

Review Article

발효 식품과 미생물의 관계

이용직¹·이상재^{2,*}

¹서원대학교 바이오크스메틱학과

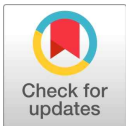
²신라대학교 식품공학전공

Relationship between Fermented Foods and Microorganisms

Yong-Jik Lee¹ and Sang-Jae Lee^{2,*}

¹Department of Bio-Cosmetics, Seowon University, Cheongju 28674, Korea

²Major in Food Biotechnology and Research Center for Extremophiles & Marine Microbiology, Silla University, Busan 46958, Korea



Received: Nov 28, 2025

Revised: Dec 17, 2025

Accepted: Dec 19, 2025

*Corresponding author :

Sang-Jae Lee

Major in Food Biotechnology and

Research Center for

Extremophiles & Marine

Microbiology, Silla University,

Busan 46958, Korea

Tel: +82-51-999-5447

E-mail: sans76@silla.ac.kr

ORCID

Yong-Jik Lee

<https://orcid.org/0000-0002-0047-2302>

Sang-Jae Lee

<https://orcid.org/0000-0002-9516-3165>

Abstract

Microbial fermentation is increasingly recognized not only as a traditional food-preservation method, but also as a core driver of culinary innovation that contributes unique flavors, aromas, and health benefits. Historically, fermentation improved food shelf-life, nutritional value, and sensory quality. However, recent scientific evidence has revealed that fermentative microorganisms can modulate the gut microbiome, interact with the immune system, and contribute to human health. This expanded understanding has positioned fermented foods as a high-value industrial sector with significant economic and functional potential. As such, advancing microbial fermentation research is essential for reimagining food value, promoting human health, and designing resilient and sustainable future food ecosystems.

Keywords

microbial, fermentation, food, relationship, health

서론

발효(fermentation)는 기원전 7,000년경부터 활용된 가장 오래된 생명공학 기술로 알려져 있으며 (Taveira *et al.*, 2021), 초기에는 식품의 보존성 향상과 독특한 풍미 부여를 위한 실용적 기술로 확립되었다. 예를 들어, 우유를 치즈로, 양배추를 사우어크라우트(sauerkraut)로 전환시켜 장기간 보존이 가능해졌으며, 이는 요구르트부터 맥주에 이르기까지 수많은 발효식품의 생산에 결정적인 역할을 해왔다(Sawant *et al.*, 2025).

발효는 학문적으로 두 가지 주요 관점에서 정의되는데 첫번째로 생화학적 관점에서 발효는 생물학적 촉매인 효소에 의한, 세포질에서 산소 없이 포도당과 같은 유기 분자를 분해하여 아데노신삼인산(ATP)을 생성하는 에너지 생산 대사 경로를 의미한다(Taveira *et al.*, 2021). 두번째로 식품 산업의 생물 공학적 관점에서는 미생물의 생물학적 활성(biological activity)에 의존하여 식품의 풍미와 외관을 변화시키고, 이로써 저장 수명을 연장하는 생물학적 변환(biotransformation) 과정이다(Lv *et al.*, 2021).

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.



과학적 정보의 축적에 따른 이해와 산업기술이 발전함에 따라, 발효 공정은 전통적인 소규모 방식에서 벗어나 통제된 대규모 자동화 공정으로 크게 발전하였다(Praveen and Brogi, 2025). 미생물은 이 과정에서 복잡하고 상호 의존적인 아미노산, 지방산, 탄수화물 대사 경로를 작동시키며, 이는 최종적으로 발효식품의 영양적 가치를 높이고 항영양 인자(antinutrient factor)를 감소시키며 기능성 화합물을 생성하는 데 결정적으로 기여한다(Sawant *et al.*, 2025).

최근에는 인체 마이크로바이옴(microbiome) 연구가 활발해지면서, 발효식품이 장내 미생물 생태계에 미치는 긍정적 영향과 그로 인한 전신 건강 증진 효과가 속속 밝혀지고 있다(Pihelgas *et al.*, 2025; Valentino *et al.*, 2024; Park and Mannaa, 2025). 실제로 스탠퍼드 의과대학 연구팀은 10주간의 발효식품 비율이 높은 식단이 장내 미생물 다양성을 높이고 염증 지표를 낮춘다는 사실을 규명하여 과학계의 큰 주목을 받았다(Wastyk *et al.*, 2021). 또한, 소비자들이 장 건강의 중요성을 깊이 인식하면서 프로바이오틱스가 풍부한 식품에 대한 수요가 증가하고 있다. 이는 발효 제품의 시장 성장을 견인하는 주요 동력이며, 이러한 변화의 중심에는 젖산균(lactic acid bacteria, LAB), 효모(yeast), 곰팡이(mold)와 같은 발효 미생물이 있다(Murata *et al.*, 2025; Yan *et al.*, 2024; Sittisart *et al.*, 2024). 식품의 발효에 활용되는 미생물들은 단순히 식품에 첨가되는 재료가 아니라, 식품의 탄수화물, 단백질, 지방을 분해하고 새로운 물질을 합성하여 그 특성을 근본적으로 바꾸는 살아있는 생물학적 공장(cell factory)이다. 이 작은 생명체들은 식품의 영양, 안전, 풍미를 넘어 인간의 건강까지 관여하

며 식품 산업의 패러다임을 바꾸고 있기에 본 논문에서는 식품 산업에서 발효를 위한 미생물의 식품 특성 변화의 역할과 인체 건강에의 영향에 관해 논의하고자 한다.

발효를 위한 미생물의 기능적 역할

영양 성분의 생체 이용률 증대 및 항영양 인자 감소

미생물 발효는 식품의 생화학적 구성을 근본적으로 변화시켜 영양 가치를 향상시키는 핵심적인 메커니즘이다. 이 과정은 발효를 위해 사용되는 미생물들이 자신이 가진 다양한 효소를 이용해 인간이 소화하기 어려운 고분자 영양소를 저분자 형태로 분해하여 영양소의 생체 이용률(bioavailability)을 높이고, 식물성 원료에 존재하는 항영양 인자를 감소시키며(Table 1), 식품 전반의 영양 성분 프로파일을 개선하는 것으로, 이는 미생물이 복잡한 다당류나 단백질을 단순한 형태로 분해하는 과정에서 나타나는 현상이다(Liu *et al.*, 2024). 특히, 단백질 가수분해를 통해 생성되는 생리활성 펩타이드(bioactive peptides)의 역할이 두드러진다(Bhattacharjee *et al.*, 2025). 미생물이 생산하는 단백질가수분해 효소(protease)는 단백질의 가수분해를 촉진하며, 이로 인해 항고혈압, 항염증, 항암, 항당뇨 활성을 포함하는 다양한 건강 증진 기능을 가진 펩타이드가 생성된다. 이렇게 생성된 펩타이드는 식단, 장내 미생물군, 인체 건강 간의 상호작용에서 중심적인 역할을 한다(Dong *et al.*, 2025; Hamadou, 2025; Singh *et al.*, 2025).

이와 함께, 곡물이나 콩류에 존재하는 피트산(phytic acid)과 같은

Table 1. Functional classification and key metabolic mechanisms of food fermentation

Functional class	Microbial action	Key products	Significance	Reference
Enhancement of bioavailability	Proteolysis, lipolysis	Bioactive peptide, amino acid, organic acid	Improving nutrient absorption, reduction of antinutritional factors, functional food development	Liu <i>et al.</i> , 2024, Bhattacharjee <i>et al.</i> , 2025, Dong <i>et al.</i> , 2025, Hamadou, 2025, Singh <i>et al.</i> , 2025, Li <i>et al.</i> , 2023.
Sensory improvement (taste/texture)	Heterolactic metabolism	Lactic acid, acetic acid, ester, aldehyde, ketone	Sour and umami taste, aroma formation, ensuring quality consistency	Akpogheli <i>et al.</i> , 2025, Okoye <i>et al.</i> , 2025, Aguirre-Garcia <i>et al.</i> , 2024, Khubber <i>et al.</i> , 2022, Terefe <i>et al.</i> , 2022.
Texture variations	Exopolysaccharide and CO ₂ production	Exopolysaccharide, CO ₂	Increasing the viscosity of dairy products (creaminess), the bloating of bread, softening of vegetable ingredients	Sawant <i>et al.</i> , 2025, Praveen and Brogi, 2025.



항영양 인자는 철, 아연, 칼슘 등 필수 미네랄과 결합하여 체내 흡수를 방해하지만, 발효 과정에서 미생물은 이러한 항영양 인자를 효과적으로 분해하여 숨겨져 있던 미네랄의 생체이용률을 크게 향상시킨다(Dong *et al.*, 2025). 또한, 발효는 기존에 없던 새로운 영양소를 만들어내기도 하는데 대표적으로 일부 유산균과 효모는 비타민 B군(B₁₂, 엽산 등)을 합성하며, 일본의 전통 발효식품인 낫토(natto)의 경우, *Bacillus subtilis*가 비타민 K₂를 다량 생성하여 뼈 건강과 심혈관 건강에 기여하는 것으로 알려져 있다(Li *et al.*, 2023). 따라서 전통 발효 미생물 생태계 분석은 높은 활성을 나타내는 다양한 가수분해 효소의 유전자를 발굴하기 위한 중요한 생물 자원 탐색(bioprospecting)의 방법으로 평가된다.

식품 보존 및 안전성 향상

발효의 가장 원초적이고 중요한 기능은 식품의 보존 기간을 획기적으로 늘리는 것으로 이는 주로 젖산균과 같은 미생물이 식품 내 탄수화물을 대사하여 젖산(lactic acid)과 초산(acetic acid) 등 다양한 유기산을 생성하며 이러한 유기산들은 식품의 pH를 급격히 낮추는 역할을 통해 천연 방부 역할을 하는 것으로 알려져 있다. 발효식품에서의 pH 저하는 대부분의 부패균과 식중독을 유발하는 병원성 미생물이 산성 환경에서 생존하거나 증식하기 어렵기에 식품의 안전성 확보에 결정적 요인으로 작용한다(Akpogheli *et al.*, 2025). 또한, 일부 젖산균은 박테리옌(bacteriocin)이라 불리는 천연 항균 펩타이드를 직접 생산하기도 한다. 니신(nisin)이나 플란타리신(plantaricin)과 같은 박테리옌은 다양한 병원성 세균의 성장을 억제하고 식품의 부패를 지연시켜 유통 기한 연장을 가능하게 하는 등 화학 보존제 없이도 식품의 안전성을 한층 더 높여주는 역할을 하는 것으로 알려져 있다. 또한, 식품 내에 존재할 수 있는 식물 독소나 곰팡이 독소와 같은 독성 물질을 분해하거나 해로움이 없도록 만들어 식품 안전성을 향상시키기도 한다. 그 대표적인 예가 카사바(cassava)의 시안화물 성분이 발효를 통해 무해해지는 것으로 알려져 있다(Okoye *et al.*, 2025; Aguirre-Garcia *et al.*, 2024; Khubber *et al.*, 2022; Terefe *et al.*, 2022).

관능적 특성 향상

발효는 식품의 영양 가치뿐만 아니라 매력적인 맛, 새로운 풍미와 질감을 부여하여 관능적 품질을 극대화 한다(Table 1). 이는 발효에 관여하는 미생물이 대사 과정에서 만들어내는 수많은 대사산물의 유기적인 반응에 의한 결과물로서 가장 잘 알려진 것이 유기산은 김치나 사우어크라우트의 상쾌한 신맛을, 알코올과 에스테르 화합물은 와인과 맥주의 독특한 향과 풍미를 결정한다(Sawant *et al.*, 2025).

된장이나 간장의 깊은 감칠맛은 콩 단백질이 아미노산으로 분해되면서 생성되며, 빵이 부풀어 오르고 부드러운 식감을 갖게 되는 것은 효모가 당을 분해하며 발생시키는 이산화탄소(CO₂) 가스에 의한 것으로 알려져 있고 요구르트 제조 시 젖산균이 생산하는 엑소폴리사카라이드(exopolysaccharides)는 요구르트를 농후하게 만들어 크리미한 질감을 부여한다(Sawant *et al.*, 2025; Praveen and Brogi, 2025). 이처럼 발효에 관여하는 미생물은 각기 다른 식품의 원료와 다양한 발효 조건 아래에서 생육을 위한 대사 활동을 통해 다양한 범위에서의 관능적 품질을 높이며, 이는 전 세계적으로 수많은 지역 특산 발효식품이 존재하는 이유이기도 하다.

미생물 발효와 인체 건강에의 역할

장내 마이크로바이옴의 조절자

현대 식품 산업에서 발효에 활용되는 미생물에 관한 관심이 높아진 배경에는 '건강 증진'이라는 새로운 가치가 있다(Table 2). 이는 단순한 식품 가공을 넘어 발효에 관여하는 미생물과 그 대사산물이 인체와 상호작용하며 건강에 미치는 긍정적 효과가 과학적으로 규명되어 알려지면서 발효식품은 기능성 식품의 핵심으로 자리 잡았으며 발효에 활용되는 미생물들은 장내 마이크로바이옴의 조절자로서 역할을 하고 있다는 것이 밝혀지고 있다(Valentino *et al.*, 2024; Caffrey *et al.*, 2025).

인체의 장에는 수십 조 개의 미생물이 서식하며 하나의 거대한 생태계, 즉 '장내 마이크로바이옴'을 구축하는데, 이 생태계의 균형은 소화, 대사, 면역 등 인체 건강 전반에 많은 영향을 미치며 발효식품은 이 균형을 긍정적으로 조절하는 강력한 수단으로 알려져 있다(Caffrey *et al.*, 2024). 또한, 발효식품을 꾸준히 섭취하면 장내 미생물 군집의 다양성이 증가하고, 비피도박테리움(*bifidobacterium*)이나 락토바실러스(*Lactobacillus*)와 같은 유익균의 비율이 높아지는 반면, 유해균의 성장은 억제되는 것이 많은 연구를 통해 알려져 있다(Wastyk *et al.*, 2021; Caffrey *et al.*, 2024; Louw *et al.*, 2023; Balasubramanian *et al.*, 2024).

특히 발효식품은 살아있는 유익균인 '프로바이오틱스(probiotics)'와 이들 유익균의 먹이가 되는 '프리바이오틱스(prebiotics)'를 동시에 함유하는 경우가 많은데 발효 과정에서 생성된 올리고당이나 변형된 식이섬유는 프리바이오틱스로 작용하는 것으로 알려져 있다. 이처럼 프로바이오틱스와 프리바이오틱스가 함께 존재하는 시스템을 '신바이오틱(synbiotic)'이라 부르며, 이는 각각을 따로 섭취하는 것보다 더 큰 시너지 효과를 발휘하여 장내 환경을 효과적으로 개선하는 것이 알려져 있다(Swanson *et al.*, 2020; Parhi *et al.*, 2024).

Table 2. Summary of the health-related effects associated major microbes for food fermentation

Health-relevant effects	Major microbes	Key metabolites	References
Balances gut microbiota, modulates gut microbiota, enhances gut barrier integrity	<i>Bifidobacterium</i> , <i>Lactobacillus</i>	Lactic acid, peptides	Wastyk <i>et al.</i> , 2021, Caffrey <i>et al.</i> , 2024, Louw <i>et al.</i> , 2023, Balasubramanian <i>et al.</i> , 2024.
Boosts immunity, immune modulation	<i>Lactobacillus</i> , <i>Leuconostoc</i> , <i>Lactococcus</i>	SCFAs, bioactive peptides	Liu <i>et al.</i> , 2025, Sharma <i>et al.</i> , 2025, Duhan <i>et al.</i> , 2025, Zheng <i>et al.</i> , 2020.
Inhibits pathogens, supports gut motility, improves lipid metabolism	<i>Leuconostoc</i> , <i>Lactobacillus</i> , <i>Bifidobacterium</i>	SCFAs, bacteriocins, organic acids, bioactive peptides	Du <i>et al.</i> , 2024, Ragavan and Hemalatha, 2024, Mandaliya <i>et al.</i> , 2025, Peres Fabbri <i>et al.</i> 2024, Chourasia <i>et al.</i> , 2023.
Cardiovascular benefits, gut flora modulation	<i>Bacillus</i>	Polyglutamic acid, nattokinase, vitamin K ₂	Pourjafar <i>et al.</i> , 2023, Hernández-Figueroa <i>et al.</i> , 2025, Sadeghi <i>et al.</i> , 2024.

인체 면역 시스템과의 상호작용

식품의 발효에 사용되는 미생물들은 인체의 면역 시스템과의 상호 작용을 통해 인체 건강에 기여하는 것으로도 알려지고 있다 (Wastyk *et al.*, 2021). 인체 면역세포의 약 70%는 장에 집중되어 있어 장 건강은 면역력과 직결되는 것으로 알려져 있으며, 식품 발효에 관여하는 미생물은 장내 마이크로바이옴을 통해 면역 시스템과 긴밀하게 소통하며 면역 항상성 유지에 핵심적인 역할을 한다 (Wastyk *et al.*, 2021). 특히, 식품 발효에 활용된 미생물과 그 대사산물은 장 점막을 구성하는 세포들 사이의 결합을 튼튼하게 하여 ‘장벽 기능(gut barrier integrity)’을 강화함으로써 유해 물질이나 병원균이 혈류로 침투하는 것을 막는 1차 방어선 역할을 하는 것으로 밝혀졌다(Dmytriv *et al.*, 2024).

또한, 식품 발효에 사용된 미생물은 장내 면역세포인 T세포와 B세포를 직접 자극하여 면역 반응을 조절하는 것이 밝혀졌는데, 예를 들면 특정 프로바이오틱스는 항체(IgA) 생성을 촉진하여 점막 면역을 강화하고, 조절 T세포의 활성을 유도하여 과도한 염증 반응을 억제하는 것으로 알려져 있으며 이러한 상호작용은 감염병 예방뿐만 아니라 알레르기, 자가면역질환과 같은 면역계 불균형으로 인한 질환을 완화하는 데도 기여할 수 있는 것이 확인됐다(Liu *et al.*, 2025; Sharma *et al.*, 2025; Duhan *et al.*, 2025; Zheng *et al.*, 2020).

살균 제품의 가치와 생리활성물질 생산 공장

전통적으로 발효식품의 건강상 이점은 살아있는 프로바이오틱스에

기인한다고 여겨졌다. 최근 몇몇 연구에서는 새로운 관점을 제시하기도 하였는데, 살균 처리되어 살아있는 균이 없는 발효식품이라도 건강에 긍정적인 영향을 미칠 수 있다는 것으로 한 임상시험에서 과민성대장증후군(IBS) 환자들에게 살균하지 않은 사워크라우트와 살균한 사워크라우트를 각각 섭취하게 한 결과, 두 그룹 모두에서 대조군 대비 증상 완화 효과가 유사하게 나타났다(Nielsen *et al.*, 2018). 이는 발효 과정에서 생성된 단쇄지방산(short-chain fatty acids, SCFAs), 펩타이드, 폴리페놀 등 다양한 생리활성물질(포스트바이오틱스) 자체가 독립적으로 건강 증진 효과를 나타낼 수 있음을 시사하는 것으로 이는 유통과 보관이 쉬운 살균 발효식품의 산업적 가치를 재평가하게 만드는 중요한 근거가 된다.

이러한 대사물질들은 살아있는 균과 별개로 인체에 유익한 기능을 수행하며 ‘포스트바이오틱스(postbiotics)’ 개념의 근간을 이룬다 (Liang and Xing, 2023; Kumar *et al.*, 2024). 그 기능이 잘 알려진 생리활성물질 중 몇 가지에 대해 살펴보면 첫번째로 단쇄지방산의 경우, 식이섬유가 장내 미생물에 의해 발효될 때 주로 생성되는 아세테이트(acetate), 프로피오네이트(propionate), 부티레이트(butyrate)는 대장 상피세포의 주요 에너지원으로 사용되어 장 건강을 지탱하고 혈류로 흡수되어 전신 염증을 조절하고, 혈당 및 지질 대사를 개선하며, 식욕 조절에도 관여하는 것이 밝혀졌다(Du *et al.*, 2024; Ragavan and Hemalatha, 2024; Mandaliya *et al.*, 2025). 두번째로 생리활성 펩타이드의 경우, 우유나 콩의 단백질이 발효 과정에서 분해되면 다양한 기능을 가진 작은 펩타이드

조각들이 생성되는데 이들은 혈압 강하, 항산화, 항균, 면역 조절 등 다양한 생리 활성을 나타내며 발효유나 발효콩 제품의 주요 건강 기능성 성분으로 주목받고 있다(Peres Fabbri *et al.* 2024; Chourasia *et al.*, 2023). 또한, 최근에는 새로운 생리활성 펩타이드를 탐색하기 위해 AI/머신러닝 기반 분석 도구를 사용해 새로운 펩타이드 탐색을 가속화하는 가능성과 한계에 대한 연구도 진행되고 있다(Habib *et al.*, 2025; Aguilera-Puga and Plisson, 2024). 마지막으로 세포외다당체(exopolysaccharides, EPS)의 경우, 케피어, 요거트 등에서 발견되는 EPS는 끈적한 질감을 형성하는 물질로, 그 자체로 프리바이오틱스로 작용하여 유익균의 성장을 돕는 것으로 알려져 있으며 일부 연구에서는 EPS가 장 점막을 보호하고 면역계를 조절하며 콜레스테롤 수치를 낮추는 효과가 있음이 밝혀졌다(Pourjafar *et al.*, 2023; Hernández-Figueroa *et al.*, 2025; Sadeghi *et al.*, 2024).

결론

식품 발효에 관여하는 미생물은 인류의 식탁과 함께 진화해 온 보이지 않는 동반자였다. 과거 생존을 위한 식품 보존 기술에서 출발하여, 독특한 맛과 향으로 식문화를 풍요롭게 만들었고, 이제는 현대인의 건강을 책임지는 핵심 요소로 그 중요성이 재조명되고 있다. 발효에 활용되는 미생물의 가치는 다층적이고 역동적이며 전통적으로 보존성, 영양성, 관능성이라는 세 가지 축을 통해 식품의 본질적 가치를 높여왔다. 현대에 와서는 장내 마이크로바이옴 조절, 면역 시스템과의 상호작용, 그리고 다양한 생리활성물질 생성을 통해 인간의 건강을 증진하는 혁신적인 역할을 수행함이 과학적으로 입증되고 있으며 이러한 건강 기능성은 발효식품을 거대한 산업적 가치를 지닌 성장 동력으로 만들었으며, 스타터 컬처(starter culture)와 같은 기술은 품질 표준화와 대량 생산을 가능하게 했다.

결론적으로, 식품 발효에 관여하는 미생물은 단순한 식품 가공 수단이 아니며, 이들은 식품의 가치를 재창조하고, 인간의 건강을 증진하며, 지속 가능한 미래를 설계하는 데 필수적인 '핵심 파트너'이다. 미지의 미생물 세계를 탐험하고 그 잠재력을 최대한 활용하려는 과학계와 산업계의 노력은 앞으로도 인류의 식탁과 건강, 그리고 지구의 미래를 더욱 풍요롭게 만들어 갈 것으로 예상된다.

감사의 글

이 논문은 2025년도 서원대학교 교내학술연구비 지원을 받아 수행된 연구임.

References

1. Taveira IC, Nogueira KMV, Oliveira DLGD and Silva RDN (2021) Fermentation: Humanity's oldest biotechnological tool. *Front. Young Minds.* **9**:568656.
2. Sawant SS, Park HY, Sim EY, Kim HS and Choi HS (2025) Microbial fermentation in food: Impact on functional properties and nutritional enhancement—A review of recent developments. *Fermentation.* **11**(1), 15.
3. Lv X, Wu Y, Gong M, Deng J, Gu Y, Liu Y, Li J, Du G, Ledesma-Amaro R, Liu L and Chen J (2021) Synthetic biology for future food: Research progress and future directions, *Future Foods.* **3**, 100025.
4. Praveen M and Brogi S (2025) Microbial fermentation in food and beverage industries: Innovations, challenges, and opportunities. *Foods.* **14**(1), 114.
5. Wastyk PS, Fragiadakis GK, Treveline SF, Dakkak I, Sonnenburg ED, McKenzie BA, Busch SE, Bay LT, Luo Q, Buss ML, Spencer SP, Fragiadakis GA, Gardner CD and Sonnenburg JL (2021) Gut-microbiota-targeted diets modulate human immune status. *Cell.* **184**(15), 3933-3945.e14.
6. Pihelgas S, Ehala-Aleksejev K, Kutti ML, Kuldjäär R and Kazantseva J (2025) Impact of fresh and fermented vegetable consumption on gut microbiota and body composition: Insights from diverse data analysis approaches. *Front Nutr.* **12**, 1623710.
7. Valentino V, Magliulo R, Farsi D, Cotter PD, O'Sullivan O, Ercolini D and De Filippis F (2024) Fermented foods, their microbiome and its potential in boosting human health. *Microb Biotechnol.* **17**(2), e14428.
8. Park I and Mannaa M (2025) Fermented foods as functional systems: Microbial communities and metabolites influencing gut health and systemic outcomes. *Foods.* **14**(13), 2292.
9. Murata R, Shim YY, Kim YJ, Reaney MJT, and Tse TJ (2025) Exploring lactic acid bacteria in food, human health, and agriculture. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition.* **65**(32), 8122-8148.
10. Yan X, He Q, Geng B and Yang S (2024) Microbial cell

- factories in the bioeconomy era: From discovery to creation. *BioDesign Res.* **6**, 0052.
11. Sittisart P, Mahidsanan T, Yuvanatemiya V and Srinamngoen P. (2024) Technological quality and fungal community of Kombucha fermented with hemp leaves and milky mushroom flour (*Calocybe indica*). *PeerJ.* **12**, e18116.
 12. Liu S, Hu J, Zhong Y, Hu X, Yin J, Xiong T, Nie S and Xie M (2024) A review: Effects of microbial fermentation on the structure and bioactivity of polysaccharides in plant-based foods. *Food Chemistry.* **440**, 137453.
 13. Bhattacharjee MJ, Bala A, Khan MR and Mukherjee AK (2025) Functional impact of bioactive peptides derived from fermented foods on diverse human populations. *Food Chemistry*, 492(1), 145416.
 14. Dong Y, Chen X, Abdelnaby T, Guyonnet V, Cai X and Wang S (2025) Regulatory potential of food-derived bioactive peptides on gut microbiota: A new perspective against immune-mediated inflammatory diseases. *J. Agric. Food Chem.* **73**(28), 17403-17416.
 15. Hamadou M (2025) Bioactive peptides and metabolic health: A mechanistic review of the impact on insulin sensitivity, lipid profiles, and inflammation. *Applied Food Research.* **5**(2), 101056.
 16. Singh BP, Santos PF, Luna-Suárez S and Martínez CJ (2025) Advances in bioactive peptides and functional properties of foods. *Frontiers in Chemistry.* **12**, 1538944.
 17. Li Z, Zheng M, Zheng J and Gänzle MG (2023) *Bacillus* species in food fermentations: An underappreciated group of organisms for safe use in food fermentations. *Current Opinion in Food Science.* **50**, 101007.
 18. Akpoghelie PO, Edo GI, Ali ABM, Yousif E, Zainulabdeen K, Owhero JO, Isoje EF, Igbuku UA, Essaghah AEA, Makia RS, Ahmed DS, Umar H and Alamiery AA (2025) Lactic acid bacteria: Nature, characterization, mode of action, products and applications. *Process Biochemistry.* **152**, 1-28.
 19. Okoye CO, Okeke ES, Ezeorba TP, Chukwudozie KI, Chiejina CO and Fomena Temgoua NS (2025) Microbial and bio-based preservatives: recent advances in antimicrobial compounds. *Microbes for Natural Food Additives.* **1**, 53-74.
 20. Aguirre-Garcia YL, Nery-Flores SD, Campos-Muzquiz LG, Flores-Gallegos AC, Palomo-Ligas L, Ascacio-Valdés JA, Sepúlveda-Torres L and Rodríguez-Herrera R (2024) Lactic acid fermentation in the food industry and bio-preservation of food. *Fermentation.* **10**(3), 168.
 21. Khubber S, Marti-Quijal FJ, Tomasevic I, Remize F and Barba FJ (2022) Lactic acid fermentation as a useful strategy to recover antimicrobial and antioxidant compounds from food and by-products. *Current Opinion in Food Science.* **43**, 189-98.
 22. Terefe ZK, Omwamba M and Nduko JM (2022) Effect of microbial fermentation on nutritional and antinutritional contents of cassava leaf. *Journal of Food Safety.* **42**(3), e12969.
 23. Caffrey EB, Perelman D, Ward CP, Sonnenburg ED, Gardner CD and Sonnenburg JL (2025) Unpacking food fermentation: Clinically relevant tools for fermented food identification and consumption. *Advances in Nutrition.* **16**(5), 100412.
 24. Caffrey EB, Sonnenburg JL and Devkota S (2024) Our extended microbiome: The human-relevant metabolites and biology of fermented foods. *Cell metabolism.* **36**(4), 684-701.
 25. Louw NL, Lele K, Ye R, Edwards CB and Wolfe BE (2023) Microbiome assembly in fermented foods. *Annual Review of Microbiology.* **77**(1), 381-402.
 26. Balasubramanian R, Schneider E, Gunnigle E, Cotter PD and Cryan JF (2024) Fermented foods: Harnessing their potential to modulate the microbiota-gut-brain axis for mental health. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews.* **158**, 105562.
 27. Swanson KS, Gibson GR, Hutkins R, Reimer RA, Reid G, Verbeke K, Scott KP, Holscher HD, Azad MB, Delzenne NM and Sanders ME (2020) The International Scientific Association for Probiotics and Prebiotics (ISAPP) consensus statement on the definition and scope of synbiotics. *Nat. Rev.*

- Gastroenterol Hepatol.* **17**, 687-701.
28. Parhi P, Liu SO and Choo WS (2024) Synbiotics: Effects of prebiotics on the growth and viability of probiotics in food matrices. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre.* **32**, 100462.
 29. Dmytriv TR, Storey KB and Lushchak VI (2024) Intestinal barrier permeability: the influence of gut microbiota, nutrition, and exercise. *Front. Physiol.* **15**, 1380713.
 30. Zheng D, Liwinski T and Elinav E (2020) Interaction between microbiota and immunity in health and disease. *Cell Res.* **30**, 492-506.
 31. Liu Y, Cao X, Liu H and Zhang W (2025) The crosstalk between probiotics and T cell immunity. *Front. Immunol.* **16**, 1695840.
 32. Sharma A, Sharma G and Im SH (2025) Gut microbiota in regulatory T cell generation and function: mechanisms and health implications. *Gut Microbes.* **17**(1), 2516702.
 33. Nielsen ES, Garnås E, Jensen KJ, Hansen LH, Olsen PS, Ritz C, Krych L and Nielsen DS (2018) Lacto-fermented sauerkraut improves symptoms in IBS patients independent of product pasteurisation - a pilot study. *Food Funct.* **9**(10), 5323-5335.
 34. Liang B and Xing D (2023) The current and future perspectives of postbiotics. *Probiotics & Antimicro. Prot.* **15**, 1626-1643.
 35. Kumar A, Green KM and Rawat MA (2024) Comprehensive overview of postbiotics with a special focus on discovery techniques and clinical applications. *Foods.* **13**(18), 2937.
 36. Du Y, He C, An Y, Huang Y, Zhang H, Fu W, Wang M, Shan Z, Xie J, Yang Y and Zhao B (2024) The role of short chain fatty acids in inflammation and body health. *International Journal of Molecular Sciences.* **25**(13), 7379.
 37. Ragavan ML and Hemalatha S (2024) The functional roles of short chain fatty acids as postbiotics in human gut: future perspectives. *Food Sci Biotechnol.* **33**, 275-285.
 38. Mandaliya DK, Patel S and Seshadri S (2025) Postbiotic potential of SCFAs on metaflammation and gut microbiota alteration in diabetes. *J Biosci.* **50**, 57.
 39. Peres Fabbri L, Cavallero A, Vidotto F and Gabriele M (2024) Bioactive peptides from fermented foods: production approaches, sources, and potential health benefits. *Foods.* **13**(21), 3369.
 40. Chourasia R, Chiring Phukon L, Abedin MM, Padhi S, Singh SP and Rai AK (2023) Bioactive peptides in fermented foods and their application: a critical review. *Syst Microbiol and Biomanuf.* **3**, 88-109.
 41. Habib HM, Ismail R, Agami M and El-Yazbi AF (2025) Exploring the impact of bioactive peptides from fermented milk proteins: A review with emphasis on health implications and artificial intelligence integration. *Food Chemistry.* **481**, 144047.
 42. Aguilera-Puga, MD and Plisson F (2024) Structure-aware machine learning strategies for antimicrobial peptide discovery. *Scientific Reports.* **14**(1), 11995.
 43. Pourjafar H, Ansari F, Sadeghi A, Samakkhah SA and Jafari SM (2023) Functional and health-promoting properties of probiotics' exopolysaccharides: isolation, characterization, and applications in the food industry. *Crit Rev Food Sci Nutr.* **63**(26), 8194-8225.
 44. Hernández-Figueroa RH, López-Malo A and Mani-López E (2025) Lactic acid bacteria-derived exopolysaccharides: Dual roles as functional ingredients and fermentation agents in food applications. *Fermentation.* **11**(9), 538.
 45. Sadeghi M, Haghshenas B and Nami Y (2024) *Bifidobacterium* exopolysaccharides, new insights into engineering strategies, physicochemical functions, and immunomodulatory effects on host health. *Front. Microbiol.* **15**, 1396308.