

EDJ

(Eduscience Development Journal)

Volume 08, Nomor 02, Juli – Desember 2026

Makanan dari Udara: Tren Investasi dan Publikasi Perusahaan Protein Alternatif (*Air Protein, Solar Foods*) sebagai Respons Krisis Pangan

Penulis : Aldi Adi Pratama, Arya Avif Alviansyah

Sumber: Eduscience Development Journal (EDJ) Volume 08, Nomor 02, Juli - Desember 2026

Makanan dari Udara: Tren Investasi dan Publikasi Perusahaan Protein Alternatif (*Air Protein, Solar Foods*) sebagai Respons Krisis Pangan

Aldi Adi Pratama¹⁾, Arya Avif Alviansyah²⁾

^{1,2)} Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

aldi.adi@ui.ac.id

ABSTRACT

Global food security faces a dual threat from population growth projected to reach 9.7 billion by 2050 and increasingly unpredictable climate change, which has reduced wheat and maize yields while elevated atmospheric CO₂ concentrations diminish the protein content of staple grains. Amid these compounding pressures, gas fermentation technology utilizing hydrogen-oxidizing bacteria (HOB) has emerged as a non-photosynthetic pathway for producing high-quality protein directly from air, water, and renewable electricity, independent of arable land. This study employs a qualitative desk research approach, synthesizing secondary data from credible institutional reports, regulatory documentation, and peer-reviewed literature to examine the technical principles, ecological efficiency, financial viability, and regulatory landscape of gas fermentation, using Solar Foods and Air Protein as case studies. Findings indicate that both companies have achieved meaningful technical and regulatory milestones including novel food approval, GRAS status, and patent portfolios yet face persistent barriers in consumer acceptance, driven by food neophobia and product unfamiliarity. While the technology's independence from arable land and irrigation aligns conceptually with recommended food security diversification strategies, current commercial production capacity remains marginal relative to global protein demand, compounded by a recent decline in fermentation sector investment. This study concludes that HOB-based gas fermentation should be regarded not as a singular or immediate solution to the global food crisis, but as one promising component within a medium- to long-term protein diversification portfolio.

Keywords: *Gas Fermentation, Hydrogen-Oxidizing Bacteria, Alternative Protein, Food Security, Solar Foods, Air Protein*

ABSTRAK

Ketahanan pangan global dihadapkan pada ancaman ganda: pertumbuhan populasi yang diproyeksikan mencapai 9,7 miliar jiwa pada 2050, serta perubahan iklim yang semakin sulit diprediksi, yang menekan hasil panen gandum dan jagung sekaligus menurunkan kandungan protein biji-bijian akibat meningkatnya konsentrasi CO₂ atmosfer. Di tengah tekanan yang saling terkait ini, teknologi gas *fermentation* berbasis *hydrogen-oxidizing bacteria* (HOB) muncul sebagai jalur produksi protein non-fotosintetik yang memanfaatkan udara, air, dan listrik terbarukan, tanpa bergantung pada lahan subur. Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif berbasis kajian literatur (*desk research*), mensintesis data sekunder dari laporan lembaga kredibel, dokumen regulasi, dan literatur ilmiah untuk mengkaji prinsip teknis, efisiensi

ekologis, kelayakan finansial, serta peta regulasi teknologi gas *fermentation*, dengan *Solar Foods* dan *Air Protein* sebagai studi kasus. Hasil kajian menunjukkan bahwa kedua perusahaan telah mencapai tonggak signifikan dari sisi teknis dan regulasi, termasuk persetujuan novel food, status GRAS, dan portofolio paten, namun masih menghadapi hambatan dalam penerimaan konsumen akibat neofobia pangan dan ketidaktahuan konsumen terhadap produk tersebut. Meskipun independensi teknologi ini terhadap lahan subur dan irigasi selaras secara konseptual dengan strategi diversifikasi pangan yang direkomendasikan oleh berbagai kajian ketahanan pangan, kapasitas produksi komersial saat ini masih marjinal dibandingkan dengan kebutuhan protein dunia, yang diperparah oleh tren penurunan investasi pada sektor fermentasi belakangan ini. Penelitian ini menyimpulkan bahwa gas *fermentation* berbasis HOB lebih tepat dipandang sebagai satu komponen yang menjanjikan dalam portofolio diversifikasi protein jangka menengah–panjang, bukan solusi tunggal maupun instan bagi krisis pangan global.

Kata kunci: *gas fermentation; hydrogen-oxidizing bacteria; protein alternatif; ketahanan pangan; solar foods; air protein*

PENDAHULUAN

Upaya mewujudkan ketahanan pangan global yang berkelanjutan dihadapkan pada tantangan berat seiring laju pertumbuhan penduduk. Laporan PBB memproyeksikan populasi dunia akan menyentuh 8,5 miliar pada 2030 dan 9,7 miliar pada 2050, yang menuntut perubahan mendasar pada sistem produksi dan konsumsi pangan (*"Feeding the Future Global Population,"* 2024). Persoalannya bukan hanya soal jumlah mulut yang harus diberi makan, tetapi juga soal iklim yang semakin sulit diprediksi. Ketahanan pangan global dihadapkan pada ancaman ganda dari perubahan iklim. Gelombang panas dan cuaca ekstrem yang lebih sering terjadi telah menekan hasil panen gandum dan jagung, dua tanaman pangan yang paling banyak digantungkan dunia. Selain cuaca ekstrem dan gelombang panas yang menurunkan produktivitas komoditas utama seperti gandum dan jagung, peningkatan konsentrasi CO₂ di atmosfer secara langsung mengganggu homeostasis nutrisi tanaman dengan mereduksi kandungan protein pada biji-bijian (Bloom et al., 2026). Kajian bibliometrik terhadap ratusan artikel ilmiah bereputasi mengungkapkan bahwa dampak krisis ini bersifat sistemik. Ancaman tersebut tidak hanya mengganggu produksi fisik, melainkan mengevaluasi secara menyeluruh seluruh pilar ketahanan pangan mencakup ketersediaan, stabilitas pasokan, keterjangkauan akses, hingga efektivitas pemanfaatan gizi (Anshida et al., 2026).

Tekanan ekologis tidak bekerja secara terisolasi. Konflik geopolitik seperti perang Rusia–Ukraina secara nyata mengekspos kerentanan rantai pasok gandum dan pupuk global, menyusul disrupsi distribusi dan aksesibilitas pangan yang sebelumnya telah dipicu oleh pandemi COVID-19 (Jia et al., 2024). Dampak dari akumulasi guncangan sistemik ini tidak lagi sebatas kalkulasi teoritis maupun proyeksi statistik. Realitasnya, ratusan juta jiwa di berbagai belahan dunia saat ini menghadapi kerawanan pangan akut yang berada pada taraf krisis hingga darurat (Saccone & Vallino, 2025). Di tengah ancaman krisis pangan global, reformulasi sumber protein menjadi agenda prioritas utama. Produksi protein konvensional terutama dari sektor peternakan membutuhkan alokasi lahan dan air yang sangat tinggi per satuan kalori. Kondisi ini mendorong pergeseran fokus riset global menuju pemanfaatan sumber protein alternatif di luar sistem pertanian dan peternakan konvensional (Choręziak et al., 2025).

Di antara berbagai inovasi protein alternatif seperti protein berbasis nabati, serangga, maupun kultur sel teknologi fermentasi gas (*gas fermentation*) menawarkan terobosan transformatif. Melalui proses *Power-to-Protein*, bakteri pengoksidasi hidrogen (*hydrogen-oxidizing bacteria*/HOB atau bakteri Knallgas) mampu menyintesis protein berkualitas tinggi

secara langsung dari komponen air, N₂, CO₂, dan H₂ tanpa bergantung pada lahan pertanian (Pander et al., 2020). Perlu diketahui, konsep bioteknologi ini bukanlah penemuan baru. Landasan teoretisnya dapat ditelusuri dari riset NASA pada dekade 1960-an hingga 1970-an mengenai sistem penopang hidup daur tertutup untuk misi antariksa jangka panjang. Riset tersebut bertujuan untuk mereduksi karbon dioksida hasil respirasi astronot menjadi nutrisi berbasis mikroba (Alvarado et al., 2021). Gagasan ilmiah yang sempat tertidur ini kini direvitalisasi oleh sektor industri dan riset komersial sebagai jawaban atas krisis pangan global.

Dalam ranah implementasi industri, *Solar Foods* asal Finlandia menjadi salah satu pionir terdepan melalui produk proteinnya yang dinamai Solein. Proses produksinya mengandalkan bioproses berbasis fermentasi gas: air dielektrolisis untuk menghasilkan hidrogen, yang kemudian dicampur dengan karbon dioksida dari udara. Campuran gas tersebut dialirkan ke dalam bioreaktor sebagai nutrisi bagi bakteri pengoksidasi hidrogen hingga berkembang menjadi biomassa sel tunggal kaya protein (Savioli & Tuomala, 2026). Yang kedua adalah *Air Protein*, perusahaan asal California yang menempuh jalur serupa dengan menumbuhkan *hydrogenotrophs* untuk menghasilkan tepung protein dengan profil asam amino yang diklaim menyerupai protein hewan, prinsip dasarnya sejalan dengan mekanisme *hydrogen-oxidizing bacteria* yang telah dikaji dalam literatur ilmiah (Alvarado et al., 2021). Kehadiran kedua perusahaan ini tidak luput dari perhatian investor global maupun lembaga think tank pangan seperti Good Food Institute (GFI), yang setiap tahun menerbitkan laporan rinci mengenai kemana arah uang mengalir di sektor protein alternatif termasuk temuan bahwa hingga 2024 tercatat 165 perusahaan yang berfokus pada protein berbasis fermentasi, dengan lebih dari 200 perusahaan lain menjalankan lini bisnis terkait (*The Good Food Institute*, 2025).

Hal ini memicu diskursus penting mengenai sejauh mana inovasi protein berbasis udara ini dapat diandalkan sebagai solusi konkrit atas ancaman krisis pangan dunia, alih-alih sekadar pencapaian laboratorium yang masih berjarak dari realitas pasar. Berangkat dari pemikiran tersebut, artikel ini mengkaji secara bertahap aspek teknis, efisiensi ekologis, kelayakan finansial, serta peta regulasi dari penerapan *gas fermentation* pada kasus *Solar Foods* dan *Air Protein*, yang seluruhnya didasarkan pada sintesis data sekunder dan publikasi teruji.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif berbasis kajian literatur (*desk research/systematic literature review*) atas data sekunder. Metode ini dipilih karena sifat topik yang bersinggungan langsung dengan data eksklusif milik perusahaan (*Solar Foods* dan *Air Protein*) yang tidak memungkinkan dilakukannya replikasi eksperimen atau simulasi independen oleh penulis. Oleh karena itu, penelitian ini murni bersifat pengumpulan, penyaringan, dan sintesis data dari publikasi yang telah ada, tanpa disertai uji laboratorium, pengujian bioreaktor, maupun pemodelan/simulasi komputasi baru.

Kriteria Data

a. Laporan resmi lembaga/organisasi kredibel non-blog

Laporan tahunan *State of the Industry/State of Alternative Proteins* dari Good Food Institute (GFI), organisasi nirlaba yang secara khusus memantau data investasi dan kebijakan pangan protein alternatif secara global, serta data dan pernyataan resmi (siaran pers, laman sains resmi) dari *Solar Foods* dan *Air Protein* sebagai subjek studi kasus.

b. Dokumen regulasi

Informasi resmi terkait status persetujuan pangan baru dari otoritas seperti Singapore Food Agency (SFA), Badan Pengawas Obat dan Makanan Amerika Serikat (FDA/status GRAS), serta proses evaluasi European Food Safety Authority (EFSA). Kriteria eksklusi diterapkan secara ketat: seluruh artikel blog pribadi, situs berita populer tanpa proses redaksi ilmiah, forum diskusi daring, dan konten pemasaran yang tidak memiliki keterkaitan langsung dengan data resmi perusahaan atau jurnal, tidak digunakan sebagai rujukan analitis utama dalam pembahasan substantif artikel ini.

Prosedur Pengumpulan dan Pengolahan Data

Prosedur penelitian dilakukan dalam empat tahap: (1) penelusuran basis data ilmiah dan laman resmi lembaga/perusahaan menggunakan kata kunci "*gas fermentation protein*", "*hydrogen-oxidizing bacteria*", "*single-cell protein*", "*microbial protein life cycle assessment*", "*alternative protein investment*", dan "*food security climate change*"; (2) penyaringan (*screening*) hasil pencarian berdasarkan kredibilitas sumber dan relevansi tematik; (3) ekstraksi data kualitatif dan kuantitatif (misalnya angka investasi tahunan, efisiensi konversi biomassa, dan hasil analisis daur hidup/LCA) langsung dari nilai yang telah dilaporkan dalam publikasi asli, tanpa dilakukan penghitungan ulang atau pemodelan tambahan oleh penulis; serta (4) sintesis tematik data ke dalam kerangka pembahasan yang terstruktur berdasarkan aspek teknologi, lingkungan, ekonomi/investasi, regulasi, dan penerimaan sosial.

Batasan Penelitian

1. Penelitian ini tidak melibatkan eksperimen laboratorium, uji bioreaktor, maupun simulasi komputasi baru; seluruh data teknis (misalnya efisiensi konversi, hasil LCA) diambil apa adanya dari publikasi yang telah ada.
2. Data komersial dan operasional *Solar Foods* serta *Air Protein* yang digunakan bersifat terbuka (*publicly disclosed*) melalui publikasi ilmiah, laporan lembaga, dan pernyataan resmi perusahaan; data internal, *proprietary*, atau rahasia dagang (*trade secret*) di luar publikasi tersebut tidak dapat diakses maupun dianalisis.
3. Angka investasi bersifat dinamis dan dapat berubah cepat sesuai kondisi pasar modal ventura global; angka yang disajikan merupakan potret data pada periode publikasi laporan rujukan (GFI, 2023–2026) dan tidak mencerminkan kondisi pasar setelah periode tersebut.
4. Perbandingan dampak lingkungan (LCA) antar studi memiliki keterbatasan metodologis karena perbedaan batas sistem (*system boundary*), skenario bauran energi listrik yang digunakan, serta asumsi alokasi yang berbeda antara penelitian; artikel ini menyajikan rentang temuan tersebut apa adanya tanpa melakukan harmonisasi ulang.
5. Kajian ini bersifat deskriptif-analitis dan tidak dimaksudkan untuk menghasilkan rekomendasi kebijakan definitif, melainkan sintesis bukti ilmiah yang tersedia hingga periode penelusuran dilakukan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Prinsip Teknologi *Gas Fermentation*: Bagaimana Udara Menjadi Protein

Secara ilmiah, teknologi yang mendasari klaim "makanan dari udara" bukanlah fiksi maupun metafora, melainkan aplikasi bioteknologi industri yang disebut *gas fermentation*, dengan bakteri *hydrogen-oxidizing bacteria* (HOB) atau dikenal pula sebagai bakteri Knallgas

(misalnya spesies *Cupriavidus necator*) sebagai agen biologis utamanya (Pander et al., 2020). Bakteri ini bersifat kemolitotrof (*chemolithoautotroph*), yakni memperoleh energi bukan dari cahaya matahari sebagaimana tumbuhan berfotosintesis, melainkan dari oksidasi gas hidrogen (H₂), sedangkan sumber karbonnya diperoleh dari fiksasi karbon dioksida (CO₂) melalui siklus Calvin-Benson-Bassham.

Dalam praktiknya, proses produksi dimulai dengan elektrolisis air menggunakan energi listrik (idealnya energi terbarukan) untuk menghasilkan gas hidrogen dan oksigen. Ketiga gas utama karbon dioksida, hidrogen, dan oksigen kemudian dialirkan ke dalam bioreaktor bersama nutrisi mineral dan nitrogen untuk menumbuhkan biomassa mikroba secara kontinu (Ercili-Cura et al., 2020). Biomassa yang telah tumbuh kemudian dipisahkan dari cairan dan dikeringkan menjadi bubuk protein dengan kandungan protein mencapai kisaran 65–80 persen dari berat kering, disertai serat pangan, lemak sehat, zat besi, dan vitamin B. Prinsip yang serupa, dengan perbedaan pada formulasi nutrisi dan strain mikroba, diterapkan pula oleh *Air Protein*, yang secara historis mengklaim keterkaitan konseptualnya dengan riset NASA era 1960-an mengenai sistem pangan siklus tertutup bagi misi antariksa jangka panjang (Alvarado et al., 2021).

Efisiensi konversi energi matahari menjadi biomassa pada produksi protein mikrobial berbasis gas *fermentation* dapat mencapai sekitar 10 persen, jauh melampaui batas teoritis efisiensi fotosintesis tanaman pangan konvensional yang hanya sekitar 6 persen (Ercili-Cura et al., 2020). Karakteristik inilah yang menjadi argumen ilmiah utama mengapa jalur produksi protein non-fotosintetik ini berpotensi menghasilkan protein per satuan energi dan lahan yang jauh lebih efisien dibandingkan pertanian konvensional (Solar Foods, 2026).

Profil Perusahaan dan Kematangan Teknologi: *Solar Foods* dan *Air Protein*

Solar Foods, perusahaan asal Finlandia, memulai riset awalnya di lembaga riset VTT *Technical Research Centre of Finland* bersama LUT *University* sebelum resmi berdiri sebagai perusahaan rintisan pada 2017. Produknya, Solein, telah mencapai tahap komersialisasi dengan dibukanya fasilitas produksi skala komersial pertama ("*Factory 01*") di Vantaa, Finlandia, pada 2024 dengan kapasitas awal 160 ton per tahun, dan tengah merancang fasilitas kedua ("*Factory 02*") di Lappeenranta yang ditargetkan mampu memproduksi hingga 6.400 ton per tahun. Dari sisi kekayaan intelektual, perusahaan ini telah memperoleh paten produksi di Amerika Serikat, Uni Eropa, Kanada, Australia, dan Tiongkok (Solar Foods, 2026).

Sementara itu, *Air Protein*, perusahaan yang berbasis di California, Amerika Serikat, dan didirikan oleh Lisa Dyson dan John Reed, mengembangkan proses serupa dengan menumbuhkan *hydrogenotrophs* untuk menghasilkan tepung protein dengan profil asam amino yang disebut menyerupai protein daging (The Curt Bergfors Foundation, 2024). Perusahaan ini tercatat sebagai salah satu semifinalis kompetisi XPRIZE *Feed the Next Billion* senilai 15 juta dolar Amerika Serikat (XPRIZE Foundation, 2021), serta tergabung dalam konsorsium program Cornucopia yang didanai *Defense Advanced Research Projects Agency* (DARPA) Amerika Serikat untuk mengembangkan sistem produksi protein mikrobial berskala kecil dan portabel (Defense Advanced Research Projects Agency, 2023).

Dari sisi regulasi, Solein tercatat sebagai *gas-fermented microbial* protein pertama di dunia yang memperoleh persetujuan pangan baru (*novel food*), yakni dari Singapore Food Agency (SFA) pada 2022 (GFI India, 2026). Perusahaan kemudian memperoleh status *self-affirmed Generally Recognized as Safe* (GRAS) di Amerika Serikat pada September 2024 dan tengah mengajukan proses evaluasi ilmiah kepada European Food Safety Authority (EFSA) untuk pasar Uni Eropa,

dengan proyeksi persetujuan pada 2026 (Solar Foods, 2025). Jalur regulasi Uni Eropa disebut relatif lebih ketat dan lambat dibandingkan Singapura maupun Amerika Serikat karena mekanisme evaluasi risiko EFSA yang komprehensif serta proses pengambilan keputusan oleh negara-negara anggota (Ro, 2024).

Regulasi dan Penerimaan Konsumen terhadap Protein Non-Konvensional

Kajian sistematis yang dipublikasikan pada jurnal *Foods* (MDPI, 2024) mengenai determinan penerimaan konsumen terhadap pangan baru di Uni Eropa menemukan bahwa neofobia pangan (*food neophobia*), ketidaktahuan produk (*unfamiliarity*), dan minimnya pengetahuan konsumen merupakan hambatan utama penerimaan pangan hasil aplikasi mikroba, sementara kesediaan membayar (*willingness to pay*) cenderung tinggi ketika manfaat lingkungan dikomunikasikan secara jelas (Laureati et al., 2024).

Tinjauan sistematis lain yang dipublikasikan menegaskan bahwa neofobia pangan tetap menjadi penghalang paling sering disebutkan dalam literatur terkait penerimaan tren pangan baru, dan bahwa faktor situasional seperti diperkenalkannya suatu inovasi pangan di tengah situasi krisis pangan atau kesehatan dapat memperberat maupun mempercepat penerimaan publik tergantung konteksnya (Siddiqui et al., 2022a). Studi tinjauan sistematis lain juga menunjukkan bahwa penerimaan konsumen terhadap protein alternatif sangat bervariasi antarjenis sumber protein, dipengaruhi oleh motif pemilihan pangan, keakraban (*familiarity*), rasa jijik (*disgust*), dan norma budaya setempat (Siddiqui et al., 2022b).

Relevansi terhadap Respons Krisis Pangan Global

Dikaitkan dengan konteks krisis pangan global, karakteristik utama teknologi *gas fermentation* yakni independensi terhadap lahan subur, air irigasi, dan siklus musim tanam secara konseptual selaras dengan kebutuhan diversifikasi sumber pangan yang direkomendasikan berbagai kajian ketahanan pangan akibat perubahan iklim (Mutale et al., 2025). Produksi yang dapat dilakukan di lokasi non-arable termasuk kawasan gurun, wilayah kutub, maupun perkotaan padat berpotensi mengurangi ketergantungan rantai pasok pangan terhadap kondisi geografis dan iklim spesifik suatu kawasan (Anshida et al., 2026).

Namun demikian, sejumlah kajian ilmiah menegaskan bahwa kontribusi nyata teknologi ini terhadap krisis pangan global masih bersifat potensial dan berskala terbatas dibandingkan skala kebutuhan pangan dunia. Kapasitas produksi komersial Solein saat ini (160 ton per tahun pada Factory 01, dengan target 6.400 ton per tahun pada Factory 02) masih jauh lebih kecil dibandingkan skala produksi protein pangan dunia secara agregat (Solar Foods, 2026). Sementara data investasi GFI menunjukkan tren pendanaan sektor fermentasi justru menurun dalam dua tahun terakhir (The Good Food Institute, 2026). Kesenjangan antara potensi ilmiah dan realisasi skala industri inilah yang menjadi fokus utama kehati-hatian ilmiah dalam menilai posisi teknologi ini terhadap krisis pangan global saat ini.

Sejalan dengan hal tersebut, tinjauan mengenai hambatan adopsi teknologi bioproses berbasis HOB menyoroti bahwa untuk memperluas manfaatnya melampaui produksi protein sel tunggal (*single-cell protein*), diperlukan pengembangan lanjutan pada rekayasa metabolik dan biologi sintetik guna menjadikan HOB sebagai *cell factory* presisi fermentasi yang lebih luas cakupan produknya (Bernal-Cabas et al., 2026). Maka, kontribusi teknologi ini terhadap krisis

pangan global lebih tepat dipandang sebagai bagian dari portofolio diversifikasi sumber protein jangka menengah-panjang, bukan solusi tunggal maupun instan.

KESIMPULAN

Teknologi *gas fermentation* berbasis *hydrogen-oxidizing bacteria* (HOB) merupakan aplikasi bioteknologi industri yang telah terbukti secara ilmiah, memungkinkan produksi protein dari karbon dioksida, hidrogen, dan air tanpa bergantung pada lahan pertanian. *Solar Foods* dan *Air Protein* menjadi dua pionir industri yang telah mencapai tonggak signifikan dari sisi teknis dan regulasi, meski jalur menuju pasar Uni Eropa masih lebih ketat dan penerimaan konsumen terhadap protein mikroba masih menghadapi hambatan neofobia pangan. Relevansi teknologi ini terhadap krisis pangan global bersifat konseptual sekaligus terbatas secara skala. Independensinya dari lahan subur, air irigasi, dan musim tanam sejalan dengan kebutuhan diversifikasi sumber pangan, namun kapasitas produksi komersial saat ini masih jauh dari cukup untuk memenuhi skala kebutuhan protein dunia, dan tren investasi sektor ini justru menurun dalam dua tahun terakhir. Pengembangan lanjutan pada rekayasa metabolik juga masih diperlukan agar teknologi ini dapat berkembang melampaui produksi protein sel tunggal. Dengan demikian, *gas fermentation* berbasis HOB lebih tepat dipandang sebagai satu komponen dalam portofolio diversifikasi sumber protein jangka menengah-panjang, bukan solusi tunggal maupun instan bagi krisis pangan global.

DAFTAR PUSTAKA

- Alvarado, K. A., García Martínez, J. B., Matassa, S., Egbejimba, J., & Denkenberger, D. (2021). Food in space from hydrogen-oxidizing bacteria. *Acta Astronautica*, 180, 260–265. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.12.009>
- Anshida, M., Murugan, P. P., Senthilkumar, M., Chandrakumar, M., Vanitha, G., Janaki Rani, A., & Arvind, G. (2026). Impact of climate change on food security: A systematic literature review and bibliometric analysis. *Sustainable Futures*, 11, Article 101826. <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2026.101826>
- Bernal-Cabas, M., Kumar, K., Terpstra, O., van den Bogaard, S., Ammar, A. B., Mäkinen, S., Herwig, L., de Almeida, M., Tervasmäki, P., Blank, L. M., Alter, T. B., & Billerbeck, S. (2026). Food production from air: Gas precision fermentation with hydrogen-oxidising bacteria. *Trends in Biotechnology*, 44(4), 906–920. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2025.08.003>
- Bloom, A. J., Shi, X., & Hannon, N. M. (2026). How plants may maintain protein homeostasis under rising atmospheric CO₂. *Plant, Cell & Environment*, 49, 2654–2672. <https://doi.org/10.1111/pce.70412>
- Choręziak, A., Rosiejka, D., Michałowska, J., & Bogdański, P. (2025). Nutritional quality, safety and environmental benefits of alternative protein sources—An overview. *Nutrients*, 17(7), Article 1148. <https://doi.org/10.3390/nu17071148>
- Defense Advanced Research Projects Agency. (2023, February 3). Teams begin work to develop tasty food from air, water, and electricity. DARPA. <https://www.darpa.mil/news/2023/food-air-water-electricity>
- Ercili-Cura, D., Häkämies, A., Sinisalo, L., Vainikka, P., & Pitkänen, J.-P. (2020). Food out of thin air. *Food Science and Technology*, 34(2), 44–48. https://doi.org/10.1002/fsat.3402_12.x

- Feeding the future global population. (2024). *Nature Communications*, 15, Article 222. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-44588-y>
- GFI India. (2026). Novel food regulations around the world. Good Food Institute India. <https://gfi-india.org/novel-food-regulations-around-the-world/>
- Jia, N., Xia, Z., Li, Y., Yu, X., Wu, X., Li, Y., Su, R., Wang, M., Chen, R., & Liu, J. (2024). The Russia-Ukraine war reduced food production and exports with a disparate geographical impact worldwide. *Communications Earth & Environment*, 5, Article 765. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01915-5>
- Laureati, M., De Boni, A., Saba, A., Lamy, E., Minervini, F., Delgado, A. M., & Sinesio, F. (2024). Determinants of consumers' acceptance and adoption of novel food in view of more resilient and sustainable food systems in the EU: A systematic literature review. *Foods*, 13(10), Article 1534. <https://doi.org/10.3390/foods13101534>
- Mutale, B., Dai, S., Chen, Z., & Maulu, S. (2025). Enhancing food security amid climate change: assessing impacts and developing adaptive strategies. *Cogent Food & Agriculture*, 11(1). <https://doi.org/10.1080/23311932.2025.2519800>
- Pander, B., Mortimer, Z., Woods, C., McGregor, C., Dempster, A., Thomas, L., Maliepaard, J., Mansfield, R., Rowe, P., & Krabben, P. (2020). Hydrogen oxidising bacteria for production of single-cell protein and other food and feed ingredients. *Engineering Biology*, 4(2), 21–24. <https://doi.org/10.1049/enb.2020.0005>
- Ro, C. (2024, October 20). Protein from air has a complex path to EU approval. *Forbes*. <https://www.forbes.com/sites/christinero/2024/10/20/protein-from-air-has-a-complex-path-to-eu-approval/>
- Saccone, D., & Vallino, E. (2025). Global food security in a turbulent world: Reviewing the impacts of the pandemic, the war and climate change. *Agricultural and Food Economics*, 13(1), Article 47. <https://doi.org/10.1186/s40100-025-00388-0>
- Savioli, P., & Tuomala, A.-M. (2026). Hydrogen-oxidizing bacteria as a catalyst for a post-agricultural food system. *LAB Pro*. <https://www.labopen.fi/en/lab-pro/hydrogen-oxidizing-bacteria-as-a-catalyst-for-a-post-agricultural-food-system/>
- Siddiqui, S. A., Zannou, O., Karim, I., Kasmia, Awad, N. M. H., Gołaszewski, J., Heinz, V., & Smetana, S. (2022a). Avoiding food neophobia and increasing consumer acceptance of new food trends—A decade of research. *Sustainability*, 14(16), Article 10391. <https://doi.org/10.3390/su141610391>
- Siddiqui, S. A., Alvi, T., Sameen, A., Khan, S., Blinov, A. V., Nagdalian, A. A., Mehdizadeh, M., Adli, D. N., & Onwezen, M. (2022b). Consumer acceptance of alternative proteins: A systematic review of current alternative protein sources and interventions adapted to increase their acceptability. *Sustainability*, 14(22), Article 15370. <https://doi.org/10.3390/su142215370>
- Solar Foods. (2025, February 3). Solar Foods moves one step closer to introducing Solein® to the European market [Press release]. <https://view.news.eu.nasdaq.com/view?id=bd8c8a882b7fbf5cadb56cb4a6a9564fa&lang=en>
- Solar Foods. (2026, April 15). Solar Foods receives patent in the United States for the production process of Solein® [Press release]. <https://solarfoods.com/solar-foods-receives-patent-in-the-united-states-for-the-production-process-of-solein/>

- The Curt Bergfors Foundation. (2024). Air Protein – Making meat out of air. Food Planet Prize.
<https://foodplanetprize.org/initiatives/air-protein-making-meat-out-of-air/>
- The Good Food Institute. (2026). State of the industry report: Fermentation.
<https://gfi.org/resource/fermentation-state-of-the-industry-report/>
- XPRIIZE Foundation. (2021, July 13). In competition to discover tomorrow's proteins, XPRIIZE unveils semifinalist teams in XPRIIZE Feed the Next Billion.
<https://www.xprize.org/prizes/feedthenextbillion/articles/feed-the-next-billion-announce-semifinalist>