 감소(생균수), *E. coli*는 검출한계 미도달[14]
L. monocytogenes, *S. aureus* 등 – 식품가공표면(HDPE, 유리등)	405 nm LED, 48시간(총≈86 J/cm²)	O157:H7: 1.3 log 감소; *L. monocytogenes*: ~2.6 log; *S. aureus*: 5.7 log; 표면전체: 3.1 – 6.3 log 감소[5]
E. coli O157:H7, *S.* Typhimurium, *L. monocytogenes* – 사과즙(액상)	UV–A (365 nm) + 카페산3 mM, 3 – 5 J/cm²	*E. coli & Salmonella*: 3 – 4 J에서 검출한계 까지 감소. *L. monocytogenes* : 5J 에서~3.1 log 감소 (색, 항산화유지)[12]

그람 양성균인 *L. monocytogenes*는 LED에 비교적 높은 감수성을 보인다. 특히 청색광 조사에서 효과가 두드러지며, 약 108 J/cm²의 광 조사만으로 5 log 이상 감소가 가능하다. 반면 그람 음성균인 *E. coli*는 288 J/cm²까지 요구된다는 보고가 있다[5]. 실제 멜론을 대상으로 한 연구에서도 키토산–460 nm LED 병용 시 *L. monocytogenes*의 감소폭이 가장 컸으며[=5], 단독 LED로도 비교적 쉽게 제어가 가능했다. 한편, 카페산+UV–A 병용 *L. monocytogenes*가 약 3.1 log 감소(5 J/cm²)를 보여 억제 수준이 다소 낮았으나[17], 이는 포토다이나믹 처리의 광량 및 조건에 따라 달라질 수 있다. 결론적으로 *Listeria*는 적절한 청색광 조사만으로도 효과적이지만, 경우에 따라 보조제 활용이 필요하다.

6. 식품별 살균효과

건조식품류에 있어서 건조 반려동물푸드, 곡류, 향신료에 대한 LED 를 이용한 연구는365 nm LED(약 658 J)를 이용한 건조 반려동물푸드 조사에서는 *Salmonella*가 0.79 log 감소하였으나, *E. coli*는 상대적으로 더 적은 감소를 보였다[9]. 이는 낮은 수분 활동도에서 광흡수가 제한되어 살균 효율이 저하되는 연구 결과라 할 수 있다. 한편, 다공성 동물사료에 365 – 395 nm LED를 처리할 경우 표면 온도 상승과 수분 증발이 발생하여 살균 효과가 증가하는 것으로 보고되었다[14].

과일 · 채소류에서는 잘라낸 멜론, 딸기, 채소 등에 LED 적용 연구가 있다. 예를 들어, 460 nm 청색 LED와 키토산을 병용하여 신선 멜론을 조사한 결과, *L. monocytogenes*의 생장이 가장 크게 억제되었으며, 과즙 내 비타민 C와 플라보노이드 함량에는 거의 변화가 없었다[10]. 이와 같이 LED 살균은 신선도 유지와 병원성 억제를 동시에 노릴 수 있다. 또한, 456 nm 청색 LED는 귤 표면의 *Penicillium*곰팡이 성장을 저감시켰으며, 딸기와 양배추 처리 시 항산화 활성 및 비타민 C 함량 증가를 통한 품질 개선 효과가 보고되었다[5].

동물성 단백질 · 가공품에 있어서 계란, 육류, 어류 등 동물성 식품에 광역학적 LED 조사 처리로405 nm LED + 카르바크롤 병용(4 – 37℃, 30 – 45분)으로 달걀 껍데기 내 *S.* Enteritidis가 완전히 제거되었으며[7], UV–A LED와 천연 페놀인 카페산 병용 처리로 육류 및 낙농 제품 첨가제 없이도 사과즙 내 3종 균주가 크게 감소하였다[12]. 아직 식육 제품에 대한 적용 사례는 적으나, 저온 · 산성

조건에서 LED 사용 시 화학 처리 없이 미생물 안전도를 향상시킬 가능성이 제기되고 있다[2].

식품 접촉면 및 포장재는 스테인리스, 플라스틱, 유리 등 식품 접촉 표면에 대한 405 nm LED(48시간) 조사 시 *E. coli*O157:H7, *Listeria*, *Salmonella*등에서 3~6 log 수준의 살균 효과가 관찰되었다[5]. 특히 나노포어 구조를 가진 표면에서는 살균 속도가 더욱 향상되었다. 이 밖에도 유제품용 파이프, 컨테이너 등의 장비 표면 및 포장재 내부 공간에 LED를 설치하여 지속적인 살균 관리를 구현하는 개념이 제안되고 있다 [Table 1.]

7. LED 살균 기술의 한계 및 앞으로의 과제

LED를 이용한 살균처리는 가열 살균의 단점을 극복할 수 있는 방법이지만 실적용에 있어서 해결해야 할 과제들이 있다. 첫째, 효과적인 살균을 위해서는 높은 광량과 긴 조사 시간이 요구된다. 다수의 연구에서 수십 분에서 수십 시간에 걸친 조사가 필요함이 보고되었으며, 이는 산업 현장에 적용할 때 생산 속도 및 열 충돌 가능성을 고려해야 함을 보여주는 결과이다[8][9]. 둘째, LED 빛의 투과력은 식품 물성의 특성상 액체로 된 식품이나 얇은 막 상태의 식품에서는 빛이 균일하게 침투하지 못하여 내부까지 충분한 살균이 어렵고, 복잡한 형태의 식품이나 용기에서는 다각적으로 광원을 배치해야 한다. 셋째, LED 빛에 노출된 식품 표면의 품질 변화 가능성이 있을 수도 있다. 일부 연구에서는 청색광 조사 시 과일 본래의 색상이 연해지는 결과가 나타났지만, 영양 성분에는 큰 변화가 없었다[10]. 하지만, 특정 파장에서 식품 성분의 분해 우려도 문제시 되고 있다. 넷째, 지금까지 대부분 연구가 실험실 규모에 한정되어 있어, 대량 생산의 산업용 전환을 위한 조사 장치, LED 램프 강도나 수명개선, 그리고 효율성 측명의 평가 등이 필요하다. 끝으로, 살균 대상인 미생물에 따라 최적의 광 파장과 조사 조건이 다르지만, 이에 대한 표준화된 지침이 없어 제품별 맞춤형 공정 개발과 안전성 검증이 필수적이다.

결론

앞으로 LED 살균 기술은 단순히 램프 성능을 높이는 한계를 넘어, 나노 기술, 사물인터넷(IoT) 센서, 천연 광감작제 등 융합을 통해 발전할 것이다. 식품의 오염을 실시간으로 제어하는 지능형 시스템과 살균 효과를 극대화하는 소재 기술을 병용하여 LED 살균은 화학 살균 · 소독제를 대체하는 지속 가능한 맞춤형 식품 안전 해결 방안이 될 것으로 사료된다.

참고 문헌

1. Dai, T., Vrahas, M. S., Murray, C. K., Hamblin, M. R. (2014). Ultraviolet C irradiation: an alternative antimicrobial approach to localized infections? *Expert Review of Anti-infective Therapy*, 10(2), 185 - 195.

2. Do., J.S., Chung, H.J., Bang, W.S. (2015). Bactericidal Effect of Pathogenic Bacteria on Acid Treatment Combined with Red, Green, and Blue LED Light at a Low Temperature Environment. *Journal of Korean Society Food Science and nutrition.* 44(11):1725-1732.

3. Endarko, E., Maclean, M., Timoshkin, I.V., MacGregor,S.J., Anderson, J. G.(2012). High-intensity 405 nm light inactivation of *Listeria monocytogenes. Photochemistry and Photobiology*l. 88(5), 1280-1286.

4. Gómez-López, V. M., Rajkovic, A., Ragaert, P., Smigic, N., Devlieghere, F. (2009). Chlorine dioxide for minimally processed produce preservation: a review. *Trends in Food Science & Technology*, 20(1), 17 - 26.

5. Hanyu Chen, H., Cheng, Y., Moraru, C.I. (2023). Blue 405 nm LED light effectively inactivates bacterial pathogens on substrates and packaging materials used in food processing. *Scientific Reports*,13:15472.

6. Hyun, J. E., Choi, C., Lee, S. Y. (2020). Synergistic effects of blue light-emitting diodes in combination with antimicrobials against *Escherichia coli* O157:H7 and their mode of action. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 231, 112079.

7. Keyvan, E., Donmez, S., Kahraman, H. A., Tutun, H.,

Calişkan, Z., Rugji, J., Keyvan, N., Şen, E., Gumus, H. (2025). Novel Photodynamic Inactivation Strategy for *Salmonella* Enteritidis PT4 on Eggshells: Exploiting the Antimicrobial Potential of Curcumin and Carvacrol. *Veterinary medicine and Science*. 11(1):1-8.

8. Kim, M.J., Mikš-Krajnik, M., Kumar, A., Ghate, V., Yuk, H.G. (2015). Antibacterial effect and mechanism of high-intensity 405 ± 5 nm light emitting diode on *Bacillus cereus*, *Listeria monocytogenes*, and *Staphylococcus aureus* under refrigerated condition. *Journal of Photochemistry and Photobiology* B. 153, 33-39.

9. Kim, M.J., Tang, C. H., Bang, W.S., Yuk, H.G (2017). Antibacterial effect of 405 ± 5 nm light emitting diode illumination against *Escherichia coli* O157:H7, *Listeria monocytogenes*, and *Salmonella* on the surface of fresh-cut mango and its influence on fruit quality. *International Journal of Food Microbiology*, 44(3), 82-89.

10. Lee, S.G., Kin, S.J., Bang, W.S., Yuk, H.G. (2024). Combined antibacterial effect of 460 nm light-emitting diode illumination and chitosan against *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella spp.* and *Listeria monocytogenes* on fresh-cut melon, and the impact of combined treatment on fruit quality. *Food Science and Biotechnology*. 33:191-2024.

11. Maclean, M., McKenzie, K., Anderson, J. G., Gettinby, G., MacGregor, S. J. (2014). 405 nm light technology for the inactivation of pathogens and its potential role for environmental disinfection and infection control. *Journal of Hospital Infection*, 88(1), 1-11.

12. Park, M. Y., and Kang, D. H. (2021). Antibacterial Activity of Caffeic Acid Combined with UV-A Light against *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella* Enterica Serovar Typhimurium, and *Listeria monocytogenes*. *Applied Environmental Microbiology*, 87(15), 1-149

13. Poonia,. A., Pandey, S., Vasundhara (2022). Effects of UVC light-emitting diodes on inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 and quality attributes of fresh-cut white pitaya. *Journal of Food measurement and Characterization*, 4, 1-10.

14. Prasad, A., Gänzle, M., Roopesh, M.S. (2019). Inactivation of *Escherichia coli* and *Salmonella* Using 365 and 395 nm High Intensity Pulsed Light Emitting Diodes. *Foods*, 12:8:978

15. Scallan, E., Hoekstra, R. M., Angulo, F. J., Tauxe, R. V., Widdowson, M. A., Roy, S. L., Griffin, P. M. (2011). Foodborne illness acquired in the United States—major pathogens. *Emerging infectious diseases*, 17(1), 7-15.

16. World Health Organization. (2015). Estimates of the global burden of foodborne diseases. *WHO Press*.

17. Ziminska, A., Lipska, I.,Gajewska, J., Draszanowska, A., Simões, M., Olszewska, M.A. (2024). Antibacterial and Antibiofilm Effects of Photodynamic Treatment with *Curcuma* L. and *Trans*-Cinnamaldehyde against *Listeria monocytogenes*. *Foodborne Pathogens and Disease Molecules*, 29, 1-15.