

NANOTEKNOLOGI DAN BIOTEKNOLOGI DALAM INOVASI PANGAN

Tim Penulis:

Yohanes Harvinda
Kun Mardiwati Rahayu
Philipus Uli Basa Hutabarat
Indah Kusumaningrum
Lalu Unsunnidhal
Firman Fajar Perdhana

ISBN 978-634-255-499-3



9

786342

556993

NANOTEKNOLOGI DAN BIOTEKNOLOGI DALAM INOVASI PANGAN

**Yohanes Harvinda
Kun Mardiwati Rahayu
Philipus Uli Basa Hutabarat
Indah Kusumaningrum
Lalu Unsunnidhal
Firman Fajar Perdhana**



GET PRESS INDONESIA

NANOTEKNOLOGI DAN BIOTEKNOLOGI DALAM INOVASI PANGAN

Penulis :

Yohanes Harvinda
Kun Mardiwati Rahayu
Philipus Uli Basa Hutabarat
Indah Kusumaningrum
Lalu Unsunnidhal
Firman Fajar Perdhana

ISBN : 978-634-255-699-3

Editor : Mila Sari., S.ST., M.Si

Penyunting : Tri Putri Wahyuni., S.Pd

Desain Sampul dan Tata Letak : Atyka Trianisa, S.Pd

Penerbit : GET PRESS INDONESIA

Anggota IKAPI No. 033/SBA/2022

Redaksi :

Jln. Palarik Air Pacah No 26 Kel. Air Pacah
Kec. Koto Tangah Kota Padang Sumatera Barat
Website : www.getpress.co.id
Email : adm.getpress@gmail.com

Cetakan pertama, Agustus 2026

Hak cipta dilindungi undang-undang
Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk dan
dengan cara apapun tanpa izin tertulis dari penerbit.

KATA PENGANTAR

Segala Puji dan syukur atas kehadiran Allah SWT dalam segala kesempatan. Sholawat beriring salam dan doa kita sampaikan kepada Nabi Muhammad SAW. Alhamdulillah atas Rahmat dan Karunia-Nya penulis telah menyelesaikan Buku Nanoteknologi Dan Bioteknologi Dalam Inovasi Pangan ini.

Buku Ini Membahas : Pendahuluan: Peran Teknologi dalam Transformasi Pangan, Dasar-Dasar Nanoteknologi dan Bioteknologi, Bioteknologi dalam Produksi Pangan: Fermentasi, Enzim, dan Kultur Sel, Nano-enkapsulasi untuk Nutrisi dan Suplemen Fungsional, Analisis Risiko dan Dampak Kesehatan Konsumen, Perspektif Industri: Implementasi Nanoteknologi dan Bioteknologi di Sektor Pangan.

Proses penulisan buku ini berhasil diselesaikan atas kerjasama tim penulis. Demi kualitas yang lebih baik dan kepuasan para pembaca, saran dan masukan yang membangun dari pembaca sangat kami harapkan.

Penulis ucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah mendukung dalam penyelesaian buku ini. Terutama pihak yang telah membantu terbitnya buku ini dan telah mempercayakan mendorong, dan menginisiasi terbitnya buku ini. Semoga buku ini dapat bermanfaat bagi masyarakat Indonesia.

Padang, Juli 2026

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR TABEL	vi
DAFTAR GAMBAR	vii
BAB 1 PERAN TEKNOLOGI DALAM TRANSFORMASI PANGAN	1
1.1 Tantangan Global dan Transformasi Sistem Pangan	1
1.2 Evolusi Teknologi Pangan: Dari Tradisional ke Modern.....	5
1.2.1 Teknologi Pangan Tradisional: Fondasi Awal Pengolahan Pangan	6
1.2.2 Revolusi Industri dan Modernisasi Teknologi Pangan.....	7
1.2.3 Era Digital dan Industry 4.0 dalam Teknologi Pangan.....	8
1.2.4 Pergeseran Paradigma: Dari Kuantitas ke Kualitas dan Fungsionalitas	9
1.2.5 Peran Inovasi Teknologi dalam Efisiensi dan Daya Saing Industri Pangan.....	11
1.3 Peran Nanoteknologi dalam Transformasi Pangan	12
1.3.1 Karakteristik Material Nano dan Keunggulannya.....	13
1.3.2 Aplikasi Nanoteknologi dalam Pengolahan dan Pengawetan Pangan.....	15
1.3.3 Nanoteknologi dalam Keamanan dan Kualitas Pangan.....	16
1.3.4 Potensi dan Tantangan Implementasi Nanoteknologi dalam Pangan.....	16
1.3.5 Peran Strategis Nanoteknologi dalam Sistem Pangan Masa Depan	18
1.4 Peran Bioteknologi dalam Inovasi dan Produksi Pangan	19
1.5 Integrasi Nanoteknologi dan Bioteknologi dalam Sistem Pangan Masa Depan	22
1.5.1 Konsep dan Prinsip <i>Nano-Bio Convergence</i>	23
1.5.2 Sinergi Aplikasi: <i>Nano-Delivery System</i> dan Biosensor.....	24

1.5.3 Peran dalam Pangan Fungsional, Keamanan, dan <i>Personalized Nutrition</i>	25
1.5.4 Arah Masa Depan: <i>Precision Food Systems</i> dan Inovasi Berkelanjutan	26
1.5.5 Tantangan: Regulasi, Keamanan, dan Penerimaan Konsumen.....	26
DAFTAR PUSTAKA	28
BAB 2 DASAR-DASAR NANOTEKNOLOGI DAN BIOTEKNOLOGI	31
2.1 Nanoteknologi	32
2.2 Bioteknologi	33
2.3 Integrasi Nanoteknologi dan Bioteknologi Dalam Inovasi Pangan.....	36
2.4 Keunggulan dan Keterbatasan Nanobioteknologi Dalam Inovasi Pangan	42
2.4.1 Keunggulan Nanobioteknologi Pangan	42
2.4.2 Keterbatasan dan Tantangan Nanobioteknologi	43
2.5 Relevansi Nanobioteknologi Dalam Inovasi Pangan	45
DAFTAR PUSTAKA	48
BAB 3 BIOTEKNOLOGI DALAM PRODUKSI PANGAN FERMENTASI, ENZIM, DAN KULTUR SEL	53
3.1 Definisi dan Peran Mikroba dalam Fermentasi	53
3.2 Enzim sebagai Katalisator Biologis	54
3.3 Kultur Sel dalam Produksi Pangan.....	55
3.4 Fermentasi Substrat Padat (SSF) dan Cair (SmF) Modern	56
3.4.1 Keunggulan dan Keterbatasan SSF.....	57
3.4.2 Keunggulan & Keterbatasan SmF	57
3.4.3 Fermentasi Presisi (<i>Precision Fermentation</i>)	57
3.4.4 Fermentasi Biomassa.....	58
3.5 Teknologi Enzim (Biokatalisis) dalam Transformasi Pangan	60
3.5.1 Peran Enzim sebagai Biokatalisator Spesifik	60
3.5.2 Aplikasi Enzim Berdasarkan Sektor Pangan	62
3.5.3 Inovasi Ekstraksi dan Imobilisasi Enzim.....	63
3.6 Pertanian Seluler (<i>Cellular Agriculture</i>) dan Kultur Sel... 63	
3.6.1 Daging Budidaya (<i>Cultured/Lab-grown Meat</i>)	65

3.6.2 Bioteknologi Sel Tumbuhan (<i>Plant Cell Culture</i>).....	67
3.7 Sinergi Enzim, Fermentasi, dan Kultur Sel dalam Produksi Pangan.....	68
DAFTAR PUSTAKA	70
BAB 4 NANO-ENKAPSULASI UNTUK NUTRISI DAN SUPLEMEN FUNGSIONAL	75
4.1 Sistem pengantar dan bahan penyalut	76
4.2 Metode dan proses nano-enkapsulasi	77
4.3 Pengaruh Terhadap Stabilitas Dan Bioavailabilitas	82
4.4 Aplikasi penggunaan teknologi nanokapsulasi pada makanan	84
4.5 Aplikasi pada vitamin dan mineral	85
4.6 Aplikasi pada senyawa bioaktif dan antioksidan	87
4.7 Suplemen fungsional dan pangan fungsional	88
4.8 Aspek keamanan dan regulasi	91
DAFTAR PUSTAKA	93
BAB 5 ANALISIS RISIKO DAN DAMPAK KESEHATAN KONSUMEN	95
5.1 Latar Belakang Risiko Kesehatan Konsumen	95
5.2 Konsep Dasar Analisis Risiko Kesehatan	98
5.3 Jenis-Jenis Risiko yang Dihadapi Konsumen	100
5.4 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Besarnya Risiko Kesehatan	103
5.5 Dampak Kesehatan Konsumen dalam Jangka Pendek dan Jangka Panjang	105
5.6 Strategi Mitigasi dan Pengendalian Risiko bagi Konsumen	107
DAFTAR PUSTAKA	111
BAB 6 PERSPEKTIF INDUSTRI: IMPLEMENTASI NANOTEKNOLOGI DAN BIOTEKNOLOGI DI SEKTOR PANGAN	115
6.1 Lanskap Pasar dan Potensi Ekonomi Global	117
6.2 Transisi Teknologi Laboratorium ke Industri	118
6.2.1 Tantangan Skalabilitas Produksi.....	119
6.2.2 Standarisasi dan Kontrol Kualitas.....	119
6.2.3 Strategi Hilirisasi	120
6.3 Analisis Biaya-Manfaat dan Nilai Tambah.....	120

6.3.1 Struktur Biaya	121
6.3.2 Penciptaan Nilai Tambah Produk.....	121
6.4 Ekosistem Inovasi.....	122
6.4.1 Sinergi Penta Helix.....	123
6.4.2 Strategi Start-up dan Manajemen Kekayaan Intelektual.....	125
6.5 Mitigasi Risiko dan Kepatuhan Industri.....	127
6.6 Penerimaan Konsumen.....	128
6.7 Integrasi Ekonomi Sirkular Keberlanjutan	130
6.8 Penutup	131
DAFTAR PUSTAKA	133
BIODATA PENULIS	

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1. Bahan Pangan Berpotensi sebagai Penyalut dalam Teknologi Nanopartikel	78
Tabel 4.2. Contoh kasus penerapan metode nano- enkapsulasi untuk nutrisi dan senyawa bioaktif.....	81
Tabel 4.3. Contoh Penerapan Enkapsulasi pada Berbagai Senyawa Bioaktif dan Antioksidan	88
Tabel 4.4. Contoh Integrasi Nano-Enkapsulasi pada Suplemen dan Pangan Fungsional	90

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Konsep Sistem Pangan.....	2
Gambar 1.2. Dimensi Utama Sistem Pangan Global	5
Gambar 1.3. Perubahan Teknologi Tradisional ke Modern.....	6
Gambar 1.4. Pembuatan Ikan Asin Tradisional di Indonesia	7
Gambar 1.5. Faktor Pendorong Utama Transformasi Digital di Pabrik Pintar	8
Gambar 1.6. Jenis Pangan Fungsional, Bahan Bioaktif, dan Produk Umum	10
Gambar 1.7. Paradigma Operasional Rantai Pasokan Pangan 4.0.	11
Gambar 1.8. Ilustrasi Ukuran dan Skala Nanoteknologi.....	13
Gambar 1.9. Perbedaan Nanoemulsi dan Emulsi Biasa	14
Gambar 1.10. Perbedaan Nanoemulsi dan Emulsi Biasa	15
Gambar 1.11. Mekanisme Toksisitas Nanopartikel.....	17
Gambar 1.12. Penerapan Nanoteknologi di Berbagai Bidang Industri Makanan.....	18
Gambar 1.13. Perbedaan Bioteknologi: Tradisional dan Modern.....	19
Gambar 1.14. Mekanisme Aksi Probiotik.....	21
Gambar 1.15. Integrasi Nanoteknologi dan Bioteknologi....	23
Gambar 1.16. Migrasi Struktur Nano dari Permukaan Kemasan ke Makanan	25
Gambar 1.15. Nanoteknologi dalam Keamanan Pangan.....	27
Gambar 2.1. Bioteknologi Konvensional	35
Gambar 2.2. Bioteknologi Modern dan Rekayasa Genetika.....	36
Gambar 2.3. Keterbatasan dan tantangan Nanobioteknologi	45
Gambar 2.4. Relevansi Nanobioteknologi dalam Inovasi Pangan	47
Gambar 4.1. Metode Sintesis Nanopartikel.....	80
Gambar 4.2. Mekanisme Peningkatan Stabilitas oleh Nanaoenkapsulasi.....	84

Gambar 6.1. Pengembangan sektor makanan dan minuman pada Peta Jalan *Making Indonesia* 4.0 pada tahun 2030116

Gambar 6.2. Perkiraan perkembangan pasar *nanofood* global sampai tahun 2035117

Gambar 6.3. Peta kolaborasi Pentahelix.....124

Gambar 6.4. Konsep Ekonomi Sirkular130

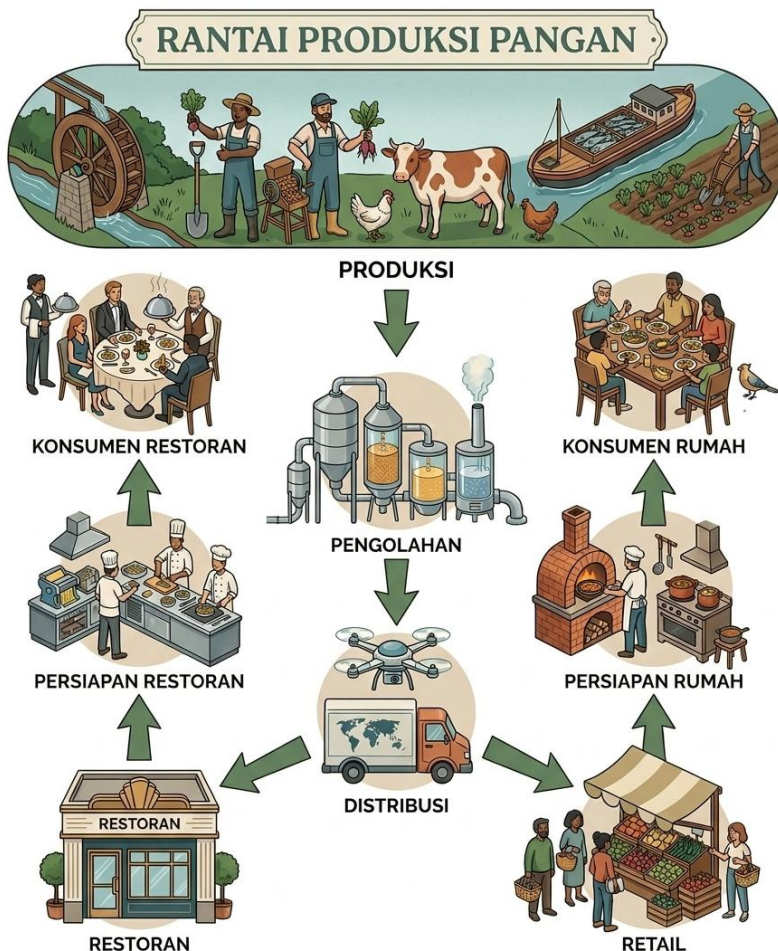
BAB 1

PERAN TEKNOLOGI DALAM TRANSFORMASI PANGAN

1.1 Tantangan Global dan Transformasi Sistem Pangan

Sistem pangan (*food system*) merupakan suatu kesatuan kompleks yang mencakup seluruh proses yang terlibat dalam penyediaan pangan, mulai dari produksi, pengolahan, distribusi, hingga konsumsi dan pengelolaan limbah pangan. Sistem ini tidak hanya melibatkan aspek teknis dan ekonomi, tetapi juga mencakup dimensi sosial, lingkungan, dan kebijakan yang saling terintegrasi. Menurut FAO, sistem pangan mencakup seluruh aktor, aktivitas, dan interaksi yang menentukan produksi, distribusi, dan konsumsi pangan, serta dampaknya terhadap kesehatan manusia dan lingkungan (FAO, 2023).

Secara struktural, sistem pangan terdiri atas beberapa komponen utama, yaitu: (1) produksi pangan (pertanian, perikanan, peternakan), (2) pascapanen dan pengolahan, (3) distribusi dan logistik, (4) konsumsi, serta (5) pengelolaan limbah pangan. Setiap komponen ini saling terkait dan membentuk suatu rantai nilai (*food value chain*) yang menentukan ketersediaan, aksesibilitas, dan kualitas pangan. Gangguan pada salah satu komponen dapat berdampak signifikan terhadap keseluruhan sistem, sebagaimana terlihat pada krisis pangan global akibat pandemi dan perubahan iklim dalam beberapa tahun terakhir.



Gambar 1.1. Konsep Sistem Pangan
(Sumber : Generate AI Gemini 3, 2026)

Dalam konteks global, sistem pangan saat ini menghadapi berbagai tantangan kompleks yang bersifat multidimensional. Salah satu tantangan utama adalah pertumbuhan populasi dunia yang diproyeksikan mencapai sekitar 9,7 miliar pada tahun 2050. Peningkatan jumlah penduduk ini secara langsung berdampak pada meningkatnya permintaan pangan, baik dari segi kuantitas maupun kualitas. Menurut Godfray *et al.* (2010), untuk memenuhi kebutuhan

tersebut, produksi pangan global perlu meningkat secara signifikan tanpa memperluas tekanan terhadap sumber daya alam yang terbatas.

Selain itu, perubahan iklim menjadi faktor kritis yang memengaruhi stabilitas sistem pangan. Perubahan pola curah hujan, peningkatan suhu global, serta frekuensi kejadian ekstrem seperti kekeringan dan banjir telah berdampak pada produktivitas pertanian dan perikanan. Dampak ini tidak hanya menurunkan hasil produksi, tetapi juga memengaruhi kualitas pangan serta meningkatkan kerentanan terhadap hama dan penyakit. HLPE (2020) menegaskan bahwa perubahan iklim berpotensi memperburuk ketidakstabilan pangan, khususnya di negara berkembang yang sangat bergantung pada sektor primer.

Permasalahan lain yang signifikan adalah tingginya tingkat kehilangan dan pemborosan pangan (*food loss and food waste*). *Food loss* umumnya terjadi pada tahap produksi, pascapanen, dan distribusi, sedangkan *food waste* lebih banyak terjadi pada tingkat ritel dan konsumsi. Parfitt *et al.* (2010) melaporkan bahwa sekitar sepertiga dari total produksi pangan global hilang atau terbuang setiap tahunnya. Kondisi ini tidak hanya berdampak pada efisiensi sistem pangan, tetapi juga berkontribusi terhadap emisi gas rumah kaca dan pemborosan sumber daya seperti air dan energi.

Di sisi lain, sistem pangan global juga menghadapi tantangan dalam bentuk malnutrisi yang kompleks. Malnutrisi tidak lagi hanya diartikan sebagai kekurangan gizi (*undernutrition*), tetapi juga mencakup kelebihan gizi (*overnutrition*) dan kekurangan mikronutrien (*micronutrient deficiency*). Fenomena ini dikenal sebagai “*double burden of malnutrition*”, di mana masalah kekurangan dan kelebihan gizi dapat terjadi secara bersamaan dalam suatu populasi. FAO (2023) menunjukkan bahwa meskipun produksi pangan global meningkat, distribusi dan akses terhadap pangan bergizi masih belum merata, sehingga menyebabkan ketimpangan status gizi di berbagai wilayah.

Menghadapi berbagai tantangan tersebut, diperlukan transformasi sistem pangan yang tidak hanya berfokus pada peningkatan produksi, tetapi juga pada efisiensi, keberlanjutan, dan ketahanan sistem secara keseluruhan. Transformasi ini tidak dapat

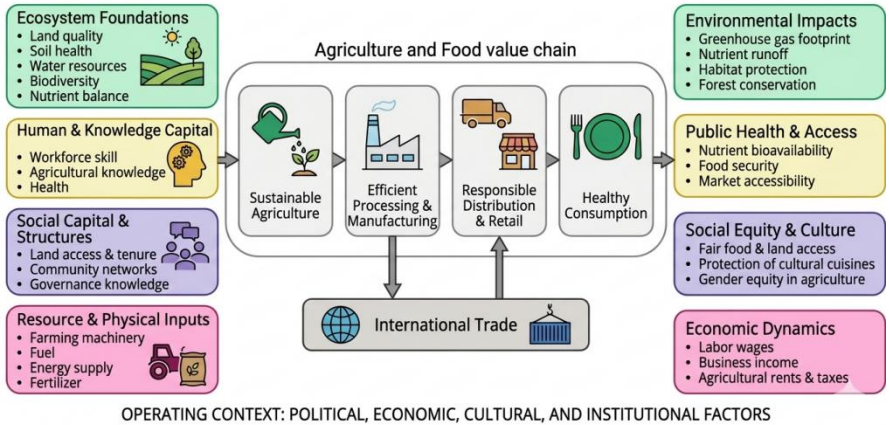
dilepaskan dari peran teknologi sebagai enabler utama. Inovasi teknologi, termasuk nanoteknologi dan bioteknologi, memiliki potensi besar dalam meningkatkan efisiensi produksi, memperpanjang umur simpan produk, meningkatkan nilai gizi, serta menjamin keamanan pangan. Selain itu, integrasi teknologi digital seperti *Internet of Things* (IoT), kecerdasan buatan (AI), dan big data juga memungkinkan pengelolaan sistem pangan yang lebih presisi dan adaptif terhadap perubahan lingkungan.

Konsep ketahanan pangan (*food security*) menjadi kerangka utama dalam memahami tujuan dari transformasi sistem pangan. Ketahanan pangan didefinisikan sebagai kondisi di mana semua orang, setiap saat, memiliki akses fisik, sosial, dan ekonomi terhadap pangan yang cukup, aman, dan bergizi untuk memenuhi kebutuhan hidup aktif dan sehat (FAO, 2023). Ketahanan pangan mencakup empat dimensi utama, yaitu ketersediaan (*availability*), akses (*access*), pemanfaatan (*utilization*), dan stabilitas (*stability*). Keempat dimensi ini harus dipenuhi secara simultan agar sistem pangan dapat dikatakan tangguh.

Sejalan dengan itu, konsep keberlanjutan (*sustainability*) juga menjadi aspek penting dalam pengembangan sistem pangan modern. Sistem pangan yang berkelanjutan harus mampu memenuhi kebutuhan pangan saat ini tanpa mengorbankan kemampuan generasi mendatang untuk memenuhi kebutuhannya. Hal ini mencakup pengelolaan sumber daya alam secara efisien, pengurangan emisi gas rumah kaca, serta perlindungan keanekaragaman hayati. Pendekatan ini sejalan dengan tujuan pembangunan berkelanjutan (*Sustainable Development Goals/SDGs*), khususnya tujuan ke-2 (*Zero Hunger*) dan ke-12 (*Responsible Consumption and Production*).

Dengan demikian, dinamika sistem pangan global saat ini menunjukkan adanya kebutuhan mendesak untuk transformasi yang berbasis ilmu pengetahuan dan teknologi. Integrasi antara inovasi teknologi, kebijakan yang tepat, serta peningkatan kesadaran konsumen menjadi kunci dalam menciptakan sistem pangan yang tangguh, berkelanjutan, dan mampu menjawab tantangan masa depan.

Global Food System Model



Gambar 1.2. Dimensi Utama Sistem Pangan Global
(Sumber : Generate AI Gemini 3, 2026)

1.2 Evolusi Teknologi Pangan: Dari Tradisional ke Modern

Perkembangan teknologi pangan merupakan refleksi dari dinamika kebutuhan manusia terhadap pangan yang aman, bergizi, tahan lama, dan mudah diakses. Evolusi ini berlangsung secara bertahap, dimulai dari metode tradisional berbasis pengalaman empiris hingga menuju sistem modern yang terintegrasi dengan teknologi canggih. Transformasi tersebut tidak hanya meningkatkan efisiensi produksi, tetapi juga mengubah paradigma sistem pangan secara fundamental.



Gambar 1.3. Perubahan Teknologi Tradisional ke Modern
(Sumber : Generate AI Gemini 3, 2026)

1.2.1 Teknologi Pangan Tradisional: Fondasi Awal Pengolahan Pangan

Pada tahap awal peradaban manusia, teknologi pangan berkembang secara sederhana dan berbasis pada observasi terhadap alam. Metode tradisional seperti pengeringan, fermentasi, penggaraman, dan pengasapan merupakan teknik utama yang digunakan untuk memperpanjang umur simpan bahan pangan. Pengeringan, misalnya, bekerja dengan mengurangi kadar air sehingga menghambat pertumbuhan mikroorganisme pembusuk. Sementara itu, fermentasi memanfaatkan aktivitas mikroba untuk menghasilkan produk dengan cita rasa khas sekaligus meningkatkan stabilitas dan nilai gizi pangan.

Metode-metode tersebut memiliki karakteristik utama berupa penggunaan energi alami, teknologi sederhana, dan ketergantungan pada kondisi lingkungan. Meskipun demikian, teknik tradisional terbukti efektif dan masih digunakan hingga saat ini, khususnya dalam produksi pangan lokal dan pangan fungsional berbasis budaya. Fellows (2017) menyatakan bahwa banyak teknologi modern sebenarnya merupakan pengembangan lebih lanjut dari prinsip dasar yang telah digunakan dalam metode tradisional.



Gambar 1.4. Pembuatan Ikan Asin Tradisional di Indonesia
(Sumber : Falahi Mubarak/Mongabay Indonesia, 2022)

Namun, keterbatasan teknologi tradisional mulai terlihat seiring dengan meningkatnya kebutuhan pangan dalam jumlah besar dan tuntutan kualitas yang lebih konsisten. Variabilitas hasil, keterbatasan skala produksi, serta rendahnya kontrol terhadap keamanan pangan menjadi tantangan utama yang mendorong munculnya inovasi teknologi pada tahap berikutnya.

1.2.2 Revolusi Industri dan Modernisasi Teknologi Pangan

Perkembangan signifikan dalam teknologi pangan terjadi pada masa revolusi industri, yang ditandai dengan mekanisasi proses produksi dan penggunaan energi berbasis mesin. Penemuan mesin uap pada abad ke-18 memungkinkan peningkatan kapasitas produksi secara signifikan, termasuk dalam pengolahan pangan. Salah satu inovasi penting pada periode ini adalah proses pasteurisasi yang dikembangkan oleh Louis Pasteur pada abad ke-19, yang menjadi tonggak dalam pengendalian mikroorganisme patogen dalam pangan (Hassoun *et al.*, 2023).

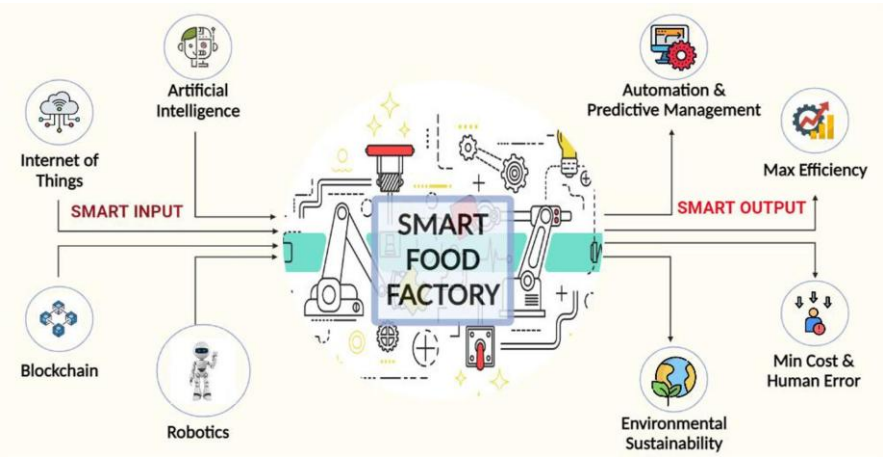
Selanjutnya, revolusi industri kedua dan ketiga memperkenalkan listrik, otomasi, serta teknologi pendinginan dan pembekuan. Teknologi ini memungkinkan pengawetan pangan dalam skala besar dan distribusi jarak jauh tanpa mengorbankan kualitas. Selain itu, pengembangan teknologi pengalengan (*canning*),

iradiasi, dan pengeringan modern semakin memperluas variasi produk pangan yang tersedia di pasar.

Pada tahap ini, industri pangan mulai beralih dari sistem produksi berbasis rumah tangga menuju industri berskala besar dengan standar kualitas yang lebih terkontrol. Efisiensi, standarisasi, dan keamanan pangan menjadi fokus utama dalam pengembangan teknologi.

1.2.3 Era Digital dan Industry 4.0 dalam Teknologi Pangan

Memasuki abad ke-21, perkembangan teknologi pangan mengalami percepatan signifikan dengan munculnya konsep Industry 4.0, yang mengintegrasikan teknologi digital, sistem fisik, dan kecerdasan buatan dalam proses produksi. Industry 4.0 ditandai dengan penggunaan teknologi seperti *Internet of Things* (IoT), *artificial intelligence* (AI), *big data analytics*, robotika, dan sensor cerdas yang saling terhubung dalam suatu sistem produksi yang terintegrasi (Romanello & Veglio, 2022).



Gambar 1.5. Faktor Pendorong Utama Transformasi Digital di Pabrik Pintar
(Sumber : Hassoun *et al.*, 2023)

Dalam konteks pangan, konsep ini dikenal sebagai *Food Industry 4.0* atau *Food Processing 4.0*, yang memungkinkan otomatisasi dan digitalisasi proses produksi secara menyeluruh.

Teknologi ini memberikan berbagai keuntungan, antara lain peningkatan efisiensi produksi, pengurangan biaya operasional, peningkatan kualitas dan keamanan pangan, serta pengurangan limbah (Hassoun *et al.*, 2023).

Salah satu teknologi kunci dalam era ini adalah IoT, yang memungkinkan pengumpulan data secara real-time melalui sensor yang terpasang pada berbagai tahapan produksi. Data tersebut kemudian dianalisis menggunakan big data dan AI untuk mendukung pengambilan keputusan yang lebih cepat dan akurat. IoT juga memungkinkan pemantauan kondisi produksi, distribusi, dan penyimpanan secara kontinu, sehingga meningkatkan transparansi dan *traceability* dalam rantai pasok pangan (Dadhaneeya *et al.*, 2023).

Selain itu, teknologi seperti blockchain mulai digunakan untuk menjamin keamanan dan transparansi informasi dalam sistem pangan, sementara teknologi seperti *digital twin* dan *3D food printing* membuka peluang baru dalam inovasi produk pangan (Bisht *et al.*, 2024).

1.2.4 Pergeseran Paradigma: Dari Kuantitas ke Kualitas dan Fungsionalitas

Seiring dengan perkembangan teknologi, terjadi pergeseran paradigma dalam sistem pangan. Pada masa awal, fokus utama adalah pada peningkatan produksi untuk memenuhi kebutuhan pangan (*food quantity*). Namun, saat ini perhatian bergeser ke aspek kualitas, keamanan, dan nilai tambah pangan.

Konsumen modern tidak hanya menginginkan pangan yang cukup, tetapi juga aman, bergizi, dan memiliki manfaat kesehatan tambahan. Hal ini mendorong berkembangnya konsep pangan fungsional (*functional foods*), *personalized nutrition*, serta produk berbasis kesehatan. McClements (2020) menekankan bahwa masa depan pangan tidak hanya ditentukan oleh ketersediaan, tetapi juga oleh kemampuan teknologi dalam meningkatkan kualitas dan fungsi pangan.



Gambar 1.6. Jenis Pangan Fungsional, Bahan Bioaktif, dan Produk Umum

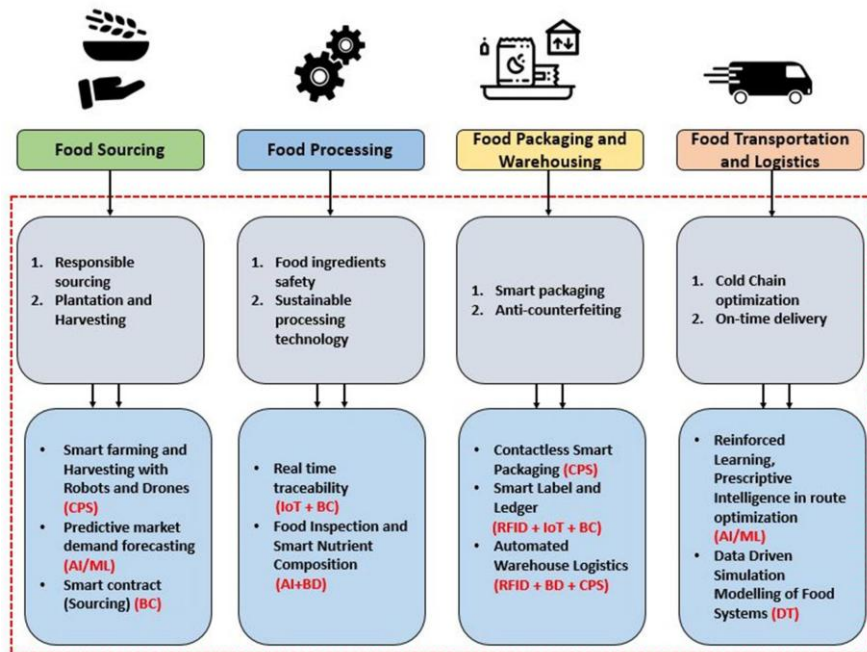
(Sumber : Yuan *et al.*, 2024)

Selain itu, isu keberlanjutan juga menjadi faktor penting dalam pergeseran paradigma ini. Industri pangan dituntut untuk mengurangi dampak lingkungan melalui efisiensi penggunaan sumber daya, pengurangan limbah, dan pengembangan produk ramah lingkungan. Teknologi modern memainkan peran penting dalam mencapai tujuan tersebut melalui optimasi proses dan inovasi produk.

1.2.5 Peran Inovasi Teknologi dalam Efisiensi dan Daya Saing Industri Pangan

Inovasi teknologi menjadi faktor kunci dalam meningkatkan daya saing industri pangan di era globalisasi. Perusahaan yang mampu mengadopsi teknologi baru secara efektif akan memiliki keunggulan dalam hal efisiensi produksi, kualitas produk, dan kemampuan memenuhi kebutuhan pasar yang terus berkembang.

Penerapan teknologi seperti otomatisasi dan robotika memungkinkan peningkatan produktivitas serta pengurangan ketergantungan pada tenaga kerja manual. Sementara itu, penggunaan AI dan big data memungkinkan prediksi permintaan pasar, optimasi rantai pasok, serta pengembangan produk yang lebih sesuai dengan preferensi konsumen.



Gambar 1.7. Paradigma Operasional Rantai Pasokan Pangan 4.0.
(Sumber : Abideen *et al.*, 2021)

Lebih lanjut, integrasi teknologi dalam sistem pangan juga membuka peluang untuk pengembangan model bisnis baru, seperti *smart food systems* dan *precision food production*. Model ini

memungkinkan produksi pangan yang lebih adaptif, efisien, dan berkelanjutan.

Dengan demikian, evolusi teknologi pangan menunjukkan bahwa inovasi tidak hanya berfungsi sebagai alat untuk meningkatkan produksi, tetapi juga sebagai strategi utama dalam menciptakan sistem pangan yang tangguh, berkelanjutan, dan berorientasi pada kebutuhan masa depan.

1.3 Peran Nanoteknologi dalam Transformasi Pangan

Nanoteknologi merupakan salah satu inovasi ilmiah yang berkembang pesat dan memiliki potensi besar dalam mentransformasi sistem pangan modern. Secara umum, nanoteknologi didefinisikan sebagai ilmu dan rekayasa material pada skala nanometer, yaitu berkisar antara 1 hingga 100 nm, di mana material menunjukkan sifat fisik, kimia, dan biologis yang berbeda dibandingkan dengan skala makroskopiknya. Dalam konteks pangan, nanoteknologi mencakup desain, produksi, dan aplikasi struktur nano untuk meningkatkan kualitas, keamanan, stabilitas, serta nilai fungsional produk pangan (Cushen *et al.*, 2012).

Penerapan nanoteknologi dalam sistem pangan menjadi semakin relevan seiring dengan meningkatnya tuntutan terhadap produk pangan yang tidak hanya aman dan bergizi, tetapi juga memiliki karakteristik khusus seperti bioavailabilitas tinggi, umur simpan panjang, dan kemampuan memberikan manfaat kesehatan tambahan. Nanoteknologi menawarkan pendekatan inovatif untuk menjawab tantangan tersebut melalui manipulasi struktur material pada tingkat molekuler.



Gambar 1.8. Ilustrasi Ukuran dan Skala Nanoteknologi
(Sumber : www.epa.gov, 2026)

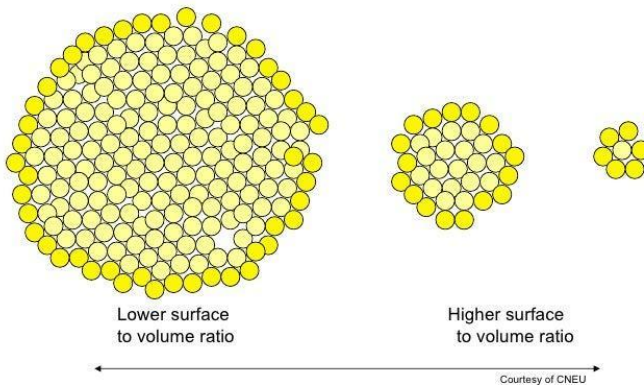
1.3.1 Karakteristik Material Nano dan Keunggulannya

Salah satu alasan utama pemanfaatan nanoteknologi dalam pangan adalah karakteristik unik material nano yang tidak dimiliki oleh material konvensional. Pada skala nano, material memiliki luas permukaan yang sangat besar relatif terhadap volumenya. Kondisi ini

meningkatkan reaktivitas kimia dan interaksi dengan lingkungan sekitarnya, sehingga memungkinkan efisiensi yang lebih tinggi dalam berbagai aplikasi pangan.

Selain itu, material nano juga menunjukkan peningkatan dalam hal kelarutan dan bioavailabilitas. Senyawa bioaktif yang sebelumnya sulit larut dalam air, seperti vitamin lipofilik atau senyawa antioksidan, dapat diformulasikan dalam bentuk nano sehingga lebih mudah diserap oleh tubuh. McClements dan Xiao (2017) menjelaskan bahwa nanoemulsi, misalnya, mampu meningkatkan stabilitas dan ketersediaan hayati senyawa bioaktif melalui peningkatan luas permukaan dan perlindungan terhadap degradasi selama proses pencernaan.

The very high surface to volume ratio of nanoparticles



Copyright April 2009 The Pennsylvania State University

Gambar 1.9. Perbedaan Nanoemulsi dan Emulsi Biasa
(Sumber :The Pennsylvania State University, 2009)

Karakteristik lain yang penting adalah kemampuan material nano untuk berfungsi sebagai sistem penghantaran (*delivery system*) yang efisien. Struktur nano dapat dirancang untuk mengontrol pelepasan zat aktif secara spesifik, baik berdasarkan waktu, lokasi dalam sistem pencernaan, maupun kondisi lingkungan tertentu

seperti pH atau suhu. Hal ini membuka peluang besar dalam pengembangan pangan fungsional dan *nutraceutical*.

1.3.2 Aplikasi Nanoteknologi dalam Pengolahan dan Pengawetan Pangan

Nanoteknologi telah diaplikasikan dalam berbagai aspek sistem pangan, mulai dari pengolahan hingga pengemasan. Salah satu aplikasi yang paling berkembang adalah nano-enkapsulasi, yaitu teknik untuk membungkus senyawa bioaktif dalam matriks berukuran nano. Teknologi ini memungkinkan perlindungan terhadap senyawa sensitif seperti vitamin, enzim, dan probiotik dari degradasi akibat cahaya, oksigen, atau kondisi lingkungan lainnya. Selain itu, nano-enkapsulasi juga memungkinkan pelepasan zat aktif secara terkendali, sehingga meningkatkan efektivitasnya dalam tubuh (Dasgupta *et al.*, 2015).

Aplikasi lain yang penting adalah nanoemulsi, yaitu sistem dispersi dua fase (biasanya minyak dan air) dengan ukuran droplet pada skala nanometer. Nanoemulsi memiliki stabilitas kinetik yang tinggi dan mampu meningkatkan kelarutan serta bioavailabilitas senyawa hidrofobik. Teknologi ini banyak digunakan dalam formulasi minuman fungsional, produk susu, dan suplemen pangan (McClements & Xiao, 2017).



Gambar 1.10. Perbedaan Nanoemulsi dan Emulsi Biasa
(Sumber : www.slideshare.net, 2026)

Selain itu, nanoteknologi juga berperan dalam pengembangan kemasan aktif dan cerdas (*active and smart packaging*). Kemasan berbasis nanomaterial dapat dirancang untuk memiliki sifat antimikroba, meningkatkan barrier terhadap oksigen dan uap air, serta mendeteksi perubahan kondisi pangan. Sebagai contoh, nanopartikel perak (AgNPs) sering digunakan sebagai agen antimikroba dalam kemasan pangan untuk menghambat pertumbuhan mikroorganisme patogen. Sementara itu, sensor berbasis nanoteknologi dapat digunakan untuk memantau kesegaran produk secara real-time melalui perubahan warna atau sinyal tertentu (Cushen *et al.*, 2012).

1.3.3 Nanoteknologi dalam Keamanan dan Kualitas Pangan

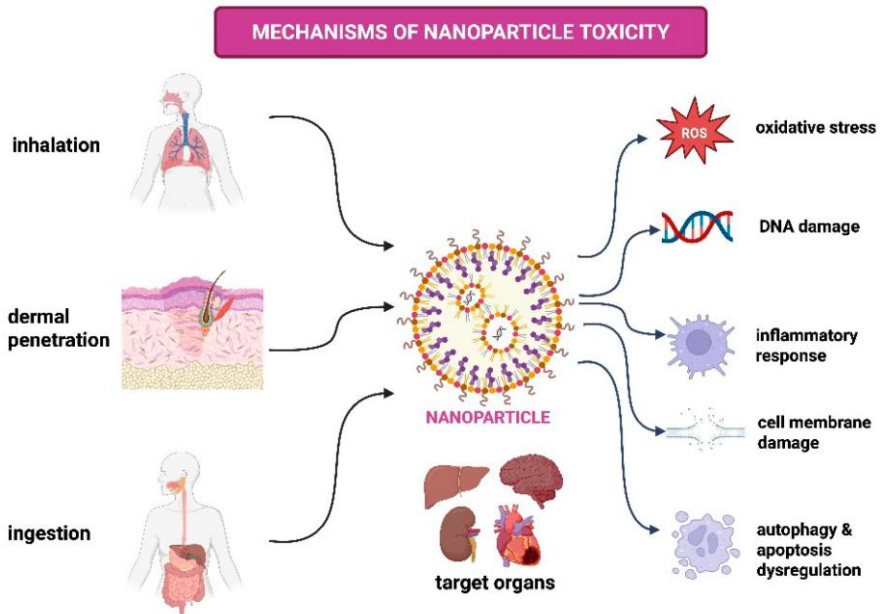
Selain meningkatkan nilai fungsional, nanoteknologi juga berperan penting dalam menjamin keamanan pangan. Salah satu inovasi utama adalah pengembangan nanosensor yang mampu mendeteksi kontaminan seperti mikroorganisme patogen, toksin, dan residu bahan kimia dengan sensitivitas dan kecepatan tinggi. Teknologi ini memungkinkan deteksi dini terhadap kontaminasi, sehingga dapat mencegah distribusi produk pangan yang tidak aman.

Nanoteknologi juga dapat digunakan untuk meningkatkan stabilitas dan kualitas pangan selama penyimpanan. Dengan memodifikasi struktur material pada tingkat nano, sifat fisik dan kimia produk dapat dioptimalkan, seperti tekstur, warna, dan rasa. Selain itu, penggunaan nanomaterial dalam kemasan dapat memperpanjang umur simpan produk dengan menghambat proses oksidasi dan pertumbuhan mikroba.

1.3.4 Potensi dan Tantangan Implementasi Nanoteknologi dalam Pangan

Meskipun menawarkan berbagai keunggulan, penerapan nanoteknologi dalam sistem pangan juga menghadapi sejumlah tantangan. Salah satu isu utama adalah terkait dengan keamanan (*safety*) nanomaterial bagi kesehatan manusia. Karena ukurannya yang sangat kecil, nanopartikel memiliki kemampuan untuk menembus membran biologis dan berinteraksi dengan sistem seluler, yang berpotensi menimbulkan efek toksik. Oleh karena itu,

diperlukan kajian toksikologi yang mendalam untuk memastikan keamanan penggunaan nanoteknologi dalam pangan.



Gambar 1.11. Mekanisme Toksisitas Nanopartikel
(Sumber : Muhaimin *et al.*, 2025)

Selain itu, aspek regulasi juga menjadi tantangan penting. Hingga saat ini, regulasi terkait penggunaan nanoteknologi dalam pangan masih berkembang dan bervariasi antar negara. Standar yang jelas dan harmonisasi regulasi diperlukan untuk mendukung adopsi teknologi ini secara luas.

Tantangan lainnya adalah penerimaan konsumen (*consumer acceptance*). Persepsi masyarakat terhadap teknologi nano dalam pangan masih beragam, terutama terkait dengan isu keamanan dan “kealamian” produk. Oleh karena itu, edukasi dan komunikasi yang efektif menjadi kunci dalam meningkatkan kepercayaan konsumen terhadap produk berbasis nanoteknologi.

1.3.5 Peran Strategis Nanoteknologi dalam Sistem Pangan Masa Depan

Secara keseluruhan, nanoteknologi memiliki peran strategis dalam mendukung transformasi sistem pangan menuju arah yang lebih efisien, berkelanjutan, dan berorientasi pada kesehatan. Integrasi nanoteknologi dengan teknologi lain, seperti bioteknologi dan digitalisasi, akan membuka peluang baru dalam pengembangan pangan masa depan, termasuk pangan fungsional, personalized nutrition, dan sistem pangan presisi.

Dengan memanfaatkan keunggulan material nano, industri pangan dapat meningkatkan kualitas produk, mengurangi limbah, serta meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya. Namun, keberhasilan implementasi teknologi ini sangat bergantung pada pengelolaan risiko yang tepat, pengembangan regulasi yang jelas, serta peningkatan pemahaman masyarakat terhadap manfaat dan keamanan nanoteknologi.



Gambar 1.12. Penerapan Nanoteknologi di Berbagai Bidang Industri Makanan
(Sumber : Ansari, 2023)

1.4 Peran Bioteknologi dalam Inovasi dan Produksi Pangan

Bioteknologi pangan merupakan cabang ilmu yang memanfaatkan organisme hidup, sistem biologis, atau komponennya untuk menghasilkan, memodifikasi, atau meningkatkan kualitas produk pangan. Dalam perkembangannya, bioteknologi pangan terbagi menjadi dua kategori utama, yaitu bioteknologi konvensional dan bioteknologi modern. Bioteknologi konvensional umumnya berbasis pada proses alami seperti fermentasi, sedangkan bioteknologi modern melibatkan teknik rekayasa genetika, kultur sel, dan manipulasi molekuler untuk menghasilkan produk dengan karakteristik yang diinginkan (Batt & Tortorello, 2014).

Perbedaan Bioteknologi: Konvensional dan Modern		
Bioteknologi Konvensional	Karakteristik	Bioteknologi Modern
 Langsung dan organisme utuh	 Pemanfaatan	 Tidak langsung dan biasanya bagian tertentu saja
 Fermentasi	Prinsip	 Rekayasa genetika dan teknologi reproduksi
Tidak perlu keahlian khusus	Pelaku	 Perlu keahlian khusus
Sederhana	Alat dan Proses	Canggih dan modern
Skala kecil dan relatif murah	Skala Produksi dan Biaya	Skala besar dan relatif mahal
 Contoh: Yoghurt, tapai, tempe, roti, nata de coco, kecap, minuman beralkohol, dan keju	Contoh	 Contoh: Hormon insulin sintetik, tanaman transgenik, inseminasi buatan, bayi tabung

ILUSTRASI INDEPENDEN

Gambar 1.13. Perbedaan Bioteknologi: Tradisional dan Modern
(Sumber : Generate AI Gemini 3, 2026)

Sejak ribuan tahun lalu, manusia telah memanfaatkan bioteknologi konvensional dalam bentuk fermentasi untuk

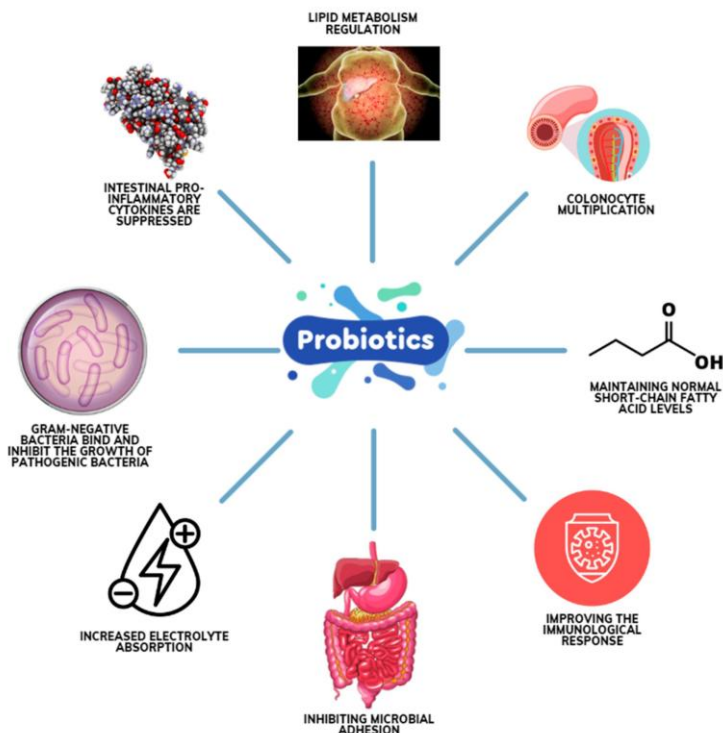
menghasilkan berbagai produk pangan seperti tempe, yoghurt, keju, dan kecap. Proses fermentasi melibatkan aktivitas mikroorganisme seperti bakteri, khamir, dan kapang yang mengubah substrat organik menjadi produk dengan sifat sensori, nilai gizi, dan daya simpan yang lebih baik. Holzapfel (2014) menyatakan bahwa fermentasi tidak hanya berfungsi sebagai metode pengawetan, tetapi juga berkontribusi dalam meningkatkan ketersediaan nutrisi dan menghasilkan senyawa bioaktif yang bermanfaat bagi kesehatan.

Seiring dengan kemajuan ilmu pengetahuan, bioteknologi pangan berkembang menuju pemanfaatan enzim secara spesifik dalam proses pengolahan pangan. Enzim merupakan biokatalis yang mampu mempercepat reaksi kimia tanpa mengalami perubahan permanen. Dalam industri pangan, enzim digunakan untuk berbagai tujuan, seperti meningkatkan tekstur, mempercepat proses produksi, dan meningkatkan efisiensi penggunaan bahan baku. Contohnya, enzim amilase digunakan dalam industri roti untuk meningkatkan kualitas adonan, sedangkan protease digunakan dalam pengolahan daging untuk meningkatkan keempukan. Gupta *et al.* (2016) menekankan bahwa penggunaan enzim dalam pengolahan pangan tidak hanya meningkatkan efisiensi proses, tetapi juga memungkinkan pengurangan penggunaan bahan kimia sintesis.

Selain fermentasi dan enzim, perkembangan bioteknologi modern juga mencakup teknik kultur sel dan rekayasa metabolik. Kultur sel memungkinkan produksi komponen pangan tertentu tanpa harus bergantung pada sumber alami secara langsung, misalnya produksi protein alternatif atau bahan bioaktif melalui kultur mikroba atau sel hewan. Sementara itu, rekayasa metabolik memungkinkan modifikasi jalur metabolisme organisme untuk meningkatkan produksi senyawa tertentu, seperti vitamin, asam amino, atau antioksidan. Teknologi ini membuka peluang besar dalam pengembangan pangan inovatif yang lebih efisien dan berkelanjutan.

Kontribusi bioteknologi dalam sistem pangan sangat signifikan, terutama dalam meningkatkan nilai gizi produk pangan. Melalui fermentasi dan rekayasa mikroba, kandungan nutrisi pangan dapat ditingkatkan, baik dari segi ketersediaan hayati (*bioavailability*) maupun komposisi zat gizi. Sebagai contoh, fermentasi dapat

meningkatkan kandungan vitamin B kompleks serta mengurangi senyawa antinutrisi dalam bahan pangan nabati. Selain itu, bioteknologi juga berperan dalam pengembangan pangan fungsional, yaitu pangan yang tidak hanya memenuhi kebutuhan nutrisi dasar, tetapi juga memberikan manfaat kesehatan tambahan, seperti probiotik dan prebiotik.



Gambar 1.14. Mekanisme Aksi Probiotik
(Sumber : Maftei *et al.*, 2024)

Dari sisi efisiensi produksi, bioteknologi memungkinkan optimalisasi proses produksi pangan melalui penggunaan mikroorganisme dan enzim yang lebih spesifik dan efisien. Hal ini tidak hanya meningkatkan produktivitas, tetapi juga mengurangi limbah dan konsumsi energi. Dalam konteks industri, penerapan bioteknologi dapat meningkatkan daya saing melalui inovasi produk dan efisiensi proses.

Lebih lanjut, bioteknologi memiliki peran strategis dalam mendukung ketahanan pangan global. Dengan meningkatnya populasi dunia dan keterbatasan sumber daya alam, diperlukan pendekatan inovatif untuk meningkatkan produksi pangan secara berkelanjutan. Bioteknologi dapat berkontribusi melalui pengembangan sumber pangan alternatif, peningkatan kualitas bahan pangan, serta pengurangan kehilangan hasil melalui proses pengolahan yang lebih efisien. Selain itu, bioteknologi juga mendukung diversifikasi pangan dan pengembangan produk berbasis sumber daya lokal.

Meskipun demikian, penerapan bioteknologi dalam pangan juga menghadapi berbagai tantangan, terutama terkait dengan aspek keamanan, etika, dan penerimaan konsumen. Oleh karena itu, diperlukan regulasi yang jelas serta pendekatan berbasis ilmiah dalam memastikan bahwa produk bioteknologi aman untuk dikonsumsi. Edukasi kepada masyarakat juga menjadi faktor penting dalam meningkatkan pemahaman dan kepercayaan terhadap teknologi ini.

Secara keseluruhan, bioteknologi merupakan pilar penting dalam inovasi dan transformasi sistem pangan modern. Dengan memanfaatkan potensi organisme hidup dan sistem biologis, bioteknologi mampu memberikan solusi terhadap berbagai tantangan pangan global, sekaligus membuka peluang untuk pengembangan produk pangan yang lebih sehat, efisien, dan berkelanjutan.

1.5 Integrasi Nanoteknologi dan Bioteknologi dalam Sistem Pangan Masa Depan

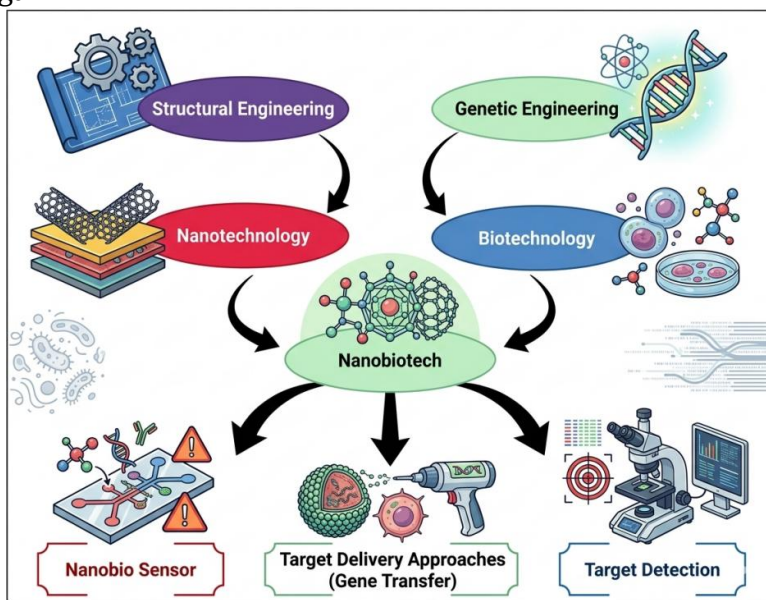
Perkembangan pesat ilmu pengetahuan dan teknologi pada abad ke-21 telah mendorong munculnya konsep konvergensi teknologi (*technology convergence*), yaitu integrasi berbagai disiplin ilmu untuk menghasilkan solusi inovatif yang lebih efektif dan efisien. Dalam konteks pangan, salah satu bentuk konvergensi yang paling menjanjikan adalah integrasi antara nanoteknologi dan bioteknologi, yang dikenal sebagai *nano-bio convergence*. Pendekatan ini menggabungkan keunggulan manipulasi material pada skala nano dengan kemampuan sistem biologis dalam menghasilkan dan

memodifikasi senyawa kompleks, sehingga membuka peluang besar dalam transformasi sistem pangan modern (Galanakis, 2021).

1.5.1 Konsep dan Prinsip Nano-Bio Convergence

Nano-bio convergence merupakan pendekatan multidisiplin yang mengintegrasikan prinsip-prinsip nanoteknologi dan bioteknologi untuk menciptakan sistem yang lebih canggih dan fungsional. Nanoteknologi berperan dalam menyediakan platform material dengan ukuran dan sifat yang dapat dikontrol secara presisi, sementara bioteknologi menyediakan komponen biologis seperti enzim, protein, DNA, dan mikroorganisme yang memiliki fungsi spesifik.

Integrasi kedua bidang ini memungkinkan pengembangan sistem yang tidak hanya efisien secara fisik, tetapi juga responsif secara biologis. Sebagai contoh, nanopartikel dapat digunakan sebagai carrier untuk mengantarkan molekul biologis tertentu ke target spesifik dalam sistem pangan atau tubuh manusia. Dengan demikian, *nano-bio convergence* tidak hanya meningkatkan performa teknologi, tetapi juga memperluas cakupan aplikasinya dalam bidang pangan.



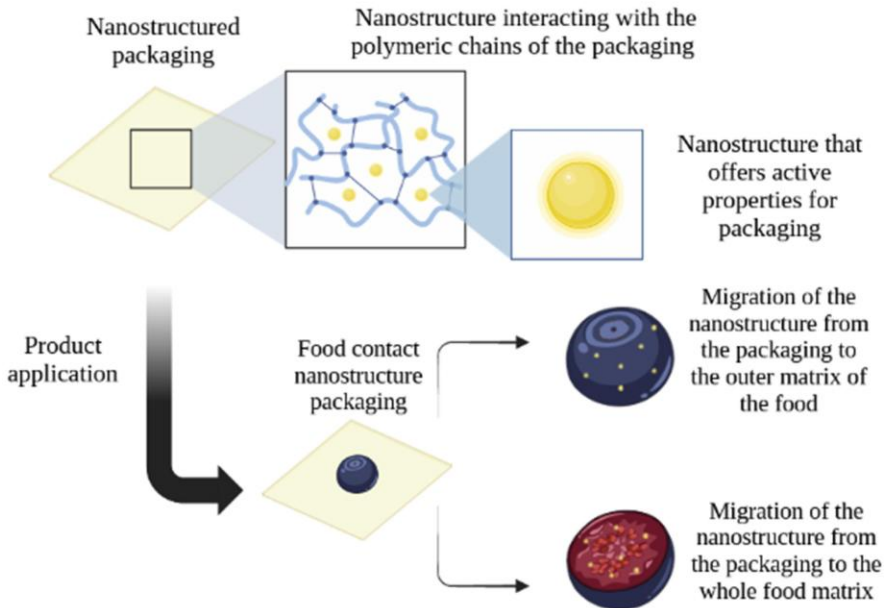
Gambar 1.15. Integrasi Nanoteknologi dan Bioteknologi
(Sumber : Generate AI Gemini 3, 2026)

1.5.2 Sinergi Aplikasi: Nano-Delivery System dan Biosensor

Salah satu bentuk nyata integrasi nanoteknologi dan bioteknologi adalah pengembangan *nano-delivery system* berbasis biomolekul. Sistem ini dirancang untuk mengenkapsulasi dan menghantarkan senyawa bioaktif seperti vitamin, antioksidan, probiotik, dan peptida bioaktif secara lebih efektif. Dengan memanfaatkan struktur nano, senyawa bioaktif dapat dilindungi dari degradasi selama proses pengolahan dan pencernaan, serta dilepaskan secara terkendali pada lokasi target dalam tubuh.

Sebagai contoh, penggunaan nanopartikel berbasis protein atau polisakarida sebagai matriks enkapsulasi memungkinkan peningkatan stabilitas dan bioavailabilitas senyawa bioaktif. Singh *et al.* (2017) menyatakan bahwa sistem penghantaran berbasis nano dapat meningkatkan efisiensi penyerapan nutrisi secara signifikan dibandingkan dengan sistem konvensional.

Selain itu, integrasi nano-bio juga terlihat dalam pengembangan biosensor berbasis nanoteknologi untuk keamanan pangan. Biosensor merupakan perangkat analitik yang menggunakan komponen biologis, seperti enzim atau antibodi, untuk mendeteksi keberadaan zat tertentu. Dengan dukungan nanoteknologi, sensitivitas dan kecepatan deteksi biosensor dapat ditingkatkan secara signifikan. Nanomaterial seperti nanopartikel logam atau nanotube karbon dapat meningkatkan sinyal deteksi, sehingga memungkinkan identifikasi kontaminan pangan seperti bakteri patogen, toksin, dan residu kimia secara real-time (Augustin & Sanguansri, 2015).



Gambar 1.16. Migrasi Struktur Nano dari Permukaan Kemasan ke Makanan
(Sumber : de Sousa *et al.*, 2023)

1.5.3 Peran dalam Pangan Fungsional, Keamanan, dan *Personalized Nutrition*

Integrasi nanoteknologi dan bioteknologi memiliki kontribusi besar dalam pengembangan pangan fungsional, yaitu pangan yang memberikan manfaat kesehatan di luar fungsi nutrisi dasar. Melalui nano-enkapsulasi berbasis biomolekul, senyawa bioaktif dapat diformulasikan secara lebih stabil dan efektif, sehingga meningkatkan nilai tambah produk pangan.

Dalam aspek keamanan pangan, teknologi nano-bio memungkinkan pengembangan sistem deteksi dan pengendalian kontaminan yang lebih cepat dan akurat. Selain biosensor, teknologi ini juga dapat digunakan dalam pengembangan kemasan aktif yang mampu merespons perubahan kondisi lingkungan dan menghambat pertumbuhan mikroorganisme.

Lebih lanjut, integrasi ini juga mendukung konsep *personalized nutrition*, yaitu pendekatan nutrisi yang disesuaikan dengan kebutuhan individu berdasarkan faktor genetik, fisiologis, dan gaya

hidup. Dengan bantuan bioteknologi (misalnya analisis genomik) dan nanoteknologi (misalnya sistem penghantaran nutrisi yang spesifik), pangan dapat dirancang untuk memberikan manfaat yang optimal bagi setiap individu. McClements (2020) menekankan bahwa *personalized nutrition* merupakan salah satu arah utama dalam pengembangan sistem pangan masa depan.

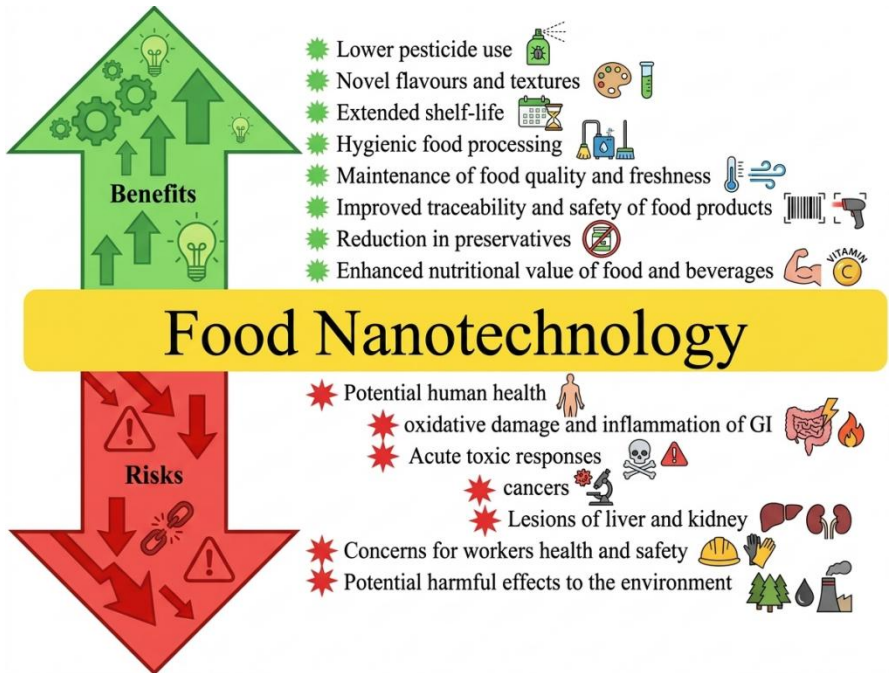
1.5.4 Arah Masa Depan: Precision Food Systems dan Inovasi Berkelanjutan

Konvergensi nano-bio juga menjadi fondasi dalam pengembangan *precision food systems*, yaitu sistem pangan yang berbasis data dan teknologi presisi untuk mengoptimalkan produksi, pengolahan, dan konsumsi pangan. Dalam sistem ini, teknologi nano dan bio bekerja bersama dengan teknologi digital seperti AI dan IoT untuk menciptakan sistem yang adaptif dan efisien.

Selain itu, integrasi ini juga berkontribusi dalam inovasi pangan berkelanjutan (*sustainable food innovation*). Penggunaan nanoteknologi dapat meningkatkan efisiensi penggunaan bahan baku dan mengurangi limbah, sementara bioteknologi memungkinkan produksi bahan pangan alternatif yang lebih ramah lingkungan, seperti protein berbasis mikroba atau kultur sel. Dengan demikian, *nano-bio convergence* dapat membantu mengurangi tekanan terhadap sumber daya alam dan mendukung pencapaian sistem pangan yang berkelanjutan.

1.5.5 Tantangan: Regulasi, Keamanan, dan Penerimaan Konsumen

Meskipun memiliki potensi besar, implementasi integrasi nanoteknologi dan bioteknologi dalam pangan tidak terlepas dari berbagai tantangan. Salah satu tantangan utama adalah aspek keamanan (*safety*), terutama terkait dengan penggunaan nanomaterial dalam produk pangan. Interaksi nanopartikel dengan sistem biologis masih memerlukan kajian lebih lanjut untuk memastikan tidak adanya efek toksik jangka panjang.



Gambar 1.15. Nanoteknologi dalam Keamanan Pangan
(Sumber : Generate AI Gemini 3, 2026)

Selain itu, regulasi terkait penggunaan teknologi nano dan bio dalam pangan masih berkembang dan belum sepenuhnya terstandarisasi secara global. Diperlukan kerangka regulasi yang jelas dan berbasis ilmiah untuk memastikan keamanan serta mendorong inovasi.

Tantangan lainnya adalah penerimaan konsumen. Persepsi masyarakat terhadap teknologi baru, terutama yang melibatkan rekayasa pada tingkat nano dan biologis, seringkali dipengaruhi oleh faktor psikologis, budaya, dan tingkat pemahaman. Oleh karena itu, transparansi informasi dan edukasi publik menjadi sangat penting dalam meningkatkan kepercayaan terhadap produk berbasis nano-bio.

DAFTAR PUSTAKA

- Abideen, A. Z., Sundram, V. P. K., Pyeman, J., Othman, A. K., & Sorooshian, S. (2021). Food supply chain transformation through technology and future research directions—a systematic review. *Logistics*, 5(4), 83.
- Ansari, M. A. (2023). Nanotechnology in food and plant science: challenges and future prospects. *Plants*, 12(13), 2565.
- Augustin, M. A., & Sanguansri, P. (2009). Nanostructured materials in the food industry. *Advances in food and nutrition research*, 58, 183-213.
- Batt, C. A., & Tortorello, M. L. (2014). *Encyclopedia of food microbiology*. (No Title).
- Bisht, B., Rawat, K., Vohat, A., Jangid, N., Singh, N., Nishinari, K., ... & Kumar, V. (2025). Industry 4.0 digital transformation: Shaping the future of food quality. *Food Control*, 170, 111030.
- Cushen, M., Kerry, J., Morris, M., Cruz-Romero, M., & Cummins, E. (2012). Nanotechnologies in the food industry—Recent developments, risks and regulation. *Trends in food science & technology*, 24(1), 30-46.
- Dadhaneeya, H., Nema, P. K., & Arora, V. K. (2023). Internet of Things in food processing and its potential in Industry 4.0 era: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 139, 104109.
- de Sousa, M. S., Schlogl, A. E., Estanislau, F. R., Souza, V. G. L., dos Reis Coimbra, J. S., & Santos, I. J. B. (2023). Nanotechnology in packaging for food industry: Past, present, and future. *Coatings*, 13(8), 1411.
- FAO. (2023). *The State of Food Security and Nutrition in the World 2023*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Fellows, P. J. (2022). *Food processing technology: principles and practice*. Woodhead publishing.
- Galanakis, C. M. (Ed.). (2020). *Food structure and functionality*. Academic Press.
- Gemini 3 Flash. (2026). Ilustrasi Rantai Produksi Pangan [Gambar yang dihasilkan AI]. Google. <https://gemini.google.com/>

- Godfray, H. C. J., Beddington, J. R., Crute, I. R., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J. F., ... & Toulmin, C. (2010). Food security: the challenge of feeding 9 billion people. *science*, 327(5967), 812-818.
- Gupta, R., Beg, Q., & Lorenz, P. (2002). Bacterial alkaline proteases: molecular approaches and industrial applications. *Applied microbiology and biotechnology*, 59(1), 15-32.
- Hassoun, A., Jagtap, S., Trollman, H., Garcia-Garcia, G., Abdullah, N. A., Goksen, G., ... & Lorenzo, J. M. (2023). Food processing 4.0: Current and future developments spurred by the fourth industrial revolution. *Food Control*, 145, 109507.
- Hassoun, A., Marvin, H. J., Bouzembrak, Y., Barba, F. J., Castagnini, J. M., Pallarés, N., ... & Regenstein, J. M. (2023). Digital transformation in the agri-food industry: Recent applications and the role of the COVID-19 pandemic. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7, 1217813.
- HLPE. (2020). Food security and nutrition: building a global narrative towards 2030. Rome: High Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition.
- Holzapfel, W. (Ed.). (2014). *Advances in fermented foods and beverages: improving quality, technologies and health benefits*. Elsevier.
- Maftai, N. M., Raileanu, C. R., Balta, A. A., Ambrose, L., Boev, M., Marin, D. B., & Lisa, E. L. (2024). The potential impact of probiotics on human health: an update on their health-promoting properties. *Microorganisms*, 12(2), 234.
- McClements, D. J. (2020). Future foods: A manifesto for research priorities in structural design of foods. *Food & function*, 11(3), 1933-1945.
- McClements, D. J., & Xiao, H. (2012). Potential biological fate of ingested nanoemulsions: influence of particle characteristics. *Food & function*, 3(3), 202-220.
- Mubarok, F. (2022). Dampak Pandemi, Pengusaha Ikan Asin Merugi. <https://mongabay.co.id/2022/03/14/dampak-pandemi-pengusaha-ikan-asin-merugi/> [Diakses 26 Maret 2026].
- Muhaimin, M., Chaerunisaa, A. Y., Dewi, M. K., Khatib, A., & Hazrina, A. (2025). The toxicological profile of active pharmaceutical ingredients-containing nanoparticles: classification,

mechanistic pathways, and health implications. *Pharmaceuticals*, 18(5), 703.

- Parfitt, J., Barthel, M., & Macnaughton, S. (2010). Food waste within food supply chains: quantification and potential for change to 2050. *Philosophical transactions of the royal society B: biological sciences*, 365(1554), 3065-3081.
- Romanello, R., & Veglio, V. (2022). Industry 4.0 in food processing: drivers, challenges and outcomes. *British Food Journal*, 124(13), 375-390.
- Singh, T., Shukla, S., Kumar, P., Wahla, V., Bajpai, V. K., & Rather, I. A. (2017). Application of nanotechnology in food science: perception and overview. *Frontiers in microbiology*, 8, 1501.
- Yuan, X., Zhong, M., Huang, X., Hussain, Z., Ren, M., & Xie, X. (2024). Industrial production of functional foods for human health and sustainability. *Foods*, 13(22), 3546.

BAB 2

DASAR-DASAR NANOTEKNOLOGI DAN BIOTEKNOLOGI

Perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi dalam beberapa dekade terakhir telah membawa transformasi signifikan dalam sistem pangan global. Inovasi tidak lagi hanya berfokus pada peningkatan produksi, tetapi juga mencakup aspek keamanan, kualitas gizi, efisiensi, serta keberlanjutan. Dalam konteks ini, integrasi antara nanoteknologi dan bioteknologi muncul sebagai pendekatan strategis yang mampu menjawab berbagai tantangan pangan modern. Kedua bidang tersebut berperan sebagai fondasi ilmiah dalam pengembangan produk pangan yang lebih adaptif terhadap kebutuhan konsumen sekaligus responsif terhadap isu global seperti ketahanan pangan dan perubahan lingkungan (Sahoo *et al.*, 2020; Nile *et al.*, 2020; Ali *et al.*, 2021).

Secara spesifik, nanoteknologi menawarkan solusi inovatif melalui rekayasa material pada skala atomik dan molekuler untuk aplikasi seperti sistem pengemasan cerdas dan peningkatan penyerapan nutrisi (Silva *et al.*, 2016). Di sisi lain, bioteknologi memanfaatkan sistem biologis dan rekayasa genetika untuk meningkatkan kualitas serta kuantitas produk pangan. Perkembangan kedua bidang ini kemudian berkonvergensi dalam konsep nanobioteknologi, yaitu integrasi teknologi nano dengan sistem biologis untuk menghasilkan inovasi yang lebih canggih. Dalam sektor pangan, pendekatan ini membuka peluang pengembangan teknologi seperti nano-enkapsulasi nutrisi, biosensor untuk deteksi kontaminan, serta sistem penghantaran zat aktif yang lebih efisien, sehingga memberikan kontribusi nyata dalam menciptakan pangan yang aman, fungsional, dan bernilai tambah tinggi (Sahoo *et al.*, 2020; Nile *et al.*, 2020; Ansari, 2023; Ali *et al.*, 2021; Biswas *et al.*, 2022; Wahab *et al.*, 2024; Guo *et al.*, 2024).

2.1 Nanoteknologi

Nanoteknologi adalah cabang ilmu dan rekayasa yang mempelajari serta memanfaatkan manipulasi materi pada skala sangat kecil, yaitu sekitar 1–100 nanometer, di mana material menunjukkan sifat fisik, kimia, dan biologis yang berbeda secara signifikan dibandingkan ukuran makroskopiknya karena meningkatnya rasio luas permukaan terhadap volume serta dominasi fenomena khas seperti efek kuantum yang memengaruhi karakteristik optik, listrik, dan reaktivitas kimia material (Gulzar *et al.*, 2024; Al-Harbi & Abd-Elrahman, 2024; Khan *et al.*, 2022; Hammud, 2023; Pozzi *et al.*, 2024). Oleh karena itu, nanoteknologi memungkinkan perancangan material dan sistem dengan fungsi yang lebih spesifik dan efisien (Gulzar *et al.*, 2024; Joudeh & Linke, 2022; Khan *et al.*, 2022).

Dalam praktiknya, nanoteknologi telah diterapkan di berbagai bidang, termasuk pangan, kesehatan, dan lingkungan, misalnya melalui nanoenkapsulasi vitamin atau antioksidan agar lebih stabil dan mudah diserap, penggunaan nanopartikel perak sebagai agen antimikroba dalam kemasan pangan, serta sistem penghantaran obat berbasis nanopartikel yang melepaskan obat secara terarah ke sel target (Gulzar *et al.*, 2024; Yusuf *et al.*, 2023; Joudeh & Linke, 2022; Al-Harbi & Abd-Elrahman, 2024; Khan *et al.*, 2022).

Nanoteknologi di Bidang Inovasi Pangan

Pemanfaatan nanoteknologi di bidang pangan mencakup beberapa aspek utama berikut:

1. Sistem Pengemasan Pintar (*Smart Packaging*)

Nanoteknologi berperan penting dalam meningkatkan fungsi kemasan pangan melalui:

- a. **Peningkatan Sifat Material:** Partikel nano digunakan untuk memperbaiki sifat mekanik dan ketahanan panas pada bahan pengemas (UNS, 2019).
- b. **Pengemasan Aktif:** Penggunaan partikel nano dalam sistem pengemasan aktif berfungsi untuk memperpanjang masa simpan produk dengan menjaga kondisi lingkungan di dalam kemasan (Pasupuleti, 2024; UNS, 2019).

- c. **Sensor Kesegaran:** Sensor nano yang disatukan dalam kemasan dapat memberikan sinyal visual atau informasi mengenai apakah produk masih layak dikonsumsi atau sudah rusak (UNS, 2019).

2. Keamanan Pangan dan Deteksi Patogen

Aplikasi nanobioteknologi sangat signifikan dalam menjaga standar keamanan pangan:

- a. **Biosensor *Real-time*:** Pengembangan biosensor berbasis nanomaterial memungkinkan deteksi kontaminan dan patogen berbahaya secara cepat dan *real-time* (Pasupuleti, 2024; UNS, 2019).
- b. **Transparansi Rantai Pasok:** Teknologi deteksi canggih ini membantu memastikan produk aman dikonsumsi dan meningkatkan kepercayaan konsumen melalui sistem keterlacakan yang lebih baik (Pasupuleti, 2024).

3. Peningkatan Nilai Gizi dan Kualitas Produk

Dalam proses produksi, nanoteknologi digunakan untuk mengoptimalkan kandungan nutrisi:

- a. **Bahan Aditif dan Fortifikasi:** Nanoteknologi diaplikasikan dalam pembuatan bahan aditif sebagai nutrisi tambahan serta melalui teknik fortifikasi untuk memerangi defisiensi nutrisi di masyarakat (Pasupuleti, 2024; UNS, 2019).
- b. **Pengendalian Kualitas (*Quality Control*):** Teknologi ini digunakan secara luas untuk memantau kualitas produk mulai dari tahap produksi hingga ke tangan konsumen (UNS, 2019).
- c. **Penyampaian Nutrisi:** Inovasi seperti pengayaan (*enrichment*) membantu mempertahankan nilai gizi, rasa, dan tekstur produk pangan agar tetap optimal (Pasupuleti, 2024).

2.2 Bioteknologi

Bioteknologi didefinisikan sebagai penggunaan system biologis, organisme hidup, atau turunannya untuk memanipulasi, memodifikasi, atau menghasilkan produk dan proses untuk tujuan

tertentu yang bermanfaat bagi masyarakat (Nair, 2020). Dalam sektor pangan, bioteknologi bertujuan untuk meningkatkan efisiensi, hasil panen, serta kualitas dan keamanan produk melalui aplikasi teknik biologis pada tanaman, hewan, dan mikroorganisme (Khazalina, 2020; Nair, 2020).

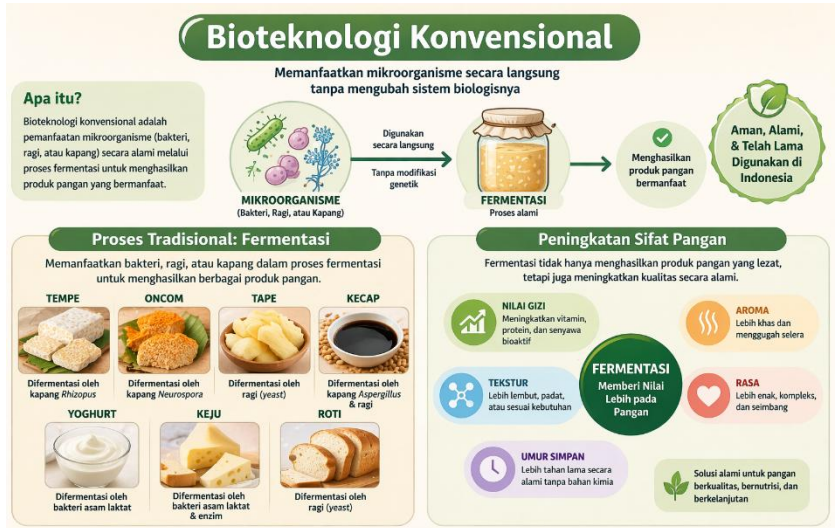
Bioteknologi di Bidang Inovasi Pangan

Secara umum, bioteknologi dalam industri pangan terbagi menjadi dua kategori utama (Faridah & Sari, 2019; Oba & Yildirim, 2021):

1. Bioteknologi Konvensional

Bioteknologi ini telah lama berkembang di Indonesia dan memanfaatkan mikroorganisme secara langsung tanpa mengubah sistem biologisnya (Oba & Yildirim, 2021; Wasilah *et al.*, 2019).

- a. **Proses Tradisional:** Memanfaatkan bakteri, ragi, atau kapang dalam proses fermentasi untuk menghasilkan produk pangan seperti tempe, oncom, tape, kecap, yoghurt, keju, dan roti (Faridah & Sari, 2019; Khazalina, 2020; Wasilah *et al.*, 2019).
- b. **Peningkatan Sifat Pangan:** Fermentasi digunakan untuk meningkatkan nilai gizi, tekstur, aroma, rasa, serta memperpanjang masa simpan produk secara alami (Maryam, 2017; Nair, 2020).

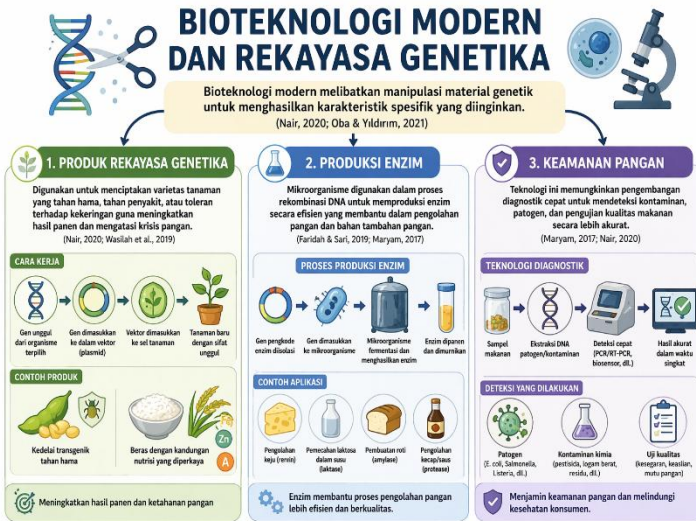


Gambar 2.1. Bioteknologi Konvensional
 Sumber : Dibuat dengan Chat GPT (Open AI), 2026

2. Bioteknologi Modern dan Rekayasa Genetika

Bioteknologi modern melibatkan manipulasi material genetik untuk menghasilkan karakteristik spesifik yang diinginkan (Nair, 2020; Oba & Yildirim, 2021).

- a. **Produk Rekayasa Genetika:** Digunakan untuk menciptakan varietas tanaman yang tahan hama, tahan penyakit, atau toleran terhadap kekeringan guna meningkatkan hasil panen dan mengatasi krisis pangan (Nair, 2020; Wasilah *et al.*, 2019). Contohnya termasuk kedelai transgenik atau beras dengan kandungan nutrisi yang diperkaya (Loizzo *et al.*, 2018).
- b. **Produksi Enzim:** Mikroorganisme digunakan dalam proses rekombinasi DNA untuk memproduksi enzim secara efisien yang membantu dalam pengolahan pangan dan bahan tambahan pangan (Faridah & Sari, 2019; Maryam, 2017).
- c. **Keamanan Pangan:** Teknologi ini memungkinkan pengembangan diagnostik cepat untuk mendeteksi kontaminan, patogen, dan pengujian kualitas makanan secara lebih akurat (Maryam, 2017; Nair, 2020).



Gambar 2.2. Bioteknologi Modern dan Rekayasa Genetika
Sumber : Dibuat dengan Chat GPT (Open AI), 2026

3. Keberlanjutan dan Nilai Tambah

Pemanfaatan bioteknologi juga memberikan dampak positif pada aspek lingkungan dan gizi:

- Pengurangan Limbah:** Bioteknologi berperan dalam remediasi lingkungan dan produksi bioplastik yang ramah lingkungan untuk mengurangi sampah plastik dari kemasan pangan (Wasilah *et al.*, 2019).
- Fortifikasi Nutrisi:** Membantu memerangi masalah malnutrisi dan kelaparan melalui pengembangan bahan pangan dengan nilai gizi yang lebih tinggi dan bioavailabilitas yang lebih baik (Maryam, 2017; Nair, 2020).

2.3 Integrasi Nanoteknologi dan Bioteknologi Dalam Inovasi Pangan

Nanoteknologi dan bioteknologi dalam industri pangan modern tidak berdiri sendiri, melainkan diintegrasikan bersama dengan teknologi informasi untuk menciptakan inovasi yang komprehensif (Pasupuleti, 2024). Nanoteknologi menyediakan

platform untuk manipulasi material pada skala atomik dan molekuler, sementara bioteknologi memberikan pemahaman mendalam tentang sistem biologis dan proses kehidupan yang dapat dimanfaatkan (Maryam, 2017; Nair, 2020). Sinergi ini menghasilkan aplikasi yang tidak mungkin dicapai oleh salah satu teknologi secara terpisah.

1. Sistem Pengemasan Pintar dan Aktif

Integrasi nanoteknologi dengan prinsip bioteknologi telah menghasilkan revolusi dalam sistem pengemasan pangan:

a. Pengemasan Berbasis Nanomaterial Bioaktif

Pengemasan aktif memanfaatkan partikel nano yang disatukan dengan agen antimikroba atau antioksidan yang berasal dari sumber biologis (Pasupuleti, 2024; UNS, 2019). Partikel nano ini berfungsi sebagai pembawa (*carrier*) yang efisien untuk senyawa bioaktif, memungkinkan pelepasan terkontrol yang memperpanjang masa simpan produk pangan secara signifikan (UNS, 2019). Sistem ini menggabungkan keunggulan nanoteknologi dalam hal luas permukaan dan permeabilitas dengan pengetahuan bioteknologi tentang mekanisme penghambatan pertumbuhan mikroorganisme.

b. Sensor Biologis untuk Monitoring Kesegaran

Nanobiosensor mengintegrasikan nanomaterial dengan komponen biologis seperti enzim, antibodi, atau DNA untuk mendeteksi perubahan kualitas pangan secara *real-time* (Pasupuleti, 2024; UNS, 2019). Sensor ini dapat memberikan indikasi visual mengenai tingkat kesegaran, kontaminasi, atau kerusakan produk melalui perubahan warna atau sinyal lainnya. Teknologi ini menggabungkan sensitivitas tinggi nanomaterial dengan spesifisitas biologis dari reseptor bioteknologi (UNS, 2019).

2. Keamanan Pangan dan Deteksi Patogen Terintegrasi

Kombinasi nanoteknologi dan bioteknologi memberikan solusi yang jauh lebih unggul dalam menjaga keamanan pangan:

a. Biosensor Nano-Biologis untuk Deteksi Cepat

Pengembangan biosensor berbasis nanomaterial memungkinkan deteksi kontaminan biologis seperti bakteri, virus, dan toksin secara cepat dan akurat (Pasupuleti, 2024; UNS, 2019). Nanomaterial seperti nanopartikel emas, karbon nanotube, atau kuantum dot meningkatkan sensitivitas deteksi, sementara komponen biologis seperti antibodi atau aptamer memberikan spesifisitas tinggi terhadap target patogen tertentu (UNS, 2019). Teknologi ini memungkinkan pengujian keamanan pangan yang lebih cepat dibandingkan metode konvensional.

b. Sistem Keterlacakan Berbasis Nanoteknologi

Integrasi nanoteknologi dengan sistem bioteknologi memungkinkan pengembangan sistem keterlacakan yang lebih transparan di seluruh rantai pasok pangan (Pasupuleti, 2024). Nanotag atau penanda nano yang dapat dideteksi secara biologis membantu memastikan produk aman dikonsumsi dan meningkatkan kepercayaan konsumen melalui verifikasi asal dan kondisi produk secara akurat.

3. Peningkatan Nilai Gizi dan Kualitas Produk

Sinergi kedua teknologi ini menghasilkan inovasi signifikan dalam peningkatan kualitas nutrisi pangan:

a. Sistem Penyampaian Nutrisi Berbasis Nano

Nanoteknologi digunakan untuk mengembangkan sistem penyampaian (*delivery system*) yang meningkatkan bioavailabilitas nutrisi dan senyawa bioaktif (Pasupuleti, 2024; UNS, 2019). Nanopartikel atau nanoemulsi berfungsi sebagai pembawa yang melindungi nutrisi sensitif dari degradasi selama pemrosesan dan pencernaan, sekaligus meningkatkan penyerapan di dalam tubuh. Pendekatan ini menggabungkan prinsip bioteknologi dalam memahami metabolisme nutrisi dengan kemampuan nanoteknologi dalam mengontrol pelepasan senyawa (UNS, 2019).

b. Fortifikasi dan Pengayaan Pangan

Teknologi nano-bioteknologi diaplikasikan dalam pembuatan bahan aditif sebagai nutrisi tambahan serta melalui teknik fortifikasi untuk memerangi defisiensi nutrisi di masyarakat (Pasupuleti, 2024; UNS, 2019). Nanopartikel memungkinkan penambahan mikronutrien seperti vitamin dan mineral dalam bentuk yang lebih stabil dan bioavailable, sementara bioteknologi membantu dalam memproduksi nutrisi ini secara berkelanjutan melalui fermentasi atau rekayasa mikroorganisme (Faridah & Sari, 2019; Maryam, 2017).

4. Integrasi dengan Bioteknologi Konvensional

Nanoteknologi memperkuat dan meningkatkan efisiensi bioteknologi konvensional yang telah lama berkembang:

a. Optimalisasi Proses Fermentasi

Aplikasi nanoteknologi dalam proses fermentasi tradisional seperti pembuatan tempe, oncom, tape, kecap, yoghurt, keju, dan roti dapat meningkatkan efisiensi dan kualitas produk (Faridah & Sari, 2019; Khazalina, 2020; Wasilah et al., 2019). Nanomaterial digunakan untuk meningkatkan aktivitas dan stabilitas mikroorganisme fermentasi, mempercepat proses, serta menghasilkan produk dengan karakteristik sensorik yang lebih baik (Faridah & Sari, 2019). Pendekatan ini menggabungkan kearifan lokal bioteknologi konvensional dengan kecanggihan nanoteknologi modern.

b. Pengembangan Starter Kultur Nano-Enhanced

Nanoteknologi memungkinkan pengembangan starter kultur dengan viabilitas dan aktivitas yang lebih tinggi untuk berbagai aplikasi fermentasi pangan (Faridah & Sari, 2019; Khazalina, 2020). Nanopartikel dapat digunakan untuk melindungi mikroorganisme probiotik selama pemrosesan dan penyimpanan, memastikan mereka tetap hidup dan aktif saat dikonsumsi, sehingga memberikan manfaat kesehatan yang optimal.

5. Integrasi dengan Bioteknologi Modern dan Rekayasa Genetika

Kombinasi dengan bioteknologi modern membuka peluang inovasi yang lebih luas:

a. Nanomaterial untuk Rekayasa Genetika Tanaman

Nanoteknologi berperan sebagai platform inovatif untuk pengiriman material genetik dalam rekayasa tanaman pangan (Nair, 2020; Wasilah et al., 2019). Nanopartikel dapat digunakan sebagai vektor untuk mengantarkan DNA, RNA, atau protein CRISPR ke dalam sel tanaman dengan efisiensi dan spesifisitas yang lebih tinggi dibandingkan metode konvensional. Pendekatan ini memungkinkan pengembangan varietas tanaman yang tahan hama, tahan penyakit, atau toleran kekeringan dengan cara yang lebih presisi dan aman (Nair, 2020).

b. Produksi Enzim dan Protein Rekombinan

Integrasi nanoteknologi dengan bioteknologi rekombinan meningkatkan efisiensi produksi enzim dan protein untuk industri pangan (Faridah & Sari, 2019; Maryam, 2017). Nanomaterial digunakan untuk meningkatkan ekspresi gen, stabilitas protein, dan pemurnian produk, sehingga menghasilkan enzim yang lebih efisien untuk pengolahan pangan dan bahan tambahan pangan (Maryam, 2017).

6. Keberlanjutan dan Nilai Tambah

Integrasi kedua teknologi ini memberikan kontribusi signifikan terhadap keberlanjutan sistem pangan:

a. Pengurangan Limbah dan Ekonomi Sirkular

Bioteknologi berperan dalam remediasi lingkungan dan produksi bioplastik yang ramah lingkungan untuk mengurangi sampah plastik dari kemasan pangan (Wasilah et al., 2019). Nanoteknologi meningkatkan efisiensi proses ini melalui pengembangan katalis nano dan material berkinerja tinggi. Kombinasi keduanya mendukung transisi menuju ekonomi sirkular di sektor

pangan dengan meminimalkan limbah dan memaksimalkan pemanfaatan sumber daya.

b. Inovasi Halal dan Nilai Tambah

Di konteks Indonesia, integrasi nanoteknologi dan bioteknologi memberikan peluang untuk pengembangan produk halal berbasis teknologi (Faridah & Sari, 2019; Khazalina, 2020). Penggunaan mikroorganisme seperti *Saccharomyces cerevisiae* dalam produksi pangan halal dapat ditingkatkan melalui aplikasi nanoteknologi untuk meningkatkan efisiensi dan kualitas produk (Khazalina, 2020). Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan nilai tambah produk, tetapi juga memperkuat posisi Indonesia dalam pasar pangan halal global.

c. Tantangan dan Prospek Masa Depan

Meskipun menawarkan potensi besar, integrasi nanoteknologi dan bioteknologi dalam bidang pangan menghadapi beberapa tantangan yang perlu diatasi:

d. Aspek Keamanan dan Regulasi

Penerapan nanomaterial dalam pangan memerlukan evaluasi keamanan yang menyeluruh untuk memastikan tidak ada efek negatif pada kesehatan manusia dan lingkungan (Nair, 2020; Oba & Yıldırım, 2021). Regulasi yang jelas dan standar internasional yang harmonis diperlukan untuk memfasilitasi adopsi teknologi ini sambil menjaga keamanan konsumen.

e. Penerimaan Konsumen

Pendidikan dan transparansi menjadi kunci untuk meningkatkan penerimaan konsumen terhadap produk pangan yang dihasilkan melalui integrasi nanoteknologi dan bioteknologi (Loizzo *et al.*, 2018). Pemahaman yang baik tentang manfaat dan keamanan teknologi ini akan membantu mengatasi resistensi dan membangun kepercayaan masyarakat.

f. Pengembangan Kapasitas dan Riset

Indonesia perlu terus mengembangkan kapasitas penelitian dan pengembangan di bidang nano-

bioteknologi pangan (Loizzo et al., 2018; Wasilah et al., 2019). Kolaborasi antara institusi akademik, industri, dan pemerintah menjadi penting untuk mempercepat inovasi dan memastikan pemanfaatan teknologi ini sesuai dengan kebutuhan nasional.

Integrasi nanoteknologi dan bioteknologi merepresentasikan masa depan inovasi di bidang pangan yang tidak hanya meningkatkan efisiensi dan kualitas, tetapi juga berkontribusi pada ketahanan pangan, keberlanjutan lingkungan, dan kesejahteraan masyarakat. Sinergi kedua teknologi ini akan terus menjadi kunci dalam menghadapi tantangan pangan global di abad ke-21.

2.4 Keunggulan dan Keterbatasan Nanobioteknologi Dalam Inovasi Pangan

Nanobioteknologi, yang merupakan integrasi antara nanoteknologi dan bioteknologi, menawarkan solusi revolusioner dalam industri pangan dengan memanipulasi materi pada skala molekuler untuk meningkatkan kualitas dan keamanan produk (Pasupuleti, 2024; UNS, 2019). Namun, di balik potensi besarnya, teknologi ini juga menghadapi berbagai tantangan teknis dan etis yang perlu diatasi.

Berikut adalah uraian mengenai keunggulan dan keterbatasan nanobioteknologi di bidang pangan:

2.4.1 Keunggulan Nanobioteknologi Pangan

Penerapan nanobioteknologi memberikan keunggulan kompetitif yang signifikan dibandingkan metode pengolahan pangan konvensional:

1. Presisi Tinggi dalam Keamanan Pangan

Integrasi nanobiosensor memungkinkan deteksi kontaminan, bakteri patogen, dan toksin secara jauh lebih cepat dan akurat dibandingkan metode laboratorium tradisional (Pasupuleti, 2024; UNS, 2019). Nanomaterial meningkatkan sensitivitas deteksi hingga ke level molekuler, sehingga risiko keracunan pangan dapat diminimalisir melalui pemantauan *real-time* (UNS, 2019).

2. Peningkatan Bioavailabilitas Nutrisi

Nanobioteknologi memungkinkan enkapsulasi nutrisi sensitif (seperti vitamin, mineral, dan antioksidan) dalam sistem pengiriman skala nano (Pasupuleti, 2024; UNS, 2019). Keunggulannya meliputi:

- a. **Perlindungan Nutrisi:** Melindungi zat gizi dari degradasi selama proses pengolahan dan pencernaan (UNS, 2019).
- b. **Pelepasan Terkontrol:** Memastikan nutrisi diserap secara optimal oleh tubuh di lokasi yang tepat dalam sistem pencernaan (Pasupuleti, 2024).

3. Revolusi Pengemasan Pangan

Penggunaan partikel nano dalam bahan pengemas tidak hanya meningkatkan sifat mekanik dan ketahanan panas, tetapi juga memberikan fungsi aktif (UNS, 2019). Nanokomposit dapat bertindak sebagai penghalang oksigen dan kelembapan yang sangat efisien, sehingga memperpanjang masa simpan produk secara signifikan tanpa perlu banyak bahan pengawet kimia (Pasupuleti, 2024; UNS, 2019).

4. Efisiensi Produksi dan Keberlanjutan

Teknologi ini mendukung keberlanjutan melalui optimalisasi proses fermentasi dan penggunaan enzim rekombinan yang lebih stabil (Faridah & Sari, 2019; Maryam, 2017). Hal ini menghasilkan limbah yang lebih sedikit dan penggunaan sumber daya yang lebih efisien dalam rantai produksi (Wasilah et al., 2019).

2.4.2 Keterbatasan dan Tantangan Nanobioteknologi

Meskipun memiliki keunggulan luar biasa, terdapat beberapa hambatan utama yang membatasi adopsi luas teknologi ini:

1. Isu Keamanan dan Toksisitas

Tantangan terbesar adalah ketidakpastian mengenai dampak jangka panjang nanopartikel terhadap kesehatan manusia (Nair, 2020; Oba & Yildirim, 2021). Sifat unik material pada skala nano (seperti reaktivitas kimia yang tinggi) dikhawatirkan dapat menembus sawar biologis dalam tubuh manusia dan

menyebabkan akumulasi yang tidak diinginkan di organ tertentu (Oba & Yildirim, 2021).

2. Biaya Produksi yang Tinggi

Implementasi nanobioteknologi memerlukan investasi yang besar dalam hal peralatan canggih dan bahan baku berkualitas tinggi (Faridah & Sari, 2019). Hal ini menyebabkan produk pangan berbasis nanobioteknologi cenderung lebih mahal, sehingga sulit dijangkau oleh pasar luas di negara berkembang (Wasilah et al., 2019).

3. Kesenjangan Regulasi dan Standarisasi

Hingga saat ini, kerangka regulasi internasional yang mengatur penggunaan nanomaterial dalam pangan masih terus berkembang (Nair, 2020; Oba & Yildirim, 2021). Kurangnya standarisasi dalam pengujian keamanan dan pelabelan produk membuat produsen ragu untuk menerapkan teknologi ini secara penuh.

4. Penerimaan Konsumen dan Persepsi Publik

Masih terdapat resistensi dari masyarakat terhadap pangan hasil rekayasa teknologi canggih (serupa dengan isu tanaman transgenik). Kurangnya edukasi dan transparansi mengenai manfaat serta keamanan nanobioteknologi sering kali memicu kekhawatiran publik yang menghambat inovasi di pasar retail (Loizzo et al., 2018).

5. Kompleksitas Teknis

Proses integrasi antara komponen biologis (enzim/antibodi) dengan material nano memerlukan keahlian teknis yang sangat spesifik (UNS, 2019). Stabilitas interaksi antara kedua komponen ini sering kali sulit dipertahankan dalam kondisi penyimpanan pangan yang bervariasi.



Gambar 2.3. Keterbatasan dan tantangan Nanobioteknologi
Sumber : Dibuat dengan Chat GPT (Open AI), 2026

2.5 Relevansi Nanobioteknologi Dalam Inovasi Pangan

Relevansi nanobioteknologi dalam pengembangan inovasi pangan saat ini telah mencapai titik krusial, di mana integrasi antara manipulasi materi skala nano dan sistem biologis menjadi solusi utama bagi tantangan global seperti ketahanan pangan, malnutrisi, dan standar keamanan yang ketat (Ceylan & Meral, 2023).

Berikut adalah poin-poin utama relevansi nanobioteknologi dalam inovasi pangan modern :

1. Menjawab Tantangan Ketahanan Pangan Global

Nanobioteknologi sangat relevan dalam upaya mencapai target *Zero Hunger* melalui peningkatan efisiensi rantai pasok.

- Pengurangan Limbah:** Penggunaan nanofiber dan nanopartikel dalam pengemasan aktif memperpanjang masa simpan produk secara signifikan, yang secara langsung mengurangi jumlah makanan yang terbuang (*food waste*) (Ceylan & Meral, 2023; Dwivedi et al., 2018).
- Logistik Efisien:** Produk berbasis nanobioteknologi menawarkan solusi logistik yang lebih hemat biaya dan aman, yang sangat penting untuk mendistribusikan pangan ke daerah-daerah yang mengalami kelaparan atau krisis pangan (Ceylan & Meral, 2023).

2. Personalisasi Nutrisi dan Kesehatan

Relevansi teknologi ini terletak pada kemampuannya untuk memodifikasi cara tubuh berinteraksi dengan nutrisi.

- a. **Nanoenkapsulasi:** Teknik ini melindungi bahan bioaktif seperti vitamin, probiotik, dan antioksidan dari degradasi selama proses pengolahan dan pencernaan (Durán & Marcato, 2012; Dwivedi et al., 2018).
- b. **Peningkatan Bioavailabilitas:** Nanobioteknologi memastikan bahwa nutrisi diserap secara lebih efisien oleh tubuh, memungkinkan pengembangan pangan fungsional yang dapat disesuaikan dengan kebutuhan kesehatan spesifik individu (Pasupuleti, 2024).

3. Inovasi Halal dan Tayyib di Indonesia

Bagi konteks Indonesia, nanobioteknologi memiliki relevansi khusus dalam memperkuat ekosistem industri halal.

- a. **Parameter Halal Berbasis Teknologi:** Penelitian terbaru menunjukkan perlunya pengembangan parameter baru untuk memastikan bahwa inovasi pangan berbasis teknologi nano tetap sesuai dengan prinsip Syariah (*Maqasid Daruriyyah*) (Omar, Hashim, & Kossachi, 2024; Omar, Hashim, Muda, et al., 2024).
- b. **Peran Akademisi:** Institusi pendidikan tinggi di Indonesia, seperti ITS, kini mulai mengintegrasikan pusat kajian halal dengan pusat penelitian bioteknologi untuk memastikan produk hasil inovasi teknologi nano memenuhi kriteria *halalan tayyiban* (halal, bersih, dan aman) (Gunawan et al., 2022; Risza, 2024).
- c. **Verifikasi Kandungan:** Nanobiosensor memungkinkan verifikasi cepat terhadap kandungan bahan yang dilarang dalam produk pangan, memberikan tingkat transparansi yang lebih tinggi bagi konsumen Muslim (Hashim et al., 2024).

4. Keamanan Pangan dan Monitoring Real-Time

Relevansi nanobioteknologi juga terlihat pada pergeseran metode kontrol kualitas dari laboratorium ke sistem *real-time*.

- a. **Deteksi Patogen Cepat:** Nanobiosensor secara signifikan mengurangi waktu yang dibutuhkan untuk

mendeteksi kontaminan organik dan patogen dibandingkan metode konvensional (Durán & Marcato, 2012).

- b. **Aplikasi "Nano-Outside":** Integrasi nanopartikel ke dalam bahan kontak pangan (kemasan) memungkinkan pemantauan kondisi makanan secara terus-menerus selama distribusi (Santeramo *et al.*, 2017).

5. Pertumbuhan Ekonomi dan Pasar Global

Secara ekonomi, inovasi ini sangat relevan mengingat pasar nanoteknologi global diprediksi mencapai angka \$125 miliar pada tahun 2024, di mana sektor pangan memegang porsi yang signifikan dalam struktur permintaan tersebut (Kruhlova *et al.*, 2019). Perusahaan pangan yang paling siap mengadopsi teknologi ini akan memiliki keunggulan kompetitif dalam hal kualitas produk dan efisiensi produksi (Kruhlova *et al.*, 2019). Nanobioteknologi bukan sekadar tren teknologi, melainkan kebutuhan mendesak untuk menciptakan sistem pangan yang lebih cerdas, aman, dan inklusif sesuai dengan nilai-nilai kemanusiaan dan keberlanjutan (Ceylan & Meral, 2023; Omar *et al.*, 2024).



Gambar 2.4. Relevansi Nanobioteknologi dalam Inovasi Pangan
Sumber : Dibuat dengan Chat GPT (Open AI), 2026

DAFTAR PUSTAKA

- Ali, S., Al-Tohamy, R., Koutra, E., Moawad, M., Kornaros, M., Mustafa, A., Mahmoud, Y., Badr, A., Osman, M., Elsamahy, T., Jiao, H. & Sun, J., 2021. Nanobiotechnological advancements in agriculture and food industry: Applications, nanotoxicity, and future perspectives. *Science of the Total Environment*, 792, p.148359. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148359>
- Al-Harbi, N. & Abd-Elrahman, N., 2024. Physical methods for preparation of nanomaterials, their characterization and applications: A review. *Journal of Umm Al-Qura University for Applied Sciences*, 11, pp.356–377. <https://doi.org/10.1007/s43994-024-00165-7>
- Biswas, R., Alam, M., Sarkar, A., Haque, M., Hasan, M. & Hoque, M., 2022. Application of nanotechnology in food: Processing, preservation, packaging and safety assessment. *Heliyon*, 8, e11795. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11795>
- Ceylan, Z. & Meral, R., 2023. A practiced nanobiotechnology approach with the scope of nutrition, food safety, dietetics, gastronomy, and sustainability for humans by fish meat and fish products preservation: A review. *Annals of Animal Science*, 23(3), pp.725–736. <https://doi.org/10.2478/aoas-2023-0037>
- Durán, N. & Marcato, P.D., 2012. Nanobiotechnology perspectives: Role of nanotechnology in the food industry: A review. *International Journal of Food Science & Technology*, 48(6), pp.1127–1134. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12027>
- Dwivedi, C., Pandey, I., Misra, V., Giubudagian, M., Jungnickel, H., Laux, P., Luch, A., Ramteke, P.W. & Singh, A.V., 2018. The prospective role of nanobiotechnology in food and food packaging products. *Integrative Food, Nutrition and Metabolism*, 5(6). <https://doi.org/10.15761/ifnm.1000237>
- Faridah, H.D. & Sari, S.K., 2019. Utilization of microorganism on the development of halal food based on biotechnology. *Journal of Halal Product and Research*, 2(1), pp.33–43. <https://doi.org/10.20473/jhpr.vol2-issue.1.33-43>
- Gunawan, S., Rakhmawati, N.A., Juwari, J., Aparamarta, H.W., Darmawan, R., Pradhana, Y.W. & Prabowo, A., 2022. Merajut

- ekosistem industri halal dalam menumbuhkembangkan usaha kompetitif melalui Merdeka Belajar. *Sewagati*, 6(4), pp.1–10. <https://doi.org/10.12962/j26139960.v6i4.110>
- Guo, Y., Qiu, Y. & Chen, Z., 2024. Integrating nanocomposites and biosensors: Towards an intelligent food packaging system. *BIO Web of Conferences*. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202411101005>
- Gulzar, A., Rather, M., Mushtaq, H., Ashraf, R., Rashid, A., Parveen, M., Mansoor, G., Gulaam, S. & Bano, S., 2024. Nanotechnology-enhanced phytonutraceuticals: Innovations in characterization, formulation, and therapeutic applications. *Journal of Advances in Biology & Biotechnology*. <https://doi.org/10.9734/jabb/2024/v27i111647>
- Hammud, K., 2023. A brief journey in nanomaterials: Base and recent research trends. *Iraqi Journal of Industrial Research*. <https://doi.org/10.53523/ijoirvol10i2id288>
- Hashim, P.H.N.P.H., Omar, N. & Kossachi, S.N.R., 2024. The position of maqasid daruriyyah in addressing the halal status of food product innovations today. *International Journal of Academic Research in Progressive Education and Development*, 13(2). <https://doi.org/10.6007/ijarped/v13-i2/21216>
- Joudeh, N. & Linke, D., 2022. Nanoparticle classification, physicochemical properties, characterization, and applications: A comprehensive review for biologists. *Journal of Nanobiotechnology*, 20. <https://doi.org/10.1186/s12951-022-01477-8>
- Khan, Y., Sadia, H., Shah, S., Khan, M., Shah, A., Ullah, N., Ullah, M., Bibi, H., Bafakeeh, O., Khedher, N., Eldin, S., Fadhl, B. & Khan, M., 2022. Classification, synthetic, and characterization approaches to nanoparticles, and their applications in various fields of nanotechnology: A review. *Catalysts*. <https://doi.org/10.3390/catal12111386>
- Khazalina, T., 2020. *Saccharomyces cerevisiae* in making halal products based on conventional biotechnology and genetic engineering. *Journal of Halal Product and Research*, 3(2), pp.88–94. <https://doi.org/10.20473/jhpr.vol.3-issue.2.88-94>

- Kruhlova, O., Yevlash, T., Yevlash, V., Tsykhanovska, I. & Potapov, V., 2019. Comprehensive analysis of food production efficiency using nanoparticles of nutritional supplements based on iron oxides. *Ukrainian Food Journal*, 8(2), pp.400–410. <https://doi.org/10.24263/2304-974x-2019-8-2-17>
- Loizzo, J., Goodman, R.E. & Garbacz, M., 2018. Piloting participatory arts-based methods for exploring Indonesians' experiences in a U.S. biotechnology training program. *Journal of Applied Communications*, 102(3). <https://doi.org/10.4148/1051-0834.2195>
- Maryam, B.M., 2017. The role of biotechnology in food production and processing. *Engineering and Applied Sciences*, 2(6), pp.113–117. <https://doi.org/10.11648/j.eas.20170206.14>
- Nair, A.P., 2020. Biotechnology in the food industry. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 8(5), pp.2708–2712. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2020.5455>
- Nile, S.H., Baskar, V., Selvaraj, D., Nile, A., Xiao, J. & Kai, G., 2020. Nanotechnologies in food science: Applications, recent trends, and future perspectives. *Nano-Micro Letters*, 12. <https://doi.org/10.1007/s40820-020-0383-9>
- Oba, Ş. & Yıldırım, T., 2021. Food biotechnology and food safety. *International Journal of Science Letters*, 3(1), pp.52–58. <https://doi.org/10.38058/ijsl.855920>
- Omar, N., Hashim, N., Muda, Z., Embong, R. & Yaakob, R., 2024. Parameters for determining halal compliance of technology-driven innovations in the food industry: Advancing SDG 2 on food security. *Journal of Lifestyle and SDGs Review*, 5(1). <https://doi.org/10.47172/2965-730x.sdgsreview.v5.n01.pe03577>
- Omar, N., Hashim, P.H.N.P.H. & Kossachi, S.N.S.R., 2024. Synthesizing the dimensions of maqasid daruriyyah in facing the challenges of contemporary halal food product innovation. *International Journal of Academic Research in Business and Social Sciences*, 14(2). <https://doi.org/10.6007/ijarbss/v14-i2/20750>

- Pasupuleti, M.K., 2024. Advances in food science and modern technologies. In: *Food Science and Technology*. CRC Press, p.15. <https://doi.org/10.62311/nesx/97882>
- Pozzi, M., Dutta, S., Kuntze, M., Bading, J., Rüßbült, J., Fabig, C., Langfeldt, M., Schulz, F., Horcajada, P. & Parak, W., 2024. Visualization of the high surface-to-volume ratio of nanomaterials and its consequences. *Journal of Chemical Education*, 101, pp.3146–3155. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.4c00089>
- Risza, H., 2024. The role of universities in pioneering halal product innovation and education in Indonesia. *Al-Ishlah: Jurnal Pendidikan*, 16(2), pp.821–830. <https://doi.org/10.35445/alishlah.v16i2.5218>
- Santeramo, F.G. et al., 2017. Emerging trends in European food, diets and food industry. *Food Research International*, 104, pp.39–47. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.10.039>
- Sahoo, M., Vishwakarma, S., Panigrahi, C. & Kumar, J., 2020. Nanotechnology: Current applications and future scope in food. *Food Frontiers*. <https://doi.org/10.1002/fft2.58>
- Silva, T.E.M., Engelmann, W. & Hohendorf, R., 2016. Nanotecnologias e os desafios no campo alimentar: Que futuro nos espera? *Revista TOMO*. <https://doi.org/10.21669/tomo.v0i0.5982>
- Sonkaria, S., Ahn, S. & Khare, V., 2012. Nanotechnology and its impact on food and nutrition: A review. *Recent Patents on Food, Nutrition & Agriculture*, 4(1), pp.8–18. <https://doi.org/10.2174/1876142911204010008>
- UNS, Department of Chemistry, 2019. Seminar of Chemistry 2017. *Proceeding of Chemistry Conferences*, 3. <https://doi.org/10.20961/pcc.v3i0.27520>
- Wahab, A. et al., 2024. Agriculture and environmental management through nanotechnology: Eco-friendly nanomaterial synthesis for soil-plant systems, food safety, and sustainability. *Science of the Total Environment*, p.171862. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171862>
- Wasilah, U., Rohimah, S. & Su'udi, M., 2019. Perkembangan bioteknologi di Indonesia. *Rekayasa*, 12(2), pp.85–92. <https://doi.org/10.21107/rekayasa.v12i2.5469>

Yusuf, A., Almotairy, A., Henidi, H., Alshehri, O. & Aldughaim, M., 2023. Nanoparticles as drug delivery systems: A review of physicochemical properties and biological responses. *Polymers*, 15. <https://doi.org/10.3390/polym15071596>

BAB 3

BIOTEKNOLOGI DALAM PRODUKSI PANGAN FERMENTASI, ENZIM, DAN KULTUR SEL

Bioteknologi telah menjadi salah satu inovasi penting dalam produksi pangan modern. Melalui pemanfaatan agen biologis—seperti mikroorganisme, enzim, dan kultur sel—yang bertindak layaknya "pabrik mini", proses produksi dapat dilakukan secara lebih efisien, berkelanjutan, dan ramah lingkungan untuk menghasilkan pangan yang lebih awet, lezat, serta bergizi. Dalam satu dekade terakhir, fokus penerapan bioteknologi ini telah bergeser dari fermentasi tradisional menuju pendekatan yang lebih mutakhir, seperti fermentasi presisi (*precision fermentation*), rekayasa enzim, dan pertanian seluler (*cellular agriculture*). Oleh karena itu, bab ini bertujuan untuk memberikan pemahaman mendalam mengenai peran agen biologis tersebut serta bagaimana perkembangannya memengaruhi kualitas maupun keamanan pangan yang dihasilkan (Terefe dan Augustin, 2020).

3.1 Definisi dan Peran Mikroba dalam Fermentasi

Agen biologis seperti bakteri, ragi, dan jamur memegang peranan krusial dalam berbagai proses fermentasi pangan pada skala industri. Fermentasi didefinisikan sebagai jalur metabolisme yang memproses molekul organik kompleks guna menghasilkan struktur yang jauh lebih sederhana. Fokus utama dari proses biokimia ini adalah konversi karbohidrat menjadi produk turunan melalui mekanisme aktivitas enzimatik mikroba yang spesifik. Secara sistematis, mikroorganisme tersebut memecah substrat organik untuk menghasilkan metabolit primer seperti asam organik, alkohol,

dan gas. Interaksi antara enzim mikroba dan substrat menentukan efisiensi transformasi molekul dalam lingkungan fermentasi yang terkendali secara parameter fisik dan kimia. Fenomena ini memungkinkan pemanfaatan mikroba sebagai instrumen bioteknologi dalam menghasilkan senyawa kimia fungsional yang memiliki nilai ekonomi tinggi (Praveen dan Brogi, 2025; Sawant *dkk.*, 2025).

Mikroorganisme dalam sistem ini berfungsi sebagai "pabrik miniatur" yang secara aktif mentransformasi bahan baku menjadi produk akhir yang berkualitas. Transformasi tersebut mencakup modifikasi karakteristik sensoris yang meliputi peningkatan intensitas rasa, aroma, serta perbaikan tekstur pada produk pangan. Selain itu, aktivitas metabolik mikroba secara signifikan mampu meningkatkan profil nilai gizi dan bioavailabilitas nutrisi bagi kesehatan manusia. Keunggulan lain dari proses fermentasi terletak pada fungsinya sebagai metode pengawetan alami yang sangat efektif untuk memperpanjang masa simpan. Mekanisme pengawetan ini bekerja dengan cara menurunkan derajat keasaman (pH) serta memproduksi senyawa antimikroba yang menghambat pertumbuhan patogen. Dengan demikian, integrasi agen biologis ini tidak hanya menjamin keamanan pangan, tetapi juga mencegah degradasi kualitas akibat kontaminasi mikroorganisme perusak (Sionek, *dkk.*, 2023; Sun, *dkk.*, 2025).

3.2 Enzim sebagai Katalisator Biologis

Enzim adalah protein yang berfungsi sebagai katalis dalam berbagai reaksi biokimia. Dalam produksi pangan, enzim digunakan untuk mempercepat reaksi sehingga proses produksi menjadi lebih efisien. Enzim memiliki peran penting dalam berbagai bidang, termasuk medis, pangan, kosmetik, dan industri kimia, tetapi pemanfaatannya sering terhambat oleh masalah stabilitas dan biaya produksi yang tinggi. Untuk skala industri, enzim harus tetap aktif dalam waktu lama, tahan terhadap perubahan suhu dan pH, serta bisa digunakan berulang kali agar proses menjadi efisien dan ekonomis. Salah satu solusi utama adalah teknik imobilisasi enzim, yaitu menempelkan enzim pada pembawa inert atau membentuk agregat terikat silang sehingga enzim menjadi lebih stabil dan mudah

dipisahkan dari produk. Metode seperti adsorpsi, ikatan kovalen, penjeratan, enkapsulasi, dan *cross-linked enzyme aggregates* (CLEAs) terbukti dapat meningkatkan ketahanan enzim sekaligus mengurangi limbah dan biaya proses. Pendekatan ini sejalan dengan prinsip kimia hijau karena memungkinkan proses biokatalisis yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan (Atiroğlu *et al.*, 2024; Robescu & Bavaro, 2025; Wahab, 2025;).

Di industri pangan, enzim imobil digunakan untuk meningkatkan tekstur, rasa, umur simpan, dan keamanan produk dengan tetap menjaga efisiensi proses. Imobilisasi memungkinkan enzim seperti protease, lipase, dan transglutaminase bekerja pada kondisi proses yang keras, misalnya suhu lebih tinggi atau pH ekstrem, tanpa cepat terdenaturasi. Berbagai penelitian juga menunjukkan bahwa hidrolisis enzimatis terkontrol dapat menghasilkan peptida dengan aktivitas antioksidan, antihipertensi, antimikroba, dan sifat fungsional yang baik untuk formulasi pangan fungsional. Selain itu, pemanfaatan bahan baku samping seperti tulang ayam, karkas ayam cincang, dan limbah protein kedelai menjadi hidroisat bernilai tinggi membantu mengurangi limbah dan mendukung praktik produksi pangan yang lebih berkelanjutan. Dengan demikian, pengembangan teknologi imobilisasi dan rekayasa enzim menjadi kunci untuk meningkatkan kualitas gizi, fungsi, dan keberlanjutan industri pangan modern (Mao *et al.*, 2024; Yao *et al.*, 2026).

3.3 Kultur Sel dalam Produksi Pangan

Kultur sel merupakan bagian dari pertanian seluler yang memanfaatkan pertumbuhan dan manipulasi sel dalam kondisi terkontrol untuk menghasilkan produk pangan tanpa perlu membesarkan hewan atau menanam tanaman secara konvensional. Teknologi ini dapat digunakan untuk memproduksi daging budidaya dari sel hewan, protein nutrisi, serta senyawa bioaktif bernilai tinggi dari sel tanaman yang bermanfaat bagi kesehatan manusia. Contoh penerapannya adalah produksi daging kultur dari kultur sel hewan dan produksi senyawa bioaktif, pigmen, aroma, serta suplemen diet dari kultur sel tanaman dalam bioreaktor skala besar. Dalam konteks ini, sel berfungsi sebagai “pabrik mini” atau *biofactory* yang dapat

direkayasa secara metabolik untuk menghasilkan produk dengan komposisi gizi, kualitas, dan karakteristik sensori yang disesuaikan dengan kebutuhan (Bapat *et al.*, 2023; Yart *et al.*, 2023).

3.4 Fermentasi Substrat Padat (SSF) dan Cair (SmF) Modern

Fermentasi substrat padat *Solid State Fermentation* (SSF) dan fermentasi substrat cair *Submerged Fermentation* (SmF) merupakan dua pendekatan utama dalam bioteknologi pangan untuk mengubah bahan nabati dan limbah agroindustri menjadi produk bernilai tambah seperti enzim, senyawa fenolik antioksidan, protein mikrobial, dan biopolimer. SSF melibatkan pertumbuhan mikroorganisme pada bahan padat lembap tanpa fase cair bebas, sedangkan SmF menggunakan medium cair homogen (López-Gómez & Venus, 2021; Suryani *et al.*, 2023).

SSF memiliki keunggulan komparatif dalam aspek keberlanjutan lingkungan karena konsumsi air yang rendah, optimalisasi pemanfaatan limbah lignoselulosa, serta minimalisasi produksi limbah cair. Meskipun demikian, implementasi SSF pada skala industri masih menghadapi tantangan teknis yang kompleks terkait pengendalian suhu dan kelembapan akibat sifat heterogenitas substrat dalam bioreaktor. Sebaliknya, SmF memfasilitasi pengendalian parameter fisikokimia seperti pH, suhu, dan konsentrasi nutrisi secara presisi melalui integrasi sistem pemantauan daring yang canggih. Oleh karena itu, SmF menjadi metode yang sangat ideal untuk memproduksi enzim, metabolit sekunder, dan biopolimer yang memerlukan standarisasi kondisi lingkungan fermentasi yang sangat ketat. Kemajuan terkini dalam teknologi proses dan pemantauan waktu nyata pada kedua pendekatan tersebut telah meningkatkan efisiensi serta keberlanjutan siklus produksi secara signifikan. Sinergi fungsional melalui pendekatan inovatif seperti kombinasi sekuensial SSF-SmF terbukti mampu mengoptimalkan luaran produksi, sebagaimana dikonfirmasi dalam studi oleh Muigano *et al.* (2024) serta Tangjaidee *et al.* (2025).

3.4.1 Keunggulan dan Keterbatasan SSF

1. Keunggulan:

- a. Menggunakan limbah agro-industri sebagai substrat; mengurangi limbah dan beban lingkungan (Catalán & Sánchez, 2020).
- b. Sering membutuhkan lebih sedikit air dan energi untuk aerasi/pengadukan dibanding SmF karena proses lebih statis (Arora *et al.*, 2018).
- c. Risiko kontaminasi dan limbah cair lebih rendah (Chmelová *et al.*, 2022).

2. Keterbatasan:

- a. Sistem sangat heterogen, sehingga kontrol suhu, kelembapan, dan skala-up bioreaktor sulit (López-Gómez & Venus, 2021).

3.4.2 Keunggulan & Keterbatasan SmF

1. Keunggulan:

- a. Medium homogen memudahkan kontrol pH, suhu, oksigen, dan nutrisi secara real-time dan otomatis (Dzurendová *et al.*, 2023).
- b. Cocok untuk produk yang butuh kondisi sangat terkontrol dan monitoring online (misalnya Raman *spectroscopy*) (Dzurendová *et al.*, 2023).

2. Keterbatasan:

- a. Secara LCA, untuk kasus produksi selulase, SmF menunjukkan dampak lingkungan lebih tinggi daripada SSF (energi, bahan kimia, limbah) (Catalán & Sánchez, 2020).

3.4.3 Fermentasi Presisi (*Precision Fermentation*)

Fermentasi presisi merupakan perkembangan terbaru dalam teknologi fermentasi yang memanfaatkan teknik rekayasa genetika dan biologi sintetis untuk menghasilkan produk pangan dengan karakteristik yang diinginkan. Teknik ini memungkinkan produksi komponen pangan spesifik, seperti protein atau lipid, dengan kemampuan kontrol yang tinggi terhadap proses biokimia (Ducat, *et al.*, 2021).

Dalam fermentasi presisi, mikroorganisme yang digunakan direkayasa untuk memiliki kemampuan produksi yang tinggi terhadap senyawa target. Mikroorganisme ini dapat dioptimalkan untuk memproduksi komponen pangan tertentu dengan efisiensi yang tinggi dan biaya yang lebih rendah dibandingkan metode konvensional (Moore, *et al.*, 2021). Hal ini memungkinkan produksi komponen yang sulit atau mahal untuk diisolasi dari sumber alami.

Teknologi fermentasi presisi juga memberikan solusi untuk tantangan produksi pangan yang berkelanjutan. Dengan kemampuan untuk merekayasa mikroorganisme agar dapat menggunakan substrat yang lebih murah atau lebih berlimpah, fermentasi presisi dapat mengurangi ketergantungan pada sumber daya yang terbatas (Tubb, *et al.*, 2021). Hal ini sangat relevan dalam konteks produksi pangan global yang harus memenuhi permintaan yang meningkat.

Selain itu, fermentasi presisi juga dapat digunakan untuk meningkatkan kualitas dan keamanan pangan. Dengan kemampuan untuk memproduksi komponen bioaktif tertentu, fermentasi presisi dapat digunakan untuk meningkatkan nilai nutrisi dan rasa produk pangan, serta mengurangi kontaminan atau alergen (Ducat, *et al.*, 2021).

Secara keseluruhan, fermentasi presisi menawarkan potensi besar dalam revolusi produksi pangan dengan kemampuan menghasilkan produk yang lebih efisien, berkelanjutan, dan berkualitas tinggi. Pengembangan teknologi ini terus berlanjut dengan fokus pada peningkatan efisiensi produksi dan diversifikasi produk yang dapat dihasilkan.

3.4.4 Fermentasi Biomassa

Fermentasi biomassa atau produksi protein mikroba, yang sering dikenal sebagai *single-cell protein* (SCP), merupakan proses produksi biomassa mikroba kaya protein dengan memanfaatkan substrat organik murah, termasuk limbah agroindustri. Dalam satu dekade terakhir, kajian mengenai SCP terus meningkat karena potensinya sebagai sumber protein alternatif yang cepat, efisien dalam penggunaan lahan, serta selaras dengan prinsip ekonomi sirkular. (Yunus *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2024).

Mekanisme dan Optimasi Proses

Keberhasilan produksi SCP bergantung pada pemilihan mikroorganisme yang tepat, seperti ragi (*Saccharomyces*, *Candida*), kapang (*Rhizopus*, *Aspergillus*), bakteri asam laktat, hingga mikroalga. Untuk mencapai hasil optimal, proses fermentasi harus memperhatikan berbagai parameter teknis seperti ukuran dan umur inokulum, suhu operasional pada rentang 30–35 °C, pH media antara 5–6, rasio karbon terhadap nitrogen (C/N), serta aspek aerasi dan pengadukan. (Perwez & Asheh, 2024; Sharif *et al.*, 2021).

Terdapat dua mode utama dalam proses fermentasi ini, yaitu *Submerged Fermentation* (SmF) dan *Solid-state Fermentation* (SSF). SmF dilakukan dalam fase cair yang memudahkan kontrol parameter lingkungan dan sangat cocok untuk pengolahan limbah cair, sedangkan SSF beroperasi pada kadar air rendah sehingga lebih efisien untuk mengolah limbah padat seperti dedak, jerami, dan bagasse menjadi enzim atau pakan berkualitas tinggi. (Koukoumaki *et al.*, 2023; Chilakamarthy *et al.*, 2021).

Substrat dan Ekonomi Sirkular

Pemanfaatan limbah agroindustri sebagai substrat utama tidak hanya mampu menurunkan biaya produksi media fermentasi secara signifikan, tetapi juga membantu mengurangi beban pencemaran lingkungan. Pendekatan ini memperkuat ekosistem *circular bioeconomy* dengan mengubah material sisa menjadi produk bernilai tambah tinggi bagi rantai pasok pangan. (Mujtaba *et al.*, 2023; Subbarao *et al.*, 2023).

Kualitas Nutrisi dan Aplikasi Produk

Biomassa mikroba kering secara umum memiliki kandungan protein yang sangat tinggi, berkisar antara 30% hingga 80% dari berat kering, serta dilengkapi dengan karbohidrat, lipid, vitamin, dan mineral. Selain kuantitasnya, SCP juga memiliki profil asam amino esensial yang lengkap seperti lisin, metionin, dan treonin, yang sering kali menjadi pembatas pada bahan pangan berbasis nabati. (Bratosin *et al.*, 2021; Bogale, 2020).

Implementasi SCP telah menunjukkan hasil positif, misalnya pada peningkatan kadar protein kasar dedak gandum dari 4,21%

menjadi 41,02% melalui fermentasi oleh *Candida utilis* dan *Rhizopus oligosporus*. Dalam industri pakan, protein mikroba ini telah sukses diuji sebagai pengganti sebagian maupun seluruh komponen tepung ikan dan kedelai pada pakan ikan, udang, serta ternak ruminansia tanpa menurunkan kinerja pertumbuhan. (Tuci *et al.*, 2025; Bertasini *et al.*, 2022).

Tantangan Teknis dan Keamanan

Meskipun menjanjikan, terdapat tantangan teknis dalam pengolahan bahan lignoselulosa yang memerlukan *pretreatment* mahal akibat tingginya kadar lignin dan kristalinitas selulosa. Selain itu, pada skala industri, produsen masih menghadapi kendala dalam menjaga konsistensi kualitas produk akibat variabilitas karakteristik limbah serta kesulitan dalam kontrol panas dan aerasi pada sistem skala besar. (Kumar *et al.*, 2023; Šelo *et al.*, 2021). Aspek keamanan dan penerimaan konsumen juga menjadi faktor krusial yang harus diperhatikan jika SCP diproyeksikan untuk konsumsi manusia. Diperlukan prosedur kontrol yang ketat terhadap kontaminasi patogen dan toksin, serta evaluasi sensorik yang mendalam agar produk ini dapat diterima secara luas di pasar pangan global. (Sharifian *et al.*, 2025; Yrjälä *et al.*, 2022).

3.5 Teknologi Enzim (Biokatalisis) dalam Transformasi Pangan

3.5.1 Peran Enzim sebagai Biokatalisator Spesifik

Enzim merupakan protein fungsional yang bekerja sebagai biokatalisator, yaitu mempercepat reaksi kimia dengan menurunkan energi aktivasi dan mengubah substrat menjadi produk tanpa ikut habis bereaksi (Mubarik & Ambarsari., 2025). Penggunaan enzim memungkinkan banyak proses berlangsung pada kondisi yang lebih moderat (suhu dan pH lebih rendah atau mendekati netral) dibandingkan katalis kimia konvensional, sehingga lebih hemat energi dan ramah lingkungan. Salah satu karakteristik utama enzim adalah spesifisitas terhadap substrat dan jenis reaksi, misalnya protease hanya memotong ikatan peptida dalam protein, amilase menghidrolisis pati, atau lipase menghidrolisis trigliserida. Sifat ini sangat penting dalam industri pangan karena memungkinkan

pengendalian reaksi biokimia yang spesifik untuk membentuk atau memodifikasi komponen penentu kualitas dan rasa, seperti pembentukan asam amino penentu flavor kakao oleh bromelain, pemecahan laktosa oleh β -galaktosidase, atau pembentukan senyawa cita rasa pada produk fermentasi. Spesifisitas enzim dapat dibagi menjadi dua kategori utama: spesifisitas absolut dan spesifisitas relatif. Spesifisitas absolut berarti enzim hanya bekerja pada satu jenis substrat, sedangkan spesifisitas relatif berarti enzim dapat mengkatalisis reaksi dengan beberapa substrat yang memiliki struktur serupa. Misalnya, enzim lipase digunakan untuk menghidrolisis lemak dalam proses pembuatan keju, di mana hanya lipid tertentu yang diubah menjadi asam lemak bebas dan gliserol (Setiyoningrum *et al.*, 2021).

Selain spesifisitas, enzim juga dikenal karena kemampuannya mempercepat laju reaksi tanpa mengubah keadaan kesetimbangan kimia, sehingga sangat berguna dalam proses pangan yang menuntut efisiensi waktu. Dalam industri pangan, berbagai enzim digunakan sebagai biokatalis untuk mempercepat reaksi, mengoptimalkan proses fermentasi, serta memperbaiki mutu sensori dan tekstur produk. Enzim seperti amilase banyak dimanfaatkan dalam industri roti karena meningkatkan ketersediaan gula fermentabel, memperpanjang waktu fermentasi produktif, dan pada akhirnya membantu meningkatkan volume roti. Selain itu, penambahan berbagai jenis amilase terbukti dapat memperbaiki struktur remah, mengurangi kekerasan, memperlambat proses pengentalan kembali pati (staling), dan mempertahankan kualitas roti selama penyimpanan (Chen *et al.*, 2021).

Penggunaan enzim sebagai biokatalisator memang sangat relevan dengan tren produksi yang lebih ramah lingkungan dan efisien energi dalam industri pangan dan biomassa satu dekade terakhir. Banyak riset menekankan keunggulan proses enzimatik dibanding proses kimia konvensional, sekaligus fokus pada rekayasa enzim agar lebih stabil, aktif, dan selektif di kondisi proses yang keras.

Proses berbasis enzim dapat memanfaatkan limbah agro-industri (seperti tongkol jagung, kulit kelapa, limbah tapioka, OPEFB, batang aren) sebagai substrat, sehingga mengurangi pencemaran dan memberi nilai tambah pada limbah. Enzim juga digunakan

dalam industri pulp/paper dan daur ulang kertas untuk mengurangi konsumsi energi, air, bahan kimia, serta emisi CO₂, sehingga dipandang sebagai teknologi yang lebih ramah lingkungan (Putra *et al.*, 2024).

3.5.2 Aplikasi Enzim Berdasarkan Sektor Pangan

Enzim pangan sering dimanfaatkan untuk mengontrol tekstur, kejernihan, rasa, dan nilai gizi produk secara lebih efisien dan terarah dibanding proses kimia biasa. Fokus utamanya adalah pemecahan biopolimer (pati, pektin, protein, laktosa) menjadi molekul lebih sederhana yang menguntungkan secara teknologi dan nutrisi. (Rolle & Chism, 2021).

Dalam industri minuman, pektinase dan amilase digunakan untuk mendegradasi polisakarida yang menyebabkan kekeruhan dan viskositas tinggi, sehingga membantu klarifikasi dan memperbaiki proses filtrasi jus dan minuman lain. α -Amilase berperan besar dalam hidrolisis pati menjadi gula bermassa molekul rendah, yang menurunkan kekentalan dan dapat mendukung proses fermentasi pada berbagai minuman (Mamangey *et al.*, 2121).

Amilase menghidrolisis pati menjadi gula sederhana yang menjadi substrat ragi, meningkatkan fermentasi, volume, porositas, dan kelembutan roti. Protease memodifikasi gluten sehingga adonan lebih mudah diolah dan dapat memperbaiki sifat reologi serta keempukan produk akhir (Dahiya *et al.*, 2020)

Enzim proteolitik digunakan untuk menghidrolisis protein otot dan jaringan ikat, yang dapat memperbaiki tekstur, meningkatkan tenderisasi, dan menghasilkan hidrolisat protein ikan bernilai tinggi; enzim ini juga meningkatkan pemanfaatan limbah dan efisiensi ekstraksi komponen bernutrisi. Hidrolisis enzimatik pada hasil laut dan sampingannya mendukung pengurangan bau tak diinginkan dan peningkatan stabilitas lemak melalui penghilangan fraksi yang mudah teroksidasi (Luo *et al.*, 2025).

Lipase banyak digunakan dalam pemrosesan minyak dan lemak untuk memodifikasi trigliserida, mengurangi pengotor, memperbaiki stabilitas oksidatif, dan menghasilkan profil asam lemak yang diinginkan sehingga mutu sensori meningkat (Jothyswarupha *et al.*, 2024).

3.5.3 Inovasi Ekstraksi dan Imobilisasi Enzim

Enzim imobilisasi telah lama digunakan untuk meningkatkan aktivitas katalitik, kestabilan, dan kemampuan penggunaan ulang enzim, sekaligus memudahkan pemisahan enzim dari campuran reaksi sehingga proses hilir menjadi lebih sederhana dan murah. Berbagai metode seperti adsorpsi, ikatan kovalen, penjeratan (*entrapment*), enkapsulasi, *cross-linking*, dan *cross-linked enzyme aggregates* (CLEAs) dikembangkan untuk melindungi enzim dari kondisi proses yang keras dan memperluas rentang pH serta suhu kerjanya. Perkembangan terbaru menekankan penggunaan nanomaterial (misalnya nanopartikel magnetik, nanokomposit, hidrogel, MOF) dan bahan pembawa berbasis limbah agro yang memiliki luas permukaan tinggi, transfer massa baik, serta sifat biokompatibel dan berkelanjutan, sehingga meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan proses (Bilal *et al.*, 2018)

Di industri pangan, imobilisasi enzim (seperti amilase, pektinase, lipase, protease, laktase, transglutaminase) dimanfaatkan dalam pengolahan jus, roti, bir, susu, dan pakan untuk memperbaiki tekstur, rasa, umur simpan, serta menghasilkan produk fungsional seperti susu bebas laktosa dan pangan diperkaya asam lemak tak jenuh. Selain itu, teknik pemurnian dan ekstraksi enzim yang lebih ramah lingkungan seperti aqueous two-phase systems (ATPS) dan three-phase partitioning (TPP) memungkinkan pemisahan dan pemekatan enzim secara efisien dalam satu atau sedikit tahap, mendukung proses biokatalisis yang lebih hijau dan ekonomis (Brígida *et al.*, 2023)

3.6 Pertanian Seluler (*Cellular Agriculture*) dan Kultur Sel

Pertanian seluler (*cellular agriculture*) merupakan pendekatan inovatif dalam produksi pangan yang memanfaatkan teknologi kultur mikroorganisme, sel hewan, dan sel tumbuhan di lingkungan terkontrol seperti laboratorium atau bioreaktor untuk menghasilkan komponen pangan, misalnya daging kultivasi, protein susu, telur, lemak, maupun bahan fungsional lainnya. Pendekatan ini berkembang sebagai bagian dari gelombang bioteknologi dan protein alternatif yang bertujuan meningkatkan keberlanjutan

sistem pangan, mengurangi ketergantungan pada peternakan intensif, serta menekan penggunaan lahan, air, dan emisi gas rumah kaca. Dalam pertanian seluler, fokus produksi bergeser dari pemeliharaan hewan atau budidaya tanaman utuh ke produksi produk seluler (misalnya daging/ikan kultivasi) dan produk aseluler (misalnya protein susu, telur, hemoglobin tanaman, bioaktif susu) dari kultur sel dan jaringan dalam kondisi proses yang terstandar (Yart *et al.*, 2023).

Selain berpotensi menurunkan jejak lingkungan, pendekatan ini membuka peluang pengendalian mutu dan keamanan pangan yang lebih baik serta integrasi dengan tren pangan nabati dan produk fungsional untuk mendukung ketahanan pangan jangka panjang. Inti dari pertanian seluler untuk daging dan produk hewani adalah pemanfaatan sel punca dan sel progenitor (misalnya sel satelit otot, sel punca mesenkimal, iPSC) yang diambil dari hewan, kemudian ditumbuhkan dan terdiferensiasi dalam media kultur khusus yang kaya nutrisi dan faktor pertumbuhan, sering kali di dalam bioreaktor dan/atau pada scaffold untuk membentuk jaringan mirip daging. Dengan cara ini, daging, komponen susu, dan biomaterial hewani lain dapat diproduksi tanpa memelihara dan menyembelih hewan secara tradisional, sehingga berpotensi mengurangi dampak lingkungan dan isu kesejahteraan hewan. Keunggulan pertanian seluler tidak hanya terletak pada aspek lingkungan, tetapi juga pada keamanan pangan. Produk yang dihasilkan melalui metode ini lebih mudah dikontrol dari segi kualitas dan kebersihan, mengurangi risiko kontaminasi dan penyakit yang sering dikaitkan dengan produk pangan konvensional. Selain itu, pertanian seluler juga memungkinkan modifikasi komposisi nutrisi dari produk akhir, menjadikannya lebih sehat dan sesuai dengan kebutuhan diet konsumen (Eibl *et al.*, 2021).

Di sisi lain, salah satu tantangan utama dalam pengembangan pertanian seluler adalah biaya produksi yang masih jauh lebih tinggi dibandingkan dengan produk hewani konvensional, terutama karena mahalanya media kultur, faktor pertumbuhan, serta kebutuhan fasilitas bioreaktor berskala besar dengan standar aseptik tinggi. Berbagai kajian teknis-ekonomi menunjukkan bahwa media kultur dapat menyumbang sekitar 50–90% biaya produksi, sehingga

penelitian dan pengembangan difokuskan pada optimasi komposisi media, penggantian komponen mahal dengan bahan berbasis tanaman atau mikroba, pengembangan media bebas serum, serta desain bioreaktor dan proses yang lebih efisien untuk menurunkan biaya dan meningkatkan produktivitas (Humbrid., 2021)

Berbagai kajian teknis-ekonomi menunjukkan bahwa media kultur dapat menyumbang sekitar 50–90% biaya produksi, sehingga penelitian dan pengembangan difokuskan pada optimasi komposisi media, penggantian komponen mahal dengan bahan berbasis tanaman atau mikroba, pengembangan media bebas serum, serta desain bioreaktor dan proses yang lebih efisien untuk menurunkan biaya dan meningkatkan produktivitas. Dengan kemajuan teknologi, inovasi media dan bioreaktor, serta penerapan ekonomi skala, diproyeksikan biaya dapat turun secara signifikan, meskipun pencapaian kesetaraan harga dengan daging konvensional masih menjadi tantangan besar dan bergantung pada terobosan teknis di berbagai lini. Sebagai bagian dari dinamika revolusi industri keempat, pertanian seluler menawarkan potensi besar untuk mentransformasi cara produksi dan konsumsi pangan melalui integrasi bioteknologi, rekayasa proses, dan sistem produksi digital, sehingga berpotensi meningkatkan keberlanjutan dan ketahanan pangan. Untuk mempercepat adopsi dan skala-up, diperlukan investasi substansial serta kolaborasi erat antara akademisi, industri, pembuat kebijakan, dan lembaga pendanaan guna mengatasi hambatan teknis, ekonomi, regulasi, dan sosial, sehingga pertanian seluler dapat berkembang dari konsep inovatif menjadi salah satu komponen nyata solusi atas tantangan pangan global (Goodwin *et al.*, 2024).

3.6.1 Daging Budidaya (*Cultured/Lab-grown Meat*)

Daging budidaya, atau sering disebut daging kultivasi, merupakan salah satu aplikasi paling menonjol dari pertanian seluler. Teknologi ini memungkinkan produksi jaringan daging dengan menumbuhkan sel otot (dan lemak) hewan, yang umumnya berasal dari sel punca atau sel progenitor yang diambil melalui biopsi minimal invasif dari hewan donor, kemudian diperbanyak dan didiferensiasi dalam bioreaktor yang menyediakan kondisi

terkontrol mirip *in vivo* untuk pertumbuhan dan pematangan jaringan. Daging budidaya diproyeksikan dapat mengurangi jejak lingkungan, dengan studi pemodelan menunjukkan potensi penurunan emisi gas rumah kaca hingga 78–96%, pengurangan penggunaan lahan hingga 99%, serta penurunan penggunaan air hingga 82–96% dibandingkan produksi daging konvensional, meskipun hasil akhirnya sangat bergantung pada desain proses dan sumber energi yang digunakan (Jahir *et al.*, 2023).

Keamanan pangan menjadi salah satu potensi keunggulan penting, karena produksi dalam sistem tertutup dan terkontrol dapat menurunkan risiko kontaminasi patogen, menghindari stres pra-potong yang memengaruhi mutu daging, serta berpotensi mengurangi kebutuhan penggunaan antibiotik dan dengan demikian risiko resistensi antimikroba dan penyakit zoonosis. Namun, pengembangan daging budidaya masih menghadapi tantangan besar, terutama biaya dan skala produksi; biaya media kultur, kebutuhan media bebas serum hewan, bioreaktor berkapasitas besar, serta pemenuhan karakteristik sensori yang setara dengan daging konvensional menjadi hambatan utama komersialisasi. Penerimaan konsumen terhadap teknologi baru ini juga bervariasi lintas negara dan sangat dipengaruhi persepsi naturalitas, keamanan, dan etika. Dari perspektif regulasi, beberapa negara telah mulai merumuskan kerangka kerja untuk mengawasi produksi dan distribusi daging budidaya. Hal ini penting untuk memastikan bahwa produk yang dihasilkan aman dan memenuhi standar kualitas pangan. Kerjasama internasional dan standar global akan membantu mempercepat adopsi teknologi ini di pasar global (Bhat *et al.*, 2019).

Dari sisi regulasi, Singapura dan Amerika Serikat telah mengembangkan kerangka regulasi dan memberikan persetujuan awal untuk produk daging kultivasi unggas, sementara yurisdiksi lain (misalnya Uni Eropa) tengah menyusun jalur penilaian keamanan dan pelabelan untuk produk berbasis sel. Seiring meningkatnya perhatian terhadap dampak lingkungan dan kesejahteraan hewan, daging budidaya dipandang sebagai kandidat penting dalam bauran protein masa depan, asalkan diiringi investasi riset, inovasi proses

untuk menurunkan biaya, kebijakan dan regulasi yang jelas, serta edukasi konsumen yang memadai (Chen *et al.*, 2021).

3.6.2 Bioteknologi Sel Tumbuhan (*Plant Cell Culture*)

Bioteknologi sel tumbuhan atau kultur sel, jaringan, dan organ tanaman merupakan metode *in vitro* yang memungkinkan pertumbuhan dan diferensiasi bahan tanaman dalam kondisi laboratorium terkontrol pada media yang mengandung nutrisi, hormon tumbuh, dan faktor lain yang mendukung proliferasi serta regenerasi sel. Teknologi ini dimanfaatkan luas untuk produksi senyawa bioaktif dan metabolit sekunder bernilai tinggi (misalnya alkaloid, flavonoid, terpenoid), perbanyakan tanaman, konservasi plasma nutfah, serta perbaikan sifat genetik dan rekayasa metabolik. Sistem kultur seperti kalus, suspensi sel, organ kultur (akar, tunas, hairy root), dan kultur bioreaktor memungkinkan produksi metabolit secara berkelanjutan, terstandar, dan tidak bergantung musim maupun ketersediaan tanaman utuh, sehingga relevan bagi industri farmasi, kosmetik, dan pangan (Marchev *et al.*, 2020).

Di sisi lain, kultur sel tumbuhan merupakan fondasi mikropropagasi, yang memungkinkan produksi tanaman dalam jumlah besar, seragam secara genetik, bebas patogen, sekaligus mendukung pelestarian spesies langka serta program pemuliaan untuk sifat unggul seperti ketahanan hama, penyakit, dan stres abiotik. Keunggulan lain adalah perannya sebagai platform untuk transformasi genetik dan penyuntingan genom; teknik seperti transformasi *Agrobacterium* dan CRISPR-Cas9 digunakan untuk memasukkan atau menyunting gen yang mengatur jalur metabolit sekunder maupun sifat agronomis penting, sehingga meningkatkan kualitas, kuantitas, dan nilai tambah produk tanaman. Tantangan dalam kultur sel tumbuhan meliputi optimasi kondisi kultur untuk berbagai jenis tanaman dan senyawa target, serta pengembangan teknologi yang lebih efisien dan ekonomis. Penelitian terus dilakukan untuk mengatasi hambatan ini dan meningkatkan aplikasi kultur sel tumbuhan di industri (Devi *et al.*, 2023).

Meski demikian, masih terdapat tantangan berupa kebutuhan optimasi spesifik jenis untuk komposisi media, regulasi hormon, desain bioreaktor, dan efisiensi transformasi, sehingga penelitian

terus diarahkan pada pendekatan rekayasa metabolik dan multi-omics untuk menjadikan kultur sel tumbuhan lebih efisien, ekonomis, dan siap diaplikasikan skala industri (Marchev *et al.*, 2020).

3.7 Sinergi Enzim, Fermentasi, dan Kultur Sel dalam Produksi Pangan

Produksi pangan masa depan menghadapi tantangan kompleks, termasuk kebutuhan untuk meningkatkan efisiensi, keberlanjutan, dan kualitas nutrisi. Sinergi antara enzim, fermentasi, dan kultur sel dipandang sebagai salah satu pendekatan kunci untuk membangun sistem produksi pangan yang lebih inovatif, fleksibel, dan rendah jejak lingkungan (Teng *et al.*, 2021)

Fermentasi modern—baik fermentasi biomassa maupun *precision fermentation*—memungkinkan produksi berbagai asam amino, peptida, vitamin, dan protein fungsional dari substrat murah serta bahkan dari limbah agroindustri, yang kemudian dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku media kultur sel atau komponen pangan bernilai tambah. Dengan demikian, fermentasi tidak hanya mempertahankan peran tradisionalnya dalam peningkatan rasa dan umur simpan, tetapi juga menjadi platform bioproduksi yang memasok nutrisi dan bahan fungsional untuk sistem pangan berbasis sel dan mikroba (Ajanaku *et al.*, 2025)

Dalam konteks kultur sel untuk daging dan pangan berbasis sel lainnya, media pertumbuhan membutuhkan pasokan besar asam amino dan komponen lain yang secara industri paling efisien diproduksi melalui fermentasi mikroba, serta dapat dilengkapi sumber protein nabati atau biomassa mikroba terhidrolisis (Garbin *et al.*, 2025).

Enzim berperan sebagai katalisator penting sepanjang rantai ini: enzim proteolitik dan enzim lain dari mikroorganisme atau sistem imobilisasi dapat memecah protein kompleks menjadi peptida dan asam amino yang lebih mudah dimanfaatkan sel, meningkatkan ketersediaan nutrisi, serta memodifikasi tekstur dan sifat fungsional produk akhir, termasuk daging kultivasi. Di samping itu, enzim seperti transglutaminase dan enzim terkait biomaterial dimanfaatkan untuk modifikasi struktur jaringan dan scaffold,

sehingga membantu pembentukan tekstur daging yang lebih menyerupai produk konvensional (Martins *et al.*, 2023).

Dengan memadukan fermentasi yang ditingkatkan dengan bioteknologi, produksi enzim khusus, dan kultur sel skala besar, berbagai kajian menekankan potensi terbentuknya ekosistem produksi protein yang lebih hemat sumber daya, memanfaatkan limbah, dan menghasilkan pangan dengan nilai gizi serta fungsi yang ditingkatkan—meski tantangan biaya, skala, dan regulasi masih perlu diatasi melalui riset lanjutan dan inovasi proses (Gao *et al.*, 2025).

DAFTAR PUSTAKA

- Atiroğlu, V., Atiroğlu, A., Atiroğlu, A., Al-Hajri, A., & Özacar, M. (2024). Green immobilization: Enhancing enzyme stability and reusability on eco-friendly support. *Food chemistry*, 448, 138978. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.138978>
- Bapat, V., Kishor, P., Jalaja, N., Jain, S., & Penna, S. (2023). Plant Cell Cultures: Biofactories for the Production of Bioactive Compounds. *Agronomy*. <https://doi.org/10.3390/agronomy13030858>
- Bhat, Z., Morton, J., Mason, S., Bekhit, A., & Bhat, H. (2019). Technological, regulatory, and ethical aspects of in vitro meat: A future slaughter-free harvest. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 18(4), 1192–1208.
- Bilal, M., Zhao, Y., Rasheed, T., & Iqbal, H. (2018). Magnetic nanoparticles as versatile carriers for enzymes immobilization: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 120(Pt B), 2530–2544.
- Brígida, A., Buarque, F., Nogueira, V., Melo, V., Guisán, J., Ribeiro, B., Gonçalves, L., & Coelho, M. (2023). Partial purification of crude lipase extract from *Yarrowia lipolytica*: Precipitation, aqueous two-phase systems (ATPS), and immobilization methods. *Cleaner Chemical Engineering*.
- Catalán, E., & Sánchez, A. (2020). Solid-State Fermentation (SSF) versus Submerged Fermentation (SmF) for the Recovery of Cellulases from Coffee Husks: A Life Cycle Assessment (LCA) Based Comparison. *Energies*. <https://doi.org/10.3390/en13112685>
- Chen, L., Guttieres, D., Koenigsberg, A., Barone, P., Sinskey, A., & Springs, S. (2021). Large-scale cultured meat production: Trends, challenges and promising biomanufacturing technologies. *Biomaterials*, 280, 121274.
- Chen, Y., Eder, S., Schubert, S., Gorgerat, S., Boschet, E., Baltensperger, L., Städeli, C., Kuster, S., Fischer, P., & Windhab, E. (2021). Influence of amylase addition on bread quality and bread staling. *ACS Food Science & Technology*.

- Dahiya, S., Bajaj, B., Kumar, A., Tiwari, S., & Singh, B. (2020). A review on biotechnological potential of multifarious enzymes in bread making. *Process Biochemistry*, 99, 290–306.
- Devi, A., Devi, K., Devi, P., Devi, M., & Das, S. (2023). Metabolic engineering of plant secondary metabolites: Prospects and its technological challenges. *Frontiers in Plant Science*, 14.
- Dzurendová, S., Olsen, P., Byrtusová, D., Tafintseva, V., Shapaval, V., Horn, S., Kohler, A., Szotkowski, M., Márová, I., & Zimmermann, B. (2023). Raman spectroscopy online monitoring of biomass production, intracellular metabolites and carbon substrates during submerged fermentation of oleaginous and carotenogenic microorganisms. *Microbial Cell Factories*, 22. <https://doi.org/10.1186/s12934-023-02268-y>
- Eibl, R., Senn, Y., Gubser, G., Jossen, V., Van Den Bos, C., & Eibl, D. (2021). Cellular agriculture: Opportunities and challenges. *Annual Review of Food Science and Technology*, 12, 51–73.
- Goodwin, C., Aimutis, W., & Shirwaiker, R. (2024). A scoping review of cultivated meat techno-economic analyses to inform future research directions for scaled-up manufacturing. *Nature Food*, 5, 901–910.
- Humbird, D. (2021). Scale-up economics for cultured meat. *Biotechnology and Bioengineering*, 118, 3239–3250.
- Jahir, N., Ramakrishna, S., Abdullah, A., & Vigneswari, S. (2023). Cultured meat in cellular agriculture: Advantages, applications and challenges. *Food Bioscience*.
- Jothyswarupha, K., Venkataraman, S., Rajendran, D., Shri, S., Sivaprakasam, S., Yamini, T., Karthik, P., & Kumar, V. (2024). Immobilized enzymes: Exploring its potential in food industry applications. *Food Science and Biotechnology*, 34, 1533–1555.
- Luo, W., Zhang, J., Ahmmed, M., Sakai, K., Shahidi, F., Zhi, Z., & Wu, H. (2025). Valorization of animal by-product enzymes: Advancing sustainable food processing through innovative extraction, purification, and application strategies. *Trends in Food Science & Technology*.
- Mamangkey, J., Suryanto, D., Munir, E., Mustopa, A., Sibero, M., Mendes, L., Hartanto, A., Taniwan, S., Ek-Ramos, M., Harahap, A., Verma, A., Trihatmoko, E., Putranto, W., Pardosi, L., & Rudia,

- L. (2021). Isolation and enzyme bioprospection of bacteria associated to *Bruguiera cylindrica*, a mangrove plant of North Sumatra, Indonesia. *Biotechnology Reports*, 30.
- Mao, S., Jiang, J., Xiong, K., Chen, Y., Yao, Y., Liu, L., Liu, H., & Li, X. (2024). Enzyme Engineering: Performance Optimization, Novel Sources, and Applications in the Food Industry. *Foods*, 13. <https://doi.org/10.3390/foods13233846>
- Marchev, A., Yordanova, Z., & Georgiev, M. (2020). Green (cell) factories for advanced production of plant secondary metabolites. *Critical Reviews in Biotechnology*, 40, 443–458.
- Praveen, M., & Brogi, S. (2025). Microbial Fermentation in Food and Beverage Industries: Innovations, Challenges, and Opportunities. *Foods*, 14. <https://doi.org/10.3390/foods14010114>
- Putra, I., Ulfah, M., Nurhayati, N., & Helianti, I. (2024). Coproduction of alkaline protease and xylanase from genetically modified Indonesian local *Bacillus halodurans* CM1 using corncob as an inducing substrate. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 31.
- Robescu, M., & Bavaro, T. (2025). A Comprehensive Guide to Enzyme Immobilization: All You Need to Know. *Molecules*, 30. <https://doi.org/10.3390/molecules30040939>
- Sawant, S., Park, H., Sim, E., Kim, H., & Choi, H. (2025). Microbial Fermentation in Food: Impact on Functional Properties and Nutritional Enhancement—A Review of Recent Developments. *Fermentation*. <https://doi.org/10.3390/fermentation11010015>
- Setiyoningrum, F., Priadi, G., Afiati, F., Rohmatussolihat, R., & Anjani, A. (2021). The potency of indigenous *Lactobacillus farciminis* LPI12-2-LAB033 isolated from non-dairy product of Indonesian fermented food as a new source of β -galactosidase enzyme. *Industria: Jurnal Teknologi dan Manajemen Agroindustri*.
- Sharma, R., Garg, P., Kumar, P., Bhatia, S., & Kulshrestha, S. (2020). Microbial Fermentation and Its Role in Quality Improvement of Fermented Foods. *Fermentation*, 6, 106. <https://doi.org/10.3390/fermentation6040106>

- Sionek, B., Szydłowska, A., Küçükgoz, K., & Kołożyn-Krajewska, D. (2023). Traditional and New Microorganisms in Lactic Acid Fermentation of Food. *Fermentation*. <https://doi.org/10.3390/fermentation9121019>
- Sun, W., Shahrajabian, M., & Lin, M. (2022). Research Progress of Fermented Functional Foods and Protein Factory-Microbial Fermentation Technology. *Fermentation*. <https://doi.org/10.3390/fermentation8120688>
- Terefe, N., & Augustin, M. (2020). Fermentation for tailoring the technological and health related functionality of food products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60, 2887 - 2913. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1666250>
- Wahab, W. (2025). Review of research progress in immobilization and chemical modification of microbial enzymes and their application. *Microbial Cell Factories*, 24. <https://doi.org/10.1186/s12934-025-02791-0>
- Yao, Y., Ye, Y., Xiong, K., Mao, S., Jiang, J., Chen, Y., Li, X., Liu, H., Liu, L., Cai, B., & Song, S. (2026). Current Progress and Future Directions of Enzyme Technology in Food Nutrition: A Comprehensive Review of Processing, Nutrition, and Functional Innovation. *Foods*, 15. <https://doi.org/10.3390/foods15020402>
- Yart, L., Wijaya, A., Lima, M., Haller, C., Van Der Beek, E., Carvalho, R., Kraus, M., & Mashinchian, O. (2023). Cellular agriculture for milk bioactive production. *Nature Reviews Bioengineering*, 1, 858 - 874. <https://doi.org/10.1038/s44222-023-00112-x>
- Zawawi, N., Mubarik, N., & Ambarsari, L. (2025). Partial purification, characterisation and gene detection of protease by *Lactacaseibacillus paracasei* IN17 from Inasua. *Tropical Life Sciences Research*, 36, 159–177.

BAB 4

NANO-ENKAPSULASI UNTUK NUTRISI DAN SUPLEMEN FUNGSIONAL

Nanoenkapsulasi merupakan teknologi pengemasan zat aktif pada tingkat nanometer (1–1000 nm) dengan tujuan melindungi, mengontrol pelepasan, dan meningkatkan efektivitas senyawa bioaktif dalam sistem pangan maupun suplemen. Skala nano tersebut berada pada ranah koloid, sehingga partikel hasil enkapsulasi memiliki karakteristik unik seperti luas permukaan yang besar, mobilitas tinggi, serta kemampuan berinteraksi lebih baik dengan jaringan biologis. Perbedaan mendasar dengan mikroenkapsulasi terletak pada ukuran kapsul dan efek fisiologisnya; mikroenkapsulasi menghasilkan partikel dalam skala mikrometer, sedangkan nanoenkapsulasi menempatkan zat aktif dalam lingkup nanometer sehingga meningkatkan penetrasi membran sel dan bioavailabilitas senyawa.

Secara prinsip, nanoenkapsulasi mengandalkan interaksi molekuler antara komponen inti (senyawa bioaktif) dan matriks penyalut atau “dinding kapsul” (*wall material*) yang berupa biopolimer atau lipid. Interaksi tersebut dapat berupa gaya elektrostatik, hidrofobik, atau ikatan kovalen, yang menentukan stabilitas dan perilaku pelepasan zat aktif di dalam sistem. Matriks penyalut berperan sebagai pelindung terhadap stres lingkungan (pH, oksidasi, suhu), sekaligus sebagai pengatur pelepasan senyawa melalui mekanisme difusi, erosi, atau respons terhadap rangsangan tertentu (Wicaksono and Nurdyansyah, 2021).

Perkembangan nanoenkapsulasi dalam industri pangan dan suplemen dimulai sejak awal 2000-an, sejalan dengan kemajuan nanoteknologi dan kebutuhan untuk meningkatkan stabilitas nutrisi

pada produk pangan fungsional. Awalnya, teknologi ini banyak diterapkan di bidang farmasi, namun kemudian mulai diadopsi untuk vitamin, minyak nabati, ekstrak herbal, dan senyawa fenolik agar lebih stabil selama pengolahan dan penyimpanan. Saat ini, nanoenkapsulasi banyak digunakan untuk fortifikasi minuman, suplemen, dan produk herbal berbasis Indonesia, antara lain dengan memanfaatkan nano-kalsium, nano-kurkumin, dan nano-ekstrak herbal.

Tujuan utama nanoenkapsulasi adalah melindungi senyawa gizi atau bioaktif yang labil terhadap cahaya, panas, atau oksidasi, meningkatkan kelarutan dan stabilitas dalam matriks pangan, serta memperbaiki bioavailabilitas melalui penyerapan yang lebih efisien di saluran cerna. Teknologi ini juga memungkinkan pelepasan terkontrol dan target-spesifik, sehingga konsentrasi aktif dapat diberikan tepat pada lokasi dan waktu yang diinginkan. Dengan demikian, nanoenkapsulasi menjadi strategi penting dalam pengembangan produk pangan fungsional dan suplemen kesehatan berbasis bahan alam.

4.1 Sistem penghantar dan bahan penyalut

Dalam pengembangan pangan fungsional, pemilihan sistem penghantar dan bahan penyalut berukuran nano sangat penting untuk melindungi senyawa bioaktif sekaligus memperbaiki stabilitas, kelarutan, dan kemampuannya diserap di dalam saluran cerna. Sistem penghantar yang sering digunakan antara lain nanopartikel polimerik, nanoliposome, nanoemulsi, *solid lipid nanoparticles* (SLN), dan *nanostuctured lipid carriers* (NLC). Masing-masing memiliki keunggulan berbeda, tetapi semuanya dapat saling melengkapi dalam aplikasi pangan fungsional (Farlianti *et al.*, 2024).

Nanopartikel polimerik dibuat dari bahan alami seperti kitosan, alginat, gelatin, protein susu (kasein dan whey), serta berbagai polisakarida lainnya. Bahan-bahan ini dipilih karena berasal dari alam, mudah terurai, dan mampu membentuk matriks yang melindungi vitamin, probiotik, dan antioksidan. Nanoliposome berupa vesikel fosfolipid berlapis ganda yang dapat membawa senyawa larut air di bagian dalam dan senyawa larut lemak di lapisan

lipid, sehingga sangat cocok untuk melindungi zat aktif yang peka terhadap oksidasi dan perubahan pH.

Nanoemulsi merupakan dispersi butiran minyak berukuran nano dalam fase air (atau sebaliknya) yang distabilkan oleh pengemulsi; sistem ini sangat membantu meningkatkan kelarutan dan stabilitas senyawa lipofilik seperti karotenoid dan vitamin larut lemak. SLN dan NLC adalah partikel lipid padat berukuran nano yang menyimpan nutrisi atau zat aktif di dalam matriks lemak, sehingga memberikan stabilitas fisik tinggi, pelepasan terkontrol, dan kompatibilitas dengan proses pengolahan pangan (Yuliasari, 2016).

Idealnya, bahan penyalut untuk pangan fungsional harus aman dikonsumsi (*food grade*), tidak beracun, tidak menimbulkan reaksi merugikan di tubuh (biokompatibel), dan mudah terurai. Bahan tersebut juga harus mampu membentuk partikel nano yang stabil terhadap suhu, pH, dan tekanan selama proses pengolahan seperti homogenisasi, pasteurisasi, dan pengeringan semprot, serta kompatibel dengan formulasi dan proses produksi pangan. Selain itu, bahan penyalut perlu mampu membentuk lapisan atau matriks yang melindungi zat aktif sampai mencapai lokasi target di saluran cerna, dengan pelepasan yang terkontrol sehingga manfaat kesehatannya lebih maksimal.

Sebagai contoh, kombinasi alginat dan kitosan sering digunakan untuk enkapsulasi probiotik karena mampu membentuk gel yang kuat, tahan terhadap asam lambung, dan melindungi bakteri hidup selama pengolahan dan penyimpanan. Contoh bahan Pangan Berpotensi sebagai Penyalut dalam Teknologi Nanopartikel dapat dilihat pada tabel 4.1.

4.2 Metode dan proses nano-enkapsulasi

Dalam pengembangan pangan fungsional, metode nano-enkapsulasi digunakan untuk melindungi nutrisi dan senyawa bioaktif serta memperbaiki stabilitas dan kemampuan diserap oleh tubuh. Secara umum, teknik nano-enkapsulasi dibagi menjadi dua pendekatan: *top-down* dan *bottom-up*. Metode *top-down* bekerja dengan memperkecil ukuran partikel besar menjadi skala nano melalui proses fisik, misalnya penggilingan halus (*milling*) dan homogenisasi tekanan tinggi. Sementara itu, metode *bottom-up*

membentuk partikel nano dari molekul kecil melalui proses kimia atau fisiko-kimia seperti presipitasi, gelasi ionik, self-assembly, dan emulsifikasi.

Tabel 4.1. Bahan Pangan Berpotensi sebagai Penyalut dalam Teknologi Nanopartikel

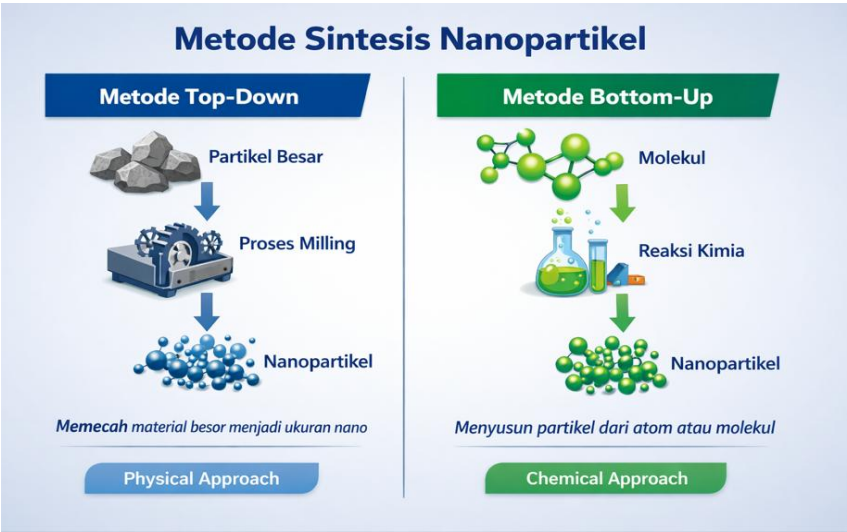
Kategori Bahan	Contoh Bahan Pangan	Karakter Utama sebagai Penyalut	Aplikasi Utama dalam Nanopartikel
Polisakarida	Kitosan, alginat, pektin, selulosa, karagenan, maltodekstrin	Food grade, biodegradable, membentuk gel/film, mampu mengkoagulasi dan melapisi senyawa hidrofilik dan probiotik (Ningsih, Yasni dan Yuliani, 2017).	Enkapsulasi probiotik, vitamin larut air, dan antioksidan polifenol; pembentukan nanopartikel dan coated microparticle (Ningsih, Yasni and Yuliani, 2017).
Protein pangan	Kasein, whey protein isolate, whey protein isolat, protein kedelai	Membentuk kompleks dengan senyawa hidrofobik, emulsifikasi yang baik, dapat membentuk nanopartikel melalui self-assembly atau nanopresipitasi (Sethunga <i>et al.</i> , 2025).	Pengangkutan senyawa lipofilik (karotenoid, vitamin D/E), delivery probiotik, serta penyalut dalam nanoemulsi (Sethunga <i>et al.</i> , 2025).
Lipid alami	Trigliserida lemak susu, minyak nabati, fosfolipid	Menghasilkan matriks padat yang tahan terhadap oksidasi, sesuai untuk pembentukan SLN dan NLC	Penyalut solid lipid nanoparticle (SLN) dan nanostructured lipid carrier (NLC) untuk senyawa lipofilik dan nutrien probiotik

Kategori Bahan	Contoh Bahan Pangan	Karakter Utama sebagai Penyalut	Aplikasi Utama dalam Nanopartikel
		(Sethunga <i>et al.</i> , 2025).	(Sethunga <i>et al.</i> , 2025).
Hibrid polimer-protein	Kitosan-protein susu, kasein-maltodekstrin, protein kedelai-polisakarida	Kombinasi sifat film-forming, emulsifikasi, dan stabilitas asam meningkatkan efisiensi enkapsulasi dan survival sel (Ningsih <i>et al.</i> , 2017).	Enkapsulasi probiotik dan bioaktif nutraceutical dengan peningkatan tahan terhadap pH lambung dan proses pengolahan (Ningsih <i>et al.</i> , 2017).
Edible coating & film	Polisakarida + protein, edible nanopartikel dalam matriks film	Menyediakan lapisan pelindung di permukaan pangan, dapat mengandung nanopartikel aktif (antimikroba, antioksidan, nutrien) (Ramadan, 2018).	Pelapisan buah, sayuran, daging, dan produk susu untuk memperpanjang umur simpan dan memberikan delivery nutrisi lokal.

Untuk nutrisi dan senyawa bioaktif, beberapa metode yang paling banyak digunakan antara lain gelasi ionik berbasis kitosan-NaTPP (natrium tripolifosfat) atau kitosan-alginat, emulsifikasi-penguapan pelarut, nanoemulsi dengan ultrasonik atau high-shear, serta pembentukan nanoliposome. Metode gelasi ionik berbasis kitosan dan alginat bekerja dengan interaksi elektrostatik antara

gugus positif pada kitosan dan anion (misalnya TPP atau Ca^{2+}) sehingga terbentuk partikel nano yang stabil dan cocok untuk melapisi vitamin atau probiotik.

Sementara itu, proses emulsifikasi-penguapan pelarut dilakukan dengan melarutkan nutrisi dan polimer penyalut dalam pelarut organik, lalu mengemulsinya dalam fase air dan menguapkan pelarut sehingga muncul nanopartikel padat. Teknik nanoemulsi dengan ultrasonik atau high-shear menggunakan getaran kuat dan tekanan tinggi untuk memecah tetesan minyak menjadi butiran nanometer yang terdispersi dalam air, sehingga meningkatkan kelarutan dan stabilitas senyawa lipofilik seperti karotenoid atau vitamin larut lemak. Selain itu, pembentukan nanoliposome melalui metode seperti penghidratan film lipid atau homogenisasi tekanan tinggi menghasilkan vesikel dua lapis fosfolipid yang mampu membawa zat larut air dan lemak sekaligus di dalam saluran cerna.



Gambar 4.1. Metode Sintesis Nanopartikel

Tabel 4.2. Contoh kasus penerapan metode nano-enkapsulasi untuk nutrisi dan senyawa bioaktif

Metode Nano-Enkapsulasi	Contoh Bahan Aktif	Matriks/Pe nyalut	Deskripsi Singkat Kasus Penerapan	Referensi
Gelasi ionik berbasis kitosan-NaTPP	Vitamin C, kurkumin	Kitosan-NaTPP	Kitosan dan NaTPP digunakan dalam metode gelasi ionik untuk membentuk nanopartikel kurkumin; hasil penelitian menunjukkan peningkatan ukuran partikel nano, efisiensi penyerapan, dan stabilitas senyawa aktif.	(Putri, 2022)
Gelasi ionik berbasis kitosan-alginat	Probiotik (Lactobacillus spp.)	Kitosan + alginat	Probiotik dienkapsulasi dalam matriks kitosan-alginat menggunakan gelasi ionik untuk meningkatkan viabilitas sel terhadap asam lambung dan bile, banyak diuji pada produk yoghurt dan minuman probiotik.	(One et al., 2025)
Emulsifikasi-penguapan pelarut	Antosianin buah beri	PLGA atau maltodekstrin	Antosianin dari buah beri dienkapsulasi dengan metode emulsifikasi-penguapan pelarut sehingga diperoleh nanopartikel yang lebih stabil terhadap cahaya dan pH, cocok untuk minuman fungsional.	<u>Silviana, D. et al. (2012).</u>

Metode Nano-Enkapsulasi	Contoh Bahan Aktif	Matriks/Pe nyalut	Deskripsi Singkat Kasus Penerapan	Referensi
Nanoemulsi dengan ultrasonik atau high-shear	Karotenoid (β -karoten, lutein)	Minyak nabati + emulsifier (Tween, lecithin)	Nanoemulsi β -karoten atau lutein dibuat menggunakan ultrasonik atau high-shear homogenizer untuk meningkatkan kelarutan dan absorpsi nutrisi larut lemak dalam minuman dan sereal instan.	(Wijaya', 2025)
Pembentukan nanoliposome	Vitamin E, resveratrol	Fosfolipid (lecithin)	Nanoliposome dibuat dengan metode hidrasi film lipid dan homogenisasi dengan tekanan tinggi untuk melindungi vitamin E atau resveratrol dari oksidasi dan meningkatkan bioavailabilitasnya dalam produk minuman fungsional.	(Adha <i>et al.</i> , 2025)

4.3 Pengaruh Terhadap Stabilitas Dan Bioavailabilitas

Dalam pangan fungsional berbasis nano, sistem penghantar nano tidak hanya berperan sebagai pelindung zat bioaktif, tetapi juga sangat berpengaruh terhadap stabilitas dan bioavailabilitas senyawa tersebut. Secara umum, nanopartikel yang baik akan membentuk lapisan atau matriks yang bersifat sebagai penghalang fisik dan kimia terhadap stres lingkungan. Hal ini membantu mengurangi oksidasi dan hidrolisis, sehingga umur simpan dan aktivitas zat aktif menjadi lebih panjang.

Mekanisme peningkatan stabilitas

Peningkatan stabilitas terjadi ketika matriks penyalut (misalnya kitosan, alginat, lipid, atau film emulsi) melindungi zat aktif dari berbagai faktor degradasi, seperti:

- Oksigen dan cahaya:** Matriks yang rapat dan transparan/netral terhadap cahaya dapat menghambat

penetrasi oksigen dan UV, sehingga mengurangi degradasi oksidatif senyawa sensitif seperti vitamin dan karotenoid.

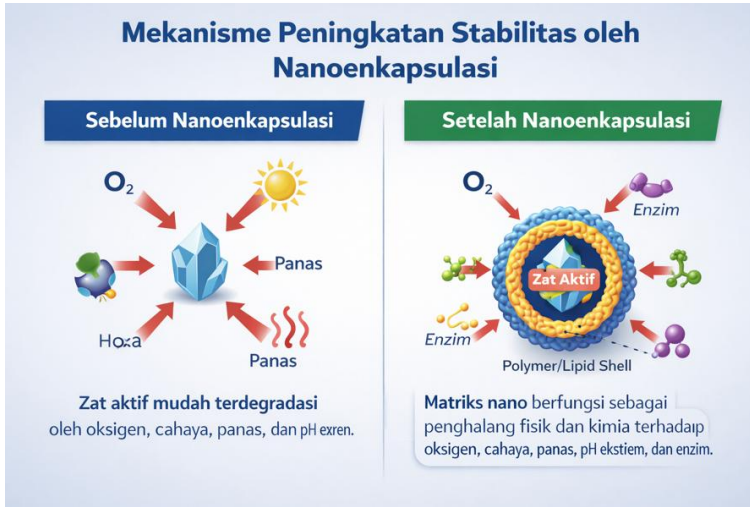
2. **Panjang:** Ukuran nano dan komposisi penyalut dapat meredam efek pemanasan dan mencegah pecahnya atau deformasi emulsi maupun liposom.
3. **pH ekstrem:** Penyalut polimerik atau lipid dapat menahan perubahan pH, sehingga mencegah denaturasi atau pelepasan prematur zat aktif di lingkungan asam lambung atau basa usus.
4. **Enzim dan air:** Partikel nano yang terlindung dari kontak langsung dengan enzim dan air (misalnya matriks hidrofobik) dapat mengurangi degradasi hidrolitik zat lipofilik dan protein.

Dengan demikian, sistem nano tidak hanya mengurangi laju reaksi oksidatif dan hidrolitik, tetapi juga memperpanjang stabilitas bentuk dan aktivitas senyawa aslinya selama pengolahan dan penyimpanan.

Dampak terhadap bioavailabilitas

Peningkatan stabilitas ini berlanjut pada peningkatan bioavailabilitas, yaitu jumlah zat aktif yang sampai ke sirkulasi sistemik dan dapat memberikan efek biologis. Beberapa mekanisme utamanya adalah:

1. **Peningkatan kelarutan senyawa lipofilik** melalui nanoemulsi, SLN, atau NLC, sehingga senyawa yang biasanya sukar larut dalam air menjadi lebih mudah diserap di saluran cerna (Nurfauziah and Rusdiana, 2018).
2. **Proteksi dari degradasi di lambung**, sehingga lebih banyak senyawa bioaktif yang mencapai usus dalam bentuk utuh dan aktif.
3. **Peningkatan waktu retensi** di permukaan mukosa usus karena interaksi elektrostatis atau adhesi penyalut polimer/nanopartikel dengan mukosa dan lapisan usus
4. **Peningkatan penyerapan** melalui perubahan cara disolusi dan transpor melintasi membran, misalnya penyalutan nanokurkumin atau ibuprofen yang memperluas permukaan dan mempercepat laju disolusi serta absorpsi (Tiffany *et al.*, 2023).



Gambar 4.2. Mekanisme Peningkatan Stabilitas oleh Nanoenkapsulasi

Secara keseluruhan, sistem nano berperan ganda: sebagai “jaket pelindung” yang menjaga zat aktif tetap stabil, sekaligus sebagai “kendaraan” yang mempermudah kelarutan dan penyerapannya di dalam tubuh.

4.4 Aplikasi penggunaan teknologi nanokapsulasi pada makanan

Teknologi nanoenkapsulasi semakin banyak digunakan dalam industri pangan untuk melindungi dan memperbaiki kinerja senyawa bioaktif, terutama lipid, protein/peptida, dan karbohidrat fungsional. Salah satu aplikasi yang penting adalah nanokapsulasi lipid fungsional seperti asam lemak omega-3 (EPA, DHA), minyak ikan, dan CLA (*conjugated linoleic acid*). Dengan dilapisi nanomatriks (misalnya polisakarida, protein susu, atau lipid), lipid fungsional menjadi lebih stabil terhadap oksidasi, sehingga bau dan rasa tengik berkurang serta penampilan produk lebih disukai. Nanokapsulasi juga meningkatkan dispersibilitas lipid dalam matriks pangan berair (misalnya minuman susu, sereal cair, atau produk bakery), sehingga komponen bioaktif terserap lebih baik di saluran cerna tanpa mengganggu sensori (Tiffany, et al., 2023)

Selain lipid, nanoenkapsulasi banyak diterapkan untuk protein dan peptida bioaktif, seperti peptida antihipertensi (ACE-inhibitor) dan peptida imunomodulator (misalnya peptida dari whey, kasein, atau kolagen). Tanpa perlindungan, peptida ini mudah terurai oleh enzim protease dan pH asam di lambung, sehingga bioaktivitasnya menurun sebelum mencapai usus. Dengan enkapsulasi menggunakan nanoliposome, nanopartikel protein, atau matriks polimerik (kitosan, maltodekstrin), peptida lebih terlindungi selama pengolahan dan transit gastrointestinal, serta dilepaskan secara terarah di usus halus, sehingga meningkatkan efek kesehatan yang diharapkan (Aguilar *et al.*, 2022).

Nanoenkapsulasi juga diterapkan pada karbohidrat fungsional, terutama prebiotik tertentu seperti inulin, FOS, atau oligosakarida bioaktif. Penyalut nano mencegah degradasi komponen prebiotik saat pemrosesan panas dan memperbaiki kelarutannya, sehingga mampu merangsang pertumbuhan bakteri probiotik (misalnya *Lactobacillus* dan *Bifidobacterium*) di usus besar. Dengan demikian, kombinasi nanokapsulasi protein bioaktif dan prebiotik berpotensi meningkatkan efektivitas produk fungsional (misalnya yogurt, susu fortifikasi, dan makanan dan minuman untuk lansia) dalam mendukung tekanan darah, imunitas, dan kesehatan saluran cerna.

4.5 Aplikasi pada vitamin dan mineral

Aplikasi nano-enkapsulasi vitamin lipofilik seperti vitamin A, D, E, dan K semakin banyak dikembangkan untuk meningkatkan kelarutan dalam media berair dan memperbaiki stabilitas terhadap cahaya, oksidasi, serta suhu selama proses pengolahan dan penyimpanan. Teknologi nano seperti nanoemulsi, liposom, nanokapsul polimer, dan nanostructured lipid carriers (NLC) memungkinkan vitamin-vitamin ini terdispersi dengan baik dalam produk pangan berbasis air seperti minuman, susu, sereal, dan saus, yang pada umumnya sulit dilarutkan oleh senyawa hidrofobik. Dengan mengecilkan ukuran partikel ke skala nanometer, luas permukaan vitamin meningkat sehingga interaksi dengan fase berair dan membran usus menjadi lebih efisien, sehingga meningkatkan bioavailabilitas dan sekaligus mengurangi kebutuhan dosis tinggi

yang berisiko menuju status hiper-vitaminosis (Tiffany, Bossa Samang dan Islamiyah, 2023).

Selain itu, matriks nano berfungsi sebagai “pelindung” fisiko-kimiawi terhadap degradasi vitamin A dan E yang sensitif terhadap cahaya, oksigen, dan panas, sehingga konsentrasinya pada akhir masa simpan tetap lebih stabil dibandingkan dengan formulasi konvensional. Beberapa penelitian pada formulasi nanoemulsi vitamin A dan E dalam produk pangan menunjukkan meningkatnya stabilitas dan kapasitas pemuatan vitamin dalam matriks minyak-dalam-air, serta peningkatan penyerapan melalui jalur limfatik dan saluran pencernaan. Pendekatan ini membuka peluang besar untuk fortifikasi pangan pokok, seperti tepung dan beras, dengan vitamin-vitamin lipofilik dalam bentuk terenkapsulasi agar dapat bertahan pada proses pengolahan, tanpa mengubah rasa, warna, dan tekstur secara negatif (Fatimah A. et al., 2024).

Sistem nano untuk mineral (Fe, Zn, Ca)

Sementara itu, penerapan sistem nano pada mineral seperti besi (Fe), seng (Zn), dan kalsium (Ca) bertujuan untuk mengurangi interaksi negatif dengan komponen pangan yang sering menyebabkan perubahan warna, bau, dan rasa logam, khususnya pada produk susu, sereal, dan makanan siap saji. Bentuk mineral nano memiliki ukuran partikel yang sangat kecil dan distribusi yang lebih beragam sehingga cenderung lebih inert terhadap reaksi oksidasi dan pembentukan senyawa Fe(III) yang menyebabkan rasa logam yang kuat pada produk pangan. Dengan demikian, kualitas sensori (warna, aroma, dan cita rasa) dapat dipertahankan meskipun pH, kandungan garam, dan komponen organik lainnya cukup kompleks (Hidayat, 2022).

Lebih jauh, nanomineral menunjukkan peningkatan bioavailabilitas dibandingkan dengan mineral konvensional karena partikel nano lebih mudah menembus lapisan mukosa usus dan mengurangi antagonisme dengan fitat, tanin, dan ion lain yang sering mengikat mineral dalam makanan nabati. Penelitian pada ternak ayam yang diberi pakan dengan nano-mineral Fe, Zn, Ca, dan Se menunjukkan peningkatan performa, efisiensi penggunaan pakan, serta penurunan ekskresi mineral melalui kotoran, yang berarti

mineral lebih banyak diserap dan tidak terbuang percuma. Hal ini memberi implikasi bahwa penerapan nanomineral dalam pangan manusia juga dapat meningkatkan efisiensi fortifikasi dengan dosis lebih rendah namun tetap efektif sekaligus memperkecil risiko interaksi negatif dan pencemaran lingkungan akibat kelebihan mineral yang tidak terserap (Hidayat, 2022).

4.6 Aplikasi pada senyawa bioaktif dan antioksidan

Enkapsulasi polifenol, flavonoid, karotenoid, antosianin, kurkumin, dan berbagai senyawa bioaktif herbal lainnya menjadi strategi penting untuk menjaga aktivitas antioksidan serta berbagai aktivitas biologis lain (seperti antiradang, antikanker, dan imunomodulator) yang sering terdegradasi dalam kondisi lingkungan yang keras. Dengan memasukkan senyawa-senyawa ini ke dalam matriks mikro- atau nanoenkapsulasi (misalnya liposom, nanokapsul, mikrosfer, atau sistem berbasis kitosan dan gel polimer), molekul aktif terlindungi dari paparan oksigen, cahaya, suhu tinggi, dan perubahan pH selama proses pengolahan dan penyimpanan (Hidayat, 2022).

Teknik enkapsulasi juga berkontribusi pada peningkatan stabilitas termal dan cahaya dari senyawa seperti antosianin dan kurkumin, yang dikenal sangat peka terhadap degradasi fisiko-kimiawi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa produk enkapsulasi antosianin rosela dan ekstrak kulit anggur sangat meningkatkan stabilitas warna dan aktivitas antioksidan dibandingkan dengan ekstrak bebas. Selain itu, beberapa kajian nanoenkapsulasi flavonoid dan ekstrak antioksidan lain melaporkan peningkatan aktivitas antioksidan terukur (misalnya pada uji DPPH dan FRAP) hingga berkali-kali lipat dibandingkan dengan senyawa non-enkapsulasi, sekaligus memperpanjang waktu kerja baik secara *in vitro* (misalnya dalam sistem larutan) maupun *in vivo* melalui peningkatan bioavailabilitas dan pelepasan bertahap

Tabel 4.3. Contoh Penerapan Enkapsulasi pada Berbagai Senyawa Bioaktif dan Antioksidan

Senyawa bioaktif	Sistem enkapsulasi	Contoh penerapan	Manfaat utama
Polifenol & flavonoid	Mikrokapsul dekstrin/maltodekstrin	Fortifikasi minuman dan sereal	Meningkatkan stabilitas termal dan cahaya, mempertahankan aktivitas antioksidan ¹⁾
Antosianin (rosela, anggur)	Mikrokapsul alg-alg/CTS, nanokapsul polimer	Produk minuman berwarna merah ungu	Meningkatkan efisiensi terbesar (hingga >98%), stabilitas warna, dan aktivitas antioksidan ¹⁾
Karotenoid (β -karoten)	Nanoemulsi minyak-dalam-air	Susu dan produk susu fungsional	Mengurangi degradasi cahaya, meningkatkan kelarutan dan bioavailabilitas ²⁾
Kurkumin	Nanokapsul PLGA, liposome, dan nanokarrier	Ekstrak herbal dan suplemen	Meningkatkan stabilitas pH lambung, memperpanjang waktu kerja <i>in vivo</i> , dan meningkatkan aktivitas antioksidan ²⁾

Keterangan: ¹⁾ Hidayat, (2022), ²⁾ Tiffany, et al., (2023)

4.7 Suplemen fungsional dan pangan fungsional

Nano-enkapsulasi kini menjadi elemen kunci dalam pengembangan suplemen fungsional modern, baik dalam bentuk kapsul, tablet, minuman fungsional, serbuk instan, maupun gummy. Teknologi ini memungkinkan senyawa bioaktif seperti vitamin, mineral, probiotik, ekstrak herbal, dan asam lemak esensial terlindungi dari degradasi akibat cahaya, oksigen, pH lambung, dan proses pengolahan, sehingga konsentrasinya tetap stabil sampai mencapai saluran cerna. Dengan ukuran partikel nanometer, zat aktif

lebih mudah terdispersi dan terserap, yang menjadi dasar klaim “bioavailabilitas tinggi” yang sering dicantumkan pada label produk suplemen.

Selain itu, desain sistem nano dapat dikembangkan untuk konsep targeted delivery, yaitu pengantaran tepat ke lokasi tertentu dalam tubuh, misalnya ke usus halus atau jaringan inflamasi, sehingga dosis yang dibutuhkan lebih kecil namun tetap efektif. Pada produk gummy dan serbuk instan, nano-enkapsulasi juga membantu mengurangi rasa pahit, aftertaste, atau perubahan warna yang biasanya ditimbulkan oleh ekstrak herbal atau vitamin, sehingga kualitas sensori tetap menarik konsumen tanpa mengorbankan khasiatnya (Tiffany, *et al.*, 2023)

Di sisi pangan fungsional, nano-enkapsulasi banyak diterapkan pada minuman probiotik/prebiotik, minuman isotonik, produk dairy fermentasi, snack bar, dan sereal yang diperkaya bioaktif terenkapsulasi. Pada minuman probiotik, sel probiotik yang terenkapsulasi cenderung lebih tahan terhadap keasaman lambung dan aktivitas enzim, sehingga jumlah sel hidup yang mencapai usus besar meningkat. Pada minuman isotonik dan dairy fermentasi, senyawa seperti vitamin, mineral, dan antioksidan dapat dienkapsulasi untuk mempertahankan aktivitasnya selama panas, pendinginan, dan penyimpanan, sekaligus mengurangi interaksi negatif yang menyebabkan perubahan rasa atau warna.

Dalam snack bar dan sereal, enkapsulasi memungkinkan fortifikasi dengan serat, protein bioaktif, atau ekstrak herbal tanpa mengganggu tekstur dan rasa, sehingga produk tetap enak dikonsumsi sekaligus mampu memberikan efek kesehatan yang spesifik, seperti penurunan risiko stunting atau peningkatan imunitas.

Tabel 4.4. Contoh Integrasi Nano-Enkapsulasi pada Suplemen dan Pangan Fungsional

Bentuk produk	Bioaktif terenkapsulasi	Contoh penerapan	Manfaat utama
Kapsul / tablet	Vitamin lipofilik, ekstrak herbal	Suplemen harian multivitamin dan herbal	Meningkatkan bioavailabilitas, melindungi dari degradasi di lambung ¹⁾
Minuman fungsional	Probiotik, polifenol, vitamin	Minuman probiotik, teh, dan minuman herbal	Meningkatkan stabilitas probiotik, memperpanjang aktivitas antioksidan ²⁾
Serbuk instan / gummy	Mineral nano, ekstrak kurkumin, flavonoid	Serbuk minuman dan gummy anak	Mengurangi rasa pahit, meningkatkan penyerapan, dan menjaga stabilitas warna ³⁾
Snack bar/cereal	Serat, peptida bioaktif, vitamin	Bar energi dan sereal sarapan	Meningkatkan rasa dan tekstur, dengan fortifikasi bioaktif terkontrol ⁴⁾
Minuman isotonik & dairy fermentasi	Elektrolit, vitamin, probiotik	Minuman isotonik dan yogurt probiotik	Menjaga aktivitas probiotik dan vitamin selama proses pengolahan dan penyimpanan ¹⁾

Keterangan: 1) Wicaksono and Nurdyansyah, (2021) ; 2) Ridwan, (2022) ; 3) Tiffany, et all. (2023) , dan 4) (Wulandari, et all.(2023)

4.8 Aspek keamanan dan regulasi

Pertimbangan toksikologi dan keamanan pangan

Pemanfaatan nanoteknologi dalam pangan dan suplemen fungsional menuntut evaluasi toksikologi yang cermat, terutama terkait potensi migrasi nanopartikel dari bahan kemasan atau matriks pangan ke dalam tubuh, kemungkinan akumulasi jangka panjang di organ-organ seperti hati, limpa, dan limfonodi, serta perubahan pola biodistribusi zat aktif yang terenkapsulasi. Ukuran partikel nanometer memungkinkan penetrasi ke dalam jaringan dan bahkan sel secara lebih mudah dibandingkan dengan bentuk makro, sehingga memperbesar pentingnya studi *in vitro* (misalnya pada lapisan epitel usus dan sel kultur) dan *in vivo* (hewan model) untuk memetakan kelarutan, distribusi, dan toksisitas jangka panjang.

Selain itu, perlu diperhatikan apakah modifikasi permukaan atau bahan penyalut nano (misalnya kitosan, maltodekstrin, alginat, atau polimer sintetik) tetap aman setelah terdegradasi dalam lingkungan pencernaan dan apakah senyawa hasil dekomposisi dapat menimbulkan efek iritasi, alergi, atau stres oksidatif. Oleh karena itu, desain sistem nano harus selalu dibarengi dengan pendekatan risk assessment berbasis data, termasuk uji sitotoksitas, mutagenisitas, dan toksisitas subkronik atau kronik, sebelum produk dinyatakan layak untuk dikonsumsi secara rutin oleh populasi umum.

Kerangka regulasi dan tantangan

Di sisi regulasi, salah satu isu utama adalah status keamanan bahan penyalut nano yang sering digolongkan sebagai *Generally Recognized as Safe* (GRAS) atau food grade dalam bentuk konvensional, tetapi belum tentu memiliki draf pedoman spesifik ketika diformulasikan dalam skala nanometer. Berbagai otoritas keamanan pangan, termasuk Badan POM dan lembaga regulasi internasional, cenderung bersikap hati-hati terhadap penggunaan nanoteknologi pangan karena kendala deteksi, karakterisasi, dan pemantauan residu nanopartikel dalam makanan dan tubuh.

Ke depan, diperlukan kerangka regulasi yang lebih spesifik untuk nanomaterial pangan, termasuk definisi teknis ukuran nanopartikel, metode analisis standar, dan kriteria pelabelan yang

jelas (misalnya pencantuman “nano-enkapsulasi” atau “bahan nano”) agar konsumen memperoleh informasi yang transparan. Di Indonesia, pengembangan pedoman khusus nanoteknologi pangan dipandang urgent agar inovasi industri suplemen dan pangan fungsional dapat berkembang secara aman, terukur, dan sesuai prinsip risk-based assessment.

DAFTAR PUSTAKA

- Adha, M. A., Saranani, S. and Andriani, R. (2025) 'Artikel Review: Formulasi Krim Liposome Ceramide, Nyamplung, VCO dan Glutathione sebagai Sunscreen Moisturizer', *Jurnal Mandala Pharmacon Indonesia*, 11(1), pp. 1–13. doi: 10.35311/jmpi.v11i1.566.
- Aguilar-Toala, J. E. *et al.* (2022) 'Encapsulation of bioactive peptides: A strategy to improve the stability, protect the nutraceutical bioactivity and support their food applications', *RSC Advances*, 12(11), pp. 6449–6458. doi: 10.1039/d1ra08590.
- Farlianti, R. L. *et al.* (2024) 'Review Artikel: Several Microencapsulation Methods Of Alginate- Based Adsorbents And The Applications For Remov', *Prosiding Seminar Nasional Kimia dan Terapan*, pp. 98–114.
- Fatimah Azzahra Sundaning Asih, Hanifa Rahma and Ratih Aryani (2024) 'Kajian Pengembangan Sistem Nanostructured Lipid Carriers (NLC) untuk Vitamin A', *Bandung Conference Series: Pharmacy*, 4(2), pp. 209–216. doi: 10.29313/bcsp.v4i2.13595.
- Hidayat, C. (2022) 'Efektivitas Penggunaan Nanomineral pada Pakan terhadap Peningkatan Performa Ayam: Review', *Jurnal Peternakan Indonesia (Indonesian Journal of Animal Science)*, 24(3), pp. 237–251. doi: 10.25077/jpi.24.3.237-251.2022.
- Ningsih, N., Yasni, S. and Yuliani, S. (2017) 'Sifat Fungsional Produk Enkapsulasinya [Nanoparticle of Red Mangosteen Peel Extract Synthesis and the Functional Characteristics of Its Encapsulated Products]', *J. Teknol. dan Industri Pangan*, 28(1), pp. 27–35. doi: 10.6066/jtip.2017.28.1.27.
- Nurfauziah, R. and Rusdiana, T. (2018) 'Formulasi nanoemulsi untuk meningkatkan kelarutan', *Farmaka*, 16(1), pp. 352–360.
- One, P. *et al.* (2025) 'Pembuatan Nano Kitosan dengan Metode Gelasi Ionik Menggunakan SEM (Scanning Electron Microscopy)', *Jurnal Pendidikan, Kimia, Fisika dan Biologi*, 1(4), pp. 27–34.
- Putri, W. (2022) *Pengaruh Konsentrasi Kitosan Dan Na-Tpp Terhadap Karakteristik Nanokurkumin Yang Disintesis Dengan Metode Gelasi Ionik Windi.*

- Ramadan, E. (2018) 'Research Article Research Article', *International Journal of Pharmaceutical Research & Allied Sciences*, 7(3), pp. 20–41.
- Ridwan, M. F. (2022) 'Sifat fisikokimia dan organoleptik kaldu ayam dari berbagai galur ayam'.
- Silviana, D. et al. (2012). Nanoemulsi dan nanoenkapsulasi emulsi untuk meningkatkan stabilitas senyawa hidrofobik. *Jurnal Pertanian dan Pangan*, 2(2), 1–8.
- Sethunga, M. et al. (2025) 'Hybrid nanoencapsulation systems: integrating natural polymers with synthetic nanomaterials for enhanced delivery of bioactive compounds in functional foods', *Nanoscale Advances*, 7(24), pp. 7867–7890. doi: 10.1039/d5na00751h.
- Tiffany, M. H., Bossa Samang, A. M. and Islamiyah, S. Al (2023) 'Enkapsulasi Senyawa Lipid Bioaktif Menggunakan Nanoteknologi: Ulasan Ilmiah', *JASATHP: Jurnal Sains dan Teknologi Hasil Pertanian*, 3(2), pp. 82–98. doi: 10.55678/jasathp.v3i2.1234.
- Wicaksono, D. S. and Nurdyansyah, F. (2021) 'Aplikasi Teknologi Nanoenkapsulasi untuk Melindungi Senyawa Bioaktif Bahan Pangan Application of Nanoencapsulation Technology to Protect Bioactive Compounds in Food System', *Ilmi Pangan dan Hasil Pertanian*, 5(2), pp. 222–231. doi: 10.26877/jiphp.v5i2.11231.
- Wijaya, L. A. (2024). Optimasi produksi nanoemulsi giberelin kitosan menggunakan metode permukaan respon dan perlakuan ultrasonik
- Wulandari, S., Prasetya, D. and Lestari, T. (2023) 'Pengembangan makanan fungsional berbasis pangan lokal untuk pencegahan stunting', *Jurnal Gizi dan Kesehatan Masyarakat*, 11(1), pp. 13–20.
- Yuliasari, S. H. S. (2016) 'Aplikasi nanoteknologi untuk pangan fungsional mendukung diversifikasi pangan 1)', *Kementerian Pertanian RI*, pp. 1475–1482. Available at: <https://repository.pertanian.go.id/items/e044fded-ca20-41c6-bebb-b4cd45398461>.

BAB 5

ANALISIS RISIKO DAN DAMPAK KESEHATAN KONSUMEN

5.1 Latar Belakang Risiko Kesehatan Konsumen

Dalam konteks pembangunan berkelanjutan, perlindungan kesehatan konsumen semakin dipandang sebagai bagian integral dari sistem pangan dan sistem produksi yang bertanggung jawab. Konsumen tidak hanya membutuhkan produk yang tersedia dan terjangkau, tetapi juga produk yang aman, bermutu, dan tidak menimbulkan dampak merugikan bagi kesehatan dalam jangka pendek maupun jangka panjang. Organisasi Kesehatan Dunia menegaskan bahwa keamanan pangan, gizi, dan ketahanan pangan saling terkait erat, sehingga kegagalan menjamin keamanan pangan akan langsung melemahkan derajat kesehatan masyarakat. Secara global, pangan yang tidak aman dikaitkan dengan lebih dari 200 jenis penyakit, mulai dari diare hingga kanker, dan diperkirakan menyebabkan sekitar 600 juta orang jatuh sakit serta 420.000 kematian setiap tahun. Kondisi ini menunjukkan bahwa isu keamanan pangan bukan lagi persoalan teknis semata, melainkan persoalan kesehatan publik, pembangunan sosial, dan beban ekonomi yang nyata bagi negara maupun rumah tangga (WHO, 2024).

Perhatian terhadap risiko kesehatan konsumen juga meningkat karena sumber bahaya dalam produk pangan dan konsumsi sehari-hari semakin beragam serta tersebar di seluruh rantai pasok. Tinjauan sistematis yang dilakukan Gizaw (2019) menunjukkan bahwa risiko kesehatan di pasar pangan tidak hanya berasal dari kontaminasi mikrobiologis dan kimiawi, tetapi juga dari pemalsuan pangan, penyalahgunaan bahan tambahan, pelabelan yang menyesatkan, serta peredaran produk yang telah melewati masa layak konsumsi. Temuan ini penting karena menegaskan

bahwa risiko kesehatan konsumen tidak selalu tampak secara kasatmata; sebagian risiko justru tersembunyi dalam proses produksi, distribusi, penyimpanan, dan penyajian. Di era perdagangan yang saling terhubung, suatu produk dapat terkontaminasi di satu lokasi, diproses di tempat lain, lalu dikonsumsi di wilayah berbeda, sehingga pendekatan perlindungan konsumen harus berbasis risiko, lintas sektor, dan tidak berhenti pada pengawasan akhir di tingkat pasar saja (Gizaw, 2019; WHO, 2024).

Salah satu alasan utama mengapa analisis risiko kesehatan konsumen menjadi semakin penting adalah meningkatnya kekhawatiran terhadap paparan residu kimia dalam pangan, terutama pestisida dan kontaminan lain yang dapat bertahan di lingkungan maupun pada bahan pangan. WHO menjelaskan bahwa pestisida memang berperan dalam menjaga hasil pertanian, tetapi zat ini juga bersifat toksik bagi manusia dan dapat menimbulkan efek akut maupun kronis, tergantung pada dosis, jalur paparan, dan lamanya paparan. Yang lebih kompleks, konsumen pada praktiknya sering kali tidak terpapar satu residu secara tunggal, melainkan campuran berbagai residu dalam satu jenis pangan atau dari pola konsumsi harian yang beragam. Karena itu, penilaian risiko modern semakin menekankan pentingnya *cumulative risk assessment*, yakni pendekatan yang tidak hanya menilai satu senyawa secara terpisah, tetapi juga mempertimbangkan efek gabungan dari berbagai residu pestisida yang mungkin bekerja secara aditif terhadap kesehatan manusia. Dengan demikian, isu residu kimia tidak dapat lagi dipahami secara sederhana sebagai kepatuhan terhadap batas maksimum residu semata, tetapi harus dilihat sebagai bagian dari perlindungan kesehatan konsumen yang lebih komprehensif (WHO, 2022; Yang et al., 2024).

Di samping bahaya kimia, kontaminasi biologis tetap menjadi salah satu ancaman paling nyata bagi kesehatan konsumen karena dapat menyebabkan penyakit secara cepat, luas, dan kadang fatal. Bakteri, virus, dan parasit patogen dapat masuk ke pangan melalui air, tanah, hewan, peralatan, pekerja, maupun praktik penanganan yang buruk. WHO menekankan bahwa kelompok paling rentan terhadap pangan tidak aman adalah bayi, anak kecil, lansia, dan

individu dengan kondisi kesehatan tertentu, karena pada kelompok ini penyakit bawaan pangan dapat memperburuk malnutrisi, memperpanjang kesakitan, dan meningkatkan risiko kematian. Tantangan ini semakin kompleks ketika dikaitkan dengan perubahan iklim. Kajian Awad, Masoud dan Hamad (2024) menunjukkan bahwa perubahan suhu, kelembapan, pola curah hujan, dan gangguan lingkungan lain dapat memengaruhi kelangsungan hidup, pertumbuhan, serta persebaran patogen bawaan pangan. Artinya, risiko biologis tidak bersifat statis; ia berubah mengikuti dinamika ekologis dan sosial, sehingga memerlukan pengawasan dan kesiapsiagaan yang lebih adaptif dari waktu ke waktu (WHO, 2024; Awad, Masoud and Hamad, 2024).

Lebih jauh, perubahan pola konsumsi masyarakat telah membuat isu kesehatan konsumen menjadi semakin strategis. Model distribusi pangan kini semakin panjang dan kompleks, sementara perdagangan digital, layanan antar makanan, serta tuntutan konsumen terhadap kemudahan dan kecepatan memperbesar tantangan dalam menjaga keamanan dan mutu produk sepanjang rantai pasok. WHO dalam strategi global keamanan pangan 2022–2030 menyoroti bahwa model bisnis baru, termasuk *e-commerce* dan layanan pengantaran pangan, menuntut sistem komunikasi risiko dan pengawasan yang lebih maju. Dari sisi mutu produk, aspek umur simpan, sanitasi, pengemasan, distribusi, dan penyimpanan merupakan faktor penting yang menentukan apakah suatu produk masih aman pada saat dikonsumsi. Selain itu, keterlacakan (*traceability*) menjadi fondasi penting agar sumber bahaya dapat diidentifikasi secara cepat dan respons perlindungan konsumen dapat dilakukan secara efektif. Bahkan pada tingkat rumah tangga, pencucian atau perlakuan sederhana terhadap buah dan sayur tidak selalu cukup untuk menghilangkan mikroorganisme patogen dan residu pestisida secara optimal. Oleh sebab itu, perlindungan konsumen pada akhirnya harus dipahami bukan hanya sebagai perlindungan atas nilai ekonomi barang, tetapi sebagai upaya sistematis untuk menjaga keselamatan, kesehatan, dan keberlanjutan kualitas hidup masyarakat (WHO, 2022; Taormina and Hardin, 2021; McEntire and Kennedy, 2019; Bhilwadikar *et al.*, 2019).

5.2 Konsep Dasar Analisis Risiko Kesehatan

Analisis risiko kesehatan pada dasarnya merupakan pendekatan ilmiah yang dipakai untuk menilai kemungkinan timbulnya dampak merugikan terhadap kesehatan manusia akibat paparan suatu bahaya tertentu, baik yang berasal dari pangan, bahan kimia, agen biologis, maupun faktor lingkungan lainnya. Dalam kerangka internasional, analisis risiko tidak dipahami hanya sebagai kegiatan menghitung bahaya, melainkan sebagai sistem yang menghubungkan risk assessment, risk management, dan risk communication. Di dalamnya, risk assessment berfungsi menyediakan dasar ilmiah, sedangkan risk management menerjemahkan hasil penilaian ke dalam pilihan pengendalian, dan risk communication menjamin bahwa informasi risiko dipahami secara proporsional oleh para pemangku kepentingan. Dengan demikian, analisis risiko kesehatan tidak sekadar menjawab apakah suatu produk berbahaya, tetapi juga seberapa besar bahayanya, pada kondisi apa bahaya itu muncul, serta tindakan apa yang paling tepat untuk mengurangnya (WHO, 2022; Codex Alimentarius Commission, 2025; Asante-Duah, 2017).

Tahap pertama dalam risk assessment adalah identifikasi bahaya, yaitu proses mengenali agen, kondisi, atau karakteristik produk yang berpotensi menimbulkan efek buruk bagi kesehatan. Pada tahap ini, peneliti atau penilai risiko menelusuri apakah suatu bahan mengandung kontaminan kimia, mikroorganisme patogen, toksin, alergen, atau faktor fisik yang relevan. Setelah itu dilakukan karakterisasi bahaya, yaitu penilaian terhadap sifat dan tingkat keparahan dampak yang mungkin ditimbulkan, termasuk hubungan antara dosis dan respons biologis. Dalam konteks bahaya kimia, tahap ini berkaitan erat dengan data toksikologi, ambang aman, serta kemungkinan efek akut dan kronis. Dalam konteks bahaya biologis, karakterisasi bahaya juga mencakup pemahaman tentang virulensi agen, kemampuan bertahan hidup, dan potensi menimbulkan penyakit pada kelompok populasi yang berbeda. Karena itu, dua tahap awal ini sangat menentukan mutu keseluruhan analisis risiko, sebab kesalahan dalam mengenali bahaya sejak awal akan berpengaruh langsung terhadap hasil penilaian berikutnya

(Pekmezci, Sipahi and Başaran, 2025; Vergis et al., 2025; Asante-Duah, 2017).

Tahap berikutnya adalah penilaian pajanan (exposure assessment), yaitu estimasi mengenai seberapa besar, seberapa sering, dan berapa lama manusia terpajan oleh bahaya tersebut. Penilaian pajanan tidak hanya melihat kadar suatu kontaminan di dalam produk, tetapi juga memperhitungkan pola konsumsi, frekuensi paparan, jalur masuk ke tubuh, serta karakteristik kelompok rentan seperti anak-anak, ibu hamil, lansia, atau individu dengan kondisi kesehatan tertentu. Pada praktiknya, pajanan dapat bersifat tunggal atau berulang, rendah tetapi kronis, maupun tinggi dalam jangka pendek, sehingga konsekuensi kesehatannya dapat berbeda. Oleh karena itu, tahap ini memerlukan integrasi data konsumsi, data kejadian kontaminasi, dan parameter biologis yang relevan. Dalam banyak kasus, justru tahap pajanan inilah yang menjelaskan mengapa suatu bahaya tidak selalu menimbulkan risiko yang sama pada semua populasi, meskipun sumber bahayanya serupa (Pekmezci, Sipahi and Başaran, 2025; Asante-Duah, 2017).

Setelah identifikasi bahaya, karakterisasi bahaya, dan penilaian pajanan dilakukan, tahap berikutnya adalah karakterisasi risiko, yaitu penggabungan seluruh bukti ilmiah untuk menilai besarnya kemungkinan dan tingkat keparahan dampak kesehatan pada populasi tertentu. Pada tahap ini, risiko tidak dipandang sebagai angka yang berdiri sendiri, melainkan sebagai hasil sintesis antara sifat bahayanya dan tingkat paparannya. Karakterisasi risiko juga harus secara eksplisit memperhatikan ketidakpastian dan variabilitas, karena data lapangan, asumsi model, perbedaan biologis antarmanusia, serta keterbatasan metode dapat memengaruhi hasil akhir. Karena itu, pendekatan yang digunakan dapat bersifat kualitatif, semikuantitatif, atau kuantitatif, tergantung pada ketersediaan data dan kompleksitas masalah. Dalam perkembangan mutakhir, pendekatan probabilistik semakin dipandang penting karena mampu menggambarkan rentang kemungkinan risiko secara lebih transparan daripada sekadar nilai titik tunggal, terutama ketika analisis diarahkan untuk melindungi populasi rentan (Vergis et al., 2025; Stewart and Hursthouse, 2018; Flinders et al., 2025; Aven, 2020).

Meskipun risk assessment merupakan inti ilmiah dari analisis risiko, hasilnya baru menjadi bermakna ketika dihubungkan dengan manajemen risiko dan komunikasi risiko. Manajemen risiko menggunakan hasil penilaian untuk memilih tindakan pengendalian yang paling layak, efektif, dan proporsional, dengan tetap mempertimbangkan kelayakan teknis, implikasi ekonomi, serta tujuan perlindungan kesehatan publik. Sementara itu, komunikasi risiko berfungsi menyampaikan dasar ilmiah, tingkat ketidakpastian, dan alasan di balik suatu keputusan agar dapat dipahami oleh regulator, pelaku usaha, dan konsumen. Dalam konteks pangan dan kesehatan konsumen, komunikasi yang baik menjadi sangat penting karena persepsi publik sering kali tidak identik dengan hasil kajian ilmiah. Oleh sebab itu, pemahaman atas konsep dasar analisis risiko kesehatan perlu ditempatkan sebagai fondasi teoritis utama, sebab seluruh pembahasan lanjutan mengenai jenis bahaya, besar risiko, strategi mitigasi, dan kebijakan perlindungan konsumen bertumpu pada kerangka ini (WHO, 2022; Codex Alimentarius Commission, 2025; Onyeaka, 2025).

5.3 Jenis-Jenis Risiko yang Dihadapi Konsumen

Risiko kesehatan yang dihadapi konsumen pada dasarnya bersifat multidimensi karena dapat muncul dari berbagai sumber bahaya di sepanjang rantai produksi, distribusi, penyimpanan, hingga konsumsi. Dalam kajian keamanan pangan dan kesehatan konsumen, klasifikasi yang paling umum membedakan risiko menjadi risiko biologis, kimiawi, fisik, serta risiko sosial-perilaku yang bekerja secara langsung maupun tidak langsung terhadap keputusan konsumsi dan status kesehatan. Pengelompokan ini penting karena setiap jenis risiko memiliki sumber, mekanisme paparan, serta konsekuensi kesehatan yang berbeda, sehingga strategi pengendaliannya pun tidak dapat disamakan. Pendekatan ini juga menegaskan bahwa perlindungan konsumen tidak cukup hanya berfokus pada mutu akhir produk, tetapi harus mencakup keseluruhan sistem yang memungkinkan bahaya masuk dan memengaruhi konsumen (WHO, 2024; King, 2020; Bereda, 2025).

Risiko biologis merupakan salah satu kategori yang paling klasik sekaligus paling penting karena berhubungan langsung

dengan penyakit bawaan pangan. Risiko ini berasal dari keberadaan mikroorganisme patogen seperti bakteri, virus, dan parasit, serta dalam konteks tertentu juga berkaitan dengan kapang yang dapat menghasilkan toksin. WHO menegaskan bahwa pangan yang terkontaminasi agen infeksius atau toksik dapat menimbulkan lebih dari 200 jenis penyakit, mulai dari gangguan gastrointestinal akut hingga penyakit yang lebih berat. Kajian mutakhir mengenai pangan yang diawetkan dingin juga menunjukkan bahwa suhu rendah tidak selalu menjamin keamanan, karena sejumlah patogen psikotrofik tetap dapat bertahan, sementara jalur kontaminasi dapat terjadi melalui bahan baku, air proses, permukaan peralatan, desain fasilitas, hingga distribusi. Hal ini menunjukkan bahwa risiko biologis bukan sekadar persoalan keberadaan mikroba, melainkan juga persoalan kondisi sistem produksi dan penanganan yang memungkinkan agen tersebut bertahan dan mencapai konsumen (WHO, 2024; Jha et al., 2026).

Risiko kimiawi mencakup paparan terhadap zat yang secara alamiah maupun akibat aktivitas manusia dapat menimbulkan gangguan kesehatan bila masuk ke tubuh melalui pangan atau produk konsumsi lainnya. Jenis bahaya ini meliputi residu pestisida, logam berat, mikotoksin, bahan tambahan tertentu yang disalahgunakan, hingga kontaminan baru seperti PFAS dan mikroplastik. Tinjauan naratif Bereda (2025) menunjukkan bahwa paparan kronis terhadap kontaminan pangan dapat dikaitkan dengan stres oksidatif, kerusakan DNA, gangguan endokrin, gangguan neurologis, dan peningkatan risiko kanker, meskipun tingkat bahayanya sangat dipengaruhi oleh dosis, lama paparan, dan kerentanan individu. Secara lebih spesifik, tinjauan sistematis Alawadhi et al. (2024) menegaskan bahwa rempah dan herba yang beredar di pasar global pun dapat mengandung logam berat dengan implikasi risiko non-karsinogenik maupun karsinogenik. Karena itu, risiko kimiawi perlu dipahami sebagai ancaman yang sering kali tidak tampak secara kasatmata, tetapi dapat memberi dampak akumulatif terhadap kesehatan konsumen (Bereda, 2025; Alawadhi et al., 2024; WHO, 2024).

Risiko fisik timbul ketika benda asing atau material yang seharusnya tidak terdapat dalam produk ikut terbawa ke dalam

pangan dan berpotensi menyebabkan cedera, tersedak, luka pada rongga mulut atau saluran cerna, serta penolakan produk oleh konsumen. Contoh kontaminan fisik yang sering dilaporkan mencakup serpihan kaca, logam, plastik, batu kecil, tulang, atau fragmen lain yang masuk akibat kesalahan selama proses manufaktur, penyimpanan, maupun transportasi. Röhrs, Rohn dan Pfeifer (2024) mengategorikan foreign bodies sebagai bagian penting dari insiden keselamatan pangan, sedangkan Li et al. (2025) menegaskan bahwa keberadaan foreign matter merupakan persoalan nyata bagi keamanan pangan dan kesehatan konsumen, sehingga deteksinya menjadi prioritas penting. Secara analitis, risiko fisik sering dianggap lebih mudah dikenali dibandingkan risiko biologis atau kimiawi, tetapi pada praktiknya tetap sulit dikendalikan sepenuhnya, terutama dalam sistem produksi berskala besar dan rantai pasok yang kompleks (Röhrs, Rohn and Pfeifer, 2024; Li et al., 2025; WHO, 2024).

Selain risiko yang bersifat langsung, konsumen juga menghadapi risiko sosial-perilaku yang muncul dari informasi produk yang tidak akurat, komunikasi risiko yang lemah, pengaruh media sosial, dan pola konsumsi yang tidak sehat. Tinjauan sistematis Rini et al. (2024) menunjukkan bahwa media sosial telah menjadi bagian penting dalam pembentukan sikap, niat, dan perilaku konsumsi pangan, sehingga informasi yang beredar di ruang digital dapat memengaruhi pilihan konsumen secara nyata. Dalam konteks ini, masalahnya bukan hanya salah label atau klaim yang membingungkan, tetapi juga misinformasi yang dapat menggeser persepsi publik menjauh dari penilaian ilmiah atas risiko. Di sisi lain, bukti epidemiologis juga menunjukkan bahwa pola konsumsi yang tinggi terhadap pangan ultra-proses berasosiasi dengan peningkatan risiko berbagai luaran kesehatan yang merugikan, termasuk obesitas, diabetes, hipertensi, dislipidemia, serta sejumlah luaran kardiometabolik dan mental, walaupun sebagian besar bukti masih bersifat observasional dan perlu dibaca secara hati-hati. Dengan demikian, risiko konsumen tidak hanya berasal dari apa yang terkandung di dalam produk, tetapi juga dari bagaimana konsumen dipengaruhi untuk memahami, memilih, dan mengonsumsinya (Rini et al., 2024; Vitale et al., 2024; Lane et al., 2024; Onyeaka, 2025).

5.4 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Besarnya Risiko Kesehatan

Besarnya risiko kesehatan pada konsumen tidak pernah ditentukan oleh satu faktor tunggal. Dalam kajian analisis risiko modern, risiko merupakan hasil interaksi antara sifat bahayanya, besarnya paparan, serta kerentanan individu yang terpajan. Karena itu, suatu bahan atau produk yang mengandung bahaya tertentu belum tentu menghasilkan tingkat risiko yang sama pada setiap situasi. Penilaian risiko harus memperhatikan variabilitas dan ketidakpastian, sebab paparan nyata pada populasi selalu dipengaruhi oleh perbedaan perilaku konsumsi, kadar kontaminan, serta kondisi biologis penerima paparan. Dengan kata lain, risiko kesehatan tidak cukup dipahami hanya dari ada atau tidaknya bahaya, tetapi dari konteks bagaimana bahaya tersebut mencapai tubuh manusia dan bagaimana tubuh meresponsnya (Pekmezci, Sipahi and Başaran, 2025; WHO, 2022).

Faktor yang paling mendasar dalam menentukan besar kecilnya risiko adalah dosis, frekuensi, durasi, dan jalur paparan. Paparan dosis tinggi dalam waktu singkat lebih sering dikaitkan dengan efek akut, sedangkan paparan dosis rendah tetapi berulang dapat menimbulkan dampak kronis yang baru terlihat setelah waktu yang panjang. Dalam konteks pangan, dua orang dapat mengonsumsi bahan yang sama, tetapi tingkat risikonya berbeda karena jumlah yang dimakan, intensitas konsumsi, berat badan, dan pola makan hariannya tidak identik. Itulah sebabnya pendekatan penilaian paparan saat ini semakin banyak menggunakan model probabilistik, karena model tersebut lebih mampu menggambarkan variasi nyata konsumsi dan paparan di tingkat populasi dibandingkan estimasi titik tunggal yang terlalu sederhana. Dengan demikian, besarnya risiko kesehatan sangat dipengaruhi oleh kuantitas paparan dan pola keterulangannya, bukan hanya oleh keberadaan zat berbahaya itu sendiri (Pekmezci, Sipahi and Başaran, 2025; Paoli, Hartnett and Price, 2025).

Selain besarnya paparan, karakteristik produk dan cara pengolahan juga berpengaruh kuat terhadap risiko kesehatan. Sifat produk seperti stabilitas mikrobiologis, komposisi, dan umur simpan akan menentukan apakah suatu produk relatif aman atau justru lebih

mudah mengalami penurunan mutu dan peningkatan bahaya selama penyimpanan. Pada saat yang sama, pengolahan dapat berfungsi ganda: di satu sisi menurunkan bahaya, misalnya dengan menekan mikroorganisme melalui pemanasan atau teknik pengawetan tertentu, tetapi di sisi lain dapat pula membentuk kontaminan proses yang berisiko bagi kesehatan. Tinjauan mutakhir menunjukkan bahwa pemanasan, pengeringan, pemanggangan, dan fermentasi tertentu dapat menghasilkan senyawa seperti akrilamida, *heterocyclic aromatic amines*, *polycyclic aromatic hydrocarbons*, dan kontaminan proses lain yang berpotensi merugikan bila pajanan berlangsung terus-menerus. Karena itu, analisis risiko harus selalu menilai produk tidak hanya pada kondisi akhirnya, tetapi juga pada proses yang membentuknya (Taormina and Hardin, 2021; Zahir, Ge and Khan, 2025).

Faktor berikutnya yang sangat menentukan adalah kondisi distribusi, penyimpanan, sanitasi, dan pengendalian umur simpan. Sebuah produk yang awalnya aman dapat menjadi berisiko bila mengalami gangguan suhu, kontaminasi silang, sanitasi yang buruk, atau penyimpanan yang melampaui batas stabilitasnya. Literatur tentang shelf life menegaskan bahwa penurunan keamanan pangan ditentukan oleh kerusakan mikrobiologis, kimiawi, fisik, dan sensorik yang saling berhubungan, serta dipengaruhi oleh sanitasi, pengolahan, dan kemasan di seluruh rantai distribusi. WHO juga menekankan bahwa urbanisasi, perubahan kebiasaan makan, dan semakin panjangnya rantai pasok global membuat pengawasan keamanan pangan menjadi lebih kompleks; insiden lokal bahkan dapat berkembang cepat menjadi masalah lintas wilayah karena distribusi produk yang makin luas dan cepat. Hal ini berarti bahwa tingkat risiko pada konsumen tidak hanya dibentuk di tempat produksi, tetapi juga pada seluruh perjalanan produk sampai ke tangan pengguna akhir (Taormina and Hardin, 2021; WHO, 2024).

Pada akhirnya, karakteristik individu konsumen tetap menjadi penentu sentral dalam besar kecilnya risiko kesehatan. Anak-anak, ibu hamil, lansia, dan individu dengan sistem imun yang lemah diketahui lebih rentan mengalami dampak yang lebih berat dari paparan bahaya pangan dibandingkan orang dewasa sehat. WHO menunjukkan bahwa anak di bawah lima tahun menanggung

porsi yang tidak proporsional dari beban penyakit bawaan pangan, sedangkan kajian pada populasi rentan menegaskan bahwa kerentanan meningkat karena kombinasi faktor biologis, keterbatasan proteksi diri, dan kondisi sosial tertentu. Di samping itu, status gizi juga memengaruhi kompetensi imun; asupan gizi yang tidak memadai dapat menurunkan kemampuan tubuh merespons infeksi dan memperbesar konsekuensi klinis dari paparan yang sama. Oleh karena itu, analisis risiko yang baik harus mengintegrasikan konteks biologis, perilaku, dan sosial sekaligus, sebab besar kecilnya risiko pada konsumen pada akhirnya ditentukan oleh pertemuan antara bahaya, sistem pangan, dan kerentanan manusia yang mengonsumsinya (Njoagwuani et al., 2023; Munteanu and Schwartz, 2022; WHO, 2024).

5.5 Dampak Kesehatan Konsumen dalam Jangka Pendek dan Jangka Panjang

Dampak kesehatan yang dialami konsumen akibat paparan risiko tidak selalu muncul dalam bentuk yang sama, baik dari segi waktu kemunculan maupun tingkat keparahannya. Dalam kajian keamanan pangan dan kesehatan konsumen, dampak tersebut lazim dibedakan menjadi dampak jangka pendek dan jangka panjang. Dampak jangka pendek umumnya timbul segera atau dalam waktu relatif singkat setelah paparan, sedangkan dampak jangka panjang cenderung berkembang perlahan, sering kali melalui paparan berulang dalam dosis rendah, sehingga bersifat kumulatif dan laten. Organisasi Kesehatan Dunia menyatakan bahwa pangan tidak aman yang mengandung bakteri, virus, parasit, atau zat kimia berbahaya dapat menyebabkan lebih dari 200 jenis penyakit, mulai dari diare hingga kanker. Hal ini menunjukkan bahwa konsekuensi kesehatan konsumen tidak boleh dipersempit hanya pada kejadian keracunan akut, melainkan harus dipahami sebagai spektrum gangguan yang sangat luas, dari keluhan ringan sampai penyakit kronis yang serius (WHO, 2024; Asante-Duah, 2017).

Dalam jangka pendek, bentuk dampak yang paling sering muncul adalah keracunan, gangguan saluran cerna, dan infeksi akut. Konsumen yang terpajan pangan terkontaminasi dapat mengalami mual, muntah, diare, nyeri perut, demam, dan dehidrasi; pada kondisi

yang lebih berat, gangguan ini dapat berujung pada rawat inap bahkan kematian, terutama pada bayi, anak kecil, lansia, dan individu dengan kondisi kesehatan yang sudah lemah. Risiko akut seperti ini umumnya terkait dengan cemaran biologis, meskipun paparan kimia tertentu juga dapat memicu gejala cepat tergantung jenis dan dosis zat yang tertelan. Dengan demikian, dampak jangka pendek perlu dipahami sebagai konsekuensi klinis yang tampak segera, tetapi tetap harus dilihat dalam kerangka yang lebih luas karena kejadian akut sering kali menjadi indikator adanya masalah sistemik pada produksi, distribusi, atau pengawasan produk konsumsi (WHO, 2024).

Selain keracunan dan infeksi, reaksi alergi juga merupakan dampak jangka pendek yang sangat penting dalam konteks kesehatan konsumen. Pada sebagian individu, paparan alergen pangan dapat menimbulkan gejala yang muncul cepat, mulai dari gatal, urtikaria, pembengkakan, keluhan saluran cerna, hingga gangguan pernapasan dan reaksi sistemik berat berupa anafilaksis. Warren *et al.* (2024) menunjukkan bahwa alergi pangan bukan hanya masalah klinis biasa, melainkan beban kesehatan yang nyata dan pada sebagian kasus dapat mengancam jiwa. Tinjauan Leung *et al.* (2025) bahkan menegaskan bahwa food-induced anaphylaxis merupakan penyebab utama anafilaksis secara global, dengan pola kejadian yang terus berkembang seiring perubahan lingkungan konsumsi, praktik produksi, dan jenis alergen yang beredar. Oleh karena itu, dampak jangka pendek pada konsumen tidak selalu identik dengan infeksi atau keracunan, tetapi juga mencakup reaksi imunologis akut yang memerlukan kewaspadaan tinggi dari sistem perlindungan konsumen (Warren *et al.*, 2024; Leung *et al.*, 2025).

Berbeda dengan gejala akut, dampak jangka panjang umumnya berkembang secara perlahan dan sering kali baru teridentifikasi setelah paparan berlangsung lama. Paparan kronis terhadap kontaminan pangan, seperti logam berat, mikotoksin, residu pestisida, dan kontaminan proses, dikaitkan dengan gangguan metabolik, kerusakan hati dan ginjal, gangguan endokrin, gangguan neurologis, serta peningkatan risiko kanker. Bereda (2025) menekankan bahwa paparan kronis terhadap kontaminan pangan dapat mendorong kerusakan DNA, stres oksidatif, dan gangguan

homeostasis seluler, sedangkan Zahir, Ge dan Khan (2025) menunjukkan bahwa kontaminan yang terbentuk selama pemrosesan termal dan fermentasi juga menimbulkan kekhawatiran kesehatan publik yang serius. Dalam kelompok kontaminan yang lebih baru, tinjauan sistematis Chartres et al. (2024) menyimpulkan bahwa mikroplastik “diduga” merugikan kesehatan reproduksi, pencernaan, dan pernapasan, dengan kemungkinan kaitan terhadap kanker kolon dan paru. Temuan-temuan ini memperlihatkan bahwa dampak jangka panjang pada konsumen tidak selalu segera terasa, tetapi dapat mengikis fungsi organ dan kualitas kesehatan secara bertahap (Bereda, 2025; Zahir, Ge and Khan, 2025; Chartres *et al.*, 2024).

Dampak jangka panjang juga dapat timbul melalui pola konsumsi yang terus-menerus tidak sehat, meskipun tanpa adanya keracunan akut yang jelas. Umbrella review oleh Lane et al. (2024) menunjukkan bahwa paparan yang lebih tinggi terhadap pangan ultra-proses berhubungan dengan peningkatan risiko luaran kesehatan yang merugikan, terutama pada ranah kardiometabolik, gangguan mental umum, dan mortalitas. Temuan ini penting karena memperluas pemahaman bahwa kesehatan konsumen dipengaruhi bukan hanya oleh bahaya kontaminan yang kasatmata, tetapi juga oleh pola konsumsi yang membentuk paparan kronis terhadap komposisi pangan yang buruk. Dengan demikian, subbab ini menegaskan bahwa dampak kesehatan konsumen harus dibaca dalam perspektif waktu: ada risiko yang menimbulkan gejala cepat dan ada pula yang bersifat senyap, kumulatif, dan baru terlihat setelah bertahun-tahun. Atas dasar itu, analisis risiko kesehatan perlu mempertimbangkan perjalanan paparan sepanjang waktu, karakteristik biologis individu, dan konteks sosial konsumsi secara bersamaan (Lane *et al.*, 2024; WHO, 2024; Asante-Duah, 2017).

5.6 Strategi Mitigasi dan Pengendalian Risiko bagi Konsumen

Strategi mitigasi dan pengendalian risiko bagi konsumen pada dasarnya harus ditempatkan sebagai pendekatan preventif yang bekerja sebelum bahaya berkembang menjadi insiden kesehatan masyarakat. Dalam kerangka internasional, sistem

keamanan pangan dipahami sebagai kombinasi aktivitas seluruh pemangku kepentingan di rantai pangan yang bertujuan melindungi kesehatan dan kesejahteraan manusia, sehingga perlindungan konsumen tidak dapat dibebankan hanya pada tahap akhir pemasaran. WHO juga menegaskan bahwa keamanan pangan merupakan tanggung jawab bersama antara pemerintah, produsen pangan, penjamah pangan, dan konsumen, serta harus dijalankan di seluruh rantai pangan dari produksi sampai konsumsi. Karena itu, strategi pengendalian risiko yang efektif harus berbasis sistem, bersifat lintas sektor, dan menghubungkan pengawasan teknis dengan perubahan perilaku para pelaku di dalam rantai pasok pangan.

Salah satu pilar utama mitigasi risiko adalah penerapan standar keamanan produk dan sistem manajemen keamanan pangan yang berbasis bahaya. Dokumen Codex menempatkan General Principles of Food Hygiene sebagai dokumen fundamental yang menjelaskan langkah-langkah higiene dan kendali keamanan pangan yang diperlukan, dan revisi terbarunya menegaskan integrasi konsep *Hazard Analysis and Critical Control Point* (HACCP) ke dalam tubuh utama dokumen. Sejalan dengan itu, WHO mendefinisikan food safety management system sebagai pendekatan sistematis berbasis risiko untuk mengendalikan bahaya keamanan pangan di dalam usaha pangan dengan menggunakan prinsip HACCP. Dari sudut manajerial, King menekankan bahwa pencegahan penyakit bawaan pangan memerlukan active managerial control, bukan sekadar audit sesekali, karena pengendalian risiko yang efektif harus tertanam dalam praktik harian, desain fasilitas, pelatihan, dan pengawasan operasional yang konsisten.

Selain standar proses, pengawasan mutu, ketertelusuran, dan kemampuan penarikan produk merupakan komponen penting dalam mengurangi risiko bagi konsumen. WHO menyebut penguatan sistem pengendalian pangan nasional, penilaian kinerja sistem pengawasan di seluruh rantai pangan, serta kemampuan merespons kedaruratan pangan sebagai bagian dari strategi inti untuk menurunkan beban penyakit bawaan pangan. Dalam perspektif konsumen, telaah sistematis Chaudhary, Sharma dan Vemireddy menunjukkan bahwa *food traceability* dipandang sebagai

pendekatan penting untuk menjamin keamanan dan mutu pangan, terutama setelah berbagai insiden keamanan pangan di banyak negara. Tinjauan yang lebih mutakhir mengenai smart food labels juga menunjukkan bahwa teknologi pelabelan cerdas dapat memperkuat ketertelusuran secara waktu nyata, mengurangi kecurangan pangan, dan meningkatkan keselamatan produk, meskipun adopsinya masih dipengaruhi oleh tingkat kepercayaan, kemudahan penggunaan, regulasi, dan edukasi publik. Temuan-temuan ini menunjukkan bahwa perlindungan konsumen semakin menuntut sistem pengendalian yang tidak hanya reaktif, tetapi juga mampu mendeteksi, melacak, dan mengisolasi risiko secara cepat sebelum dampaknya meluas.

Instrumen penting berikutnya adalah pelabelan yang informatif dan komunikasi risiko yang dapat dipahami konsumen. Standar Codex untuk pelabelan pangan berlaku bagi semua pangan pra-kemas yang ditawarkan kepada konsumen dan dalam revisi 2024 secara eksplisit diperbarui untuk memperkuat pelabelan alergen, yang sangat relevan bagi kelompok konsumen rentan. Bukti tinjauan sistematis oleh Kelly et al. menunjukkan bahwa pelabelan gizi di bagian depan kemasan cenderung meningkatkan pemahaman konsumen tentang kualitas gizi pangan serta mendorong pilihan dan pembelian yang lebih sehat, dengan sistem interpretatif bekerja lebih baik dibandingkan label non-interpretatif. Namun, komunikasi risiko tidak cukup hanya menyajikan informasi; menurut Onyeaka, transparansi, keterlibatan publik, dan komunikasi lintas disiplin diperlukan agar hasil penilaian ilmiah dapat dipahami dan dipercaya oleh masyarakat. Dengan demikian, pelabelan dan komunikasi risiko harus dirancang bukan sekadar memenuhi kewajiban administratif, melainkan benar-benar membantu konsumen membuat keputusan yang lebih aman dan rasional.

Pada akhirnya, mitigasi risiko bagi konsumen tidak akan efektif tanpa edukasi berkelanjutan, regulasi yang kuat, dan pembagian peran yang jelas antara produsen dan pemerintah. WHO menegaskan bahwa pemerintah memiliki peran sentral dalam menyusun kebijakan berbasis bukti, membangun kerangka regulasi yang fleksibel namun berbasis risiko, serta memperkuat sistem pengendalian pangan nasional; pada saat yang sama, produsen dan

penjamah pangan memikul tanggung jawab yang semakin besar untuk menjamin keamanan produk, sementara konsumen perlu dibekali kemampuan menangani pangan secara aman, termasuk melalui pesan WHO *Five Keys to Safer Food*. Bukti sintesis oleh Berglund, Şimşek dan Feng menunjukkan bahwa program edukasi keamanan pangan berbasis daring dapat meningkatkan pengetahuan dan praktik, walaupun perubahan sikap sering kali lebih lemah dan memerlukan rancangan intervensi yang lebih baik. Hal ini mengindikasikan bahwa pendekatan preventif harus bekerja pada dua level sekaligus: memperbaiki sistem formal melalui regulasi, standar, dan pengawasan; serta memperkuat kapasitas perilaku konsumen melalui pendidikan yang relevan, sederhana, dan berulang. Karena itu, strategi mitigasi yang paling kuat adalah strategi yang menghubungkan kontrol teknis di sepanjang rantai produksi dengan literasi risiko pada pihak yang akhirnya mengonsumsi produk tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- Alawadhi, N., Abass, K., Khaled, R., Osaili, T.M. and Semerjian, L. (2024) 'Heavy metals in spices and herbs from worldwide markets: A systematic review and health risk assessment', *Environmental Pollution*, 364, 124999. doi: 10.1016/j.envpol.2024.124999.
- Asante-Duah, K. (2017) *Public Health Risk Assessment for Human Exposure to Chemicals*. 2nd edn. Dordrecht: Springer.
- Aven, T. (2020) *Risk Assessment: Theory, Methods, and Applications*. 2nd edn. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Awad, D.A., Masoud, H.A. and Hamad, A. (2024) 'Climate changes and food-borne pathogens: the impact on human health and mitigation strategy', *Climatic Change*, 177(6), Article 92. doi: 10.1007/s10584-024-03748-9.
- Bereda, G. (2025) 'Toxicological impacts and mitigation strategies of food contaminants: a global perspective and comprehensive narrative review', *Current Research in Toxicology*, 9, 100268. doi: 10.1016/j.crtox.2025.100268.
- Berglund, Z., Şimşek, Ş. and Feng, Y. (2024) 'Effectiveness of Online Food-Safety Educational Programs: A Systematic Review, Random-Effects Meta-Analysis, and Thematic Synthesis', *Foods*, 13(5), 794. doi: 10.3390/foods13050794.
- Bhilwadikar, T., Pounraj, S., Manivannan, S., Rastogi, N.K. and Negi, P.S. (2019) 'Decontamination of Microorganisms and Pesticides from Fresh Fruits and Vegetables: A Comprehensive Review from Common Household Processes to Modern Techniques', *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 18(4), pp. 1003–1038. doi: 10.1111/1541-4337.12453.
- Bonioli, M. and Bazzani, C. (2025) 'Consumer behaviour toward "smart" food labels: A systematic literature review using the Technology Acceptance Model', *Trends in Food Science & Technology*, 165, pp. 1–15.
- Chartres, N., Cooper, C.B., Bland, G., Pelch, K.E., Gandhi, S.A., BakenRa, A. and Woodruff, T.J. (2024) 'Effects of Microplastic Exposure on Human Digestive, Reproductive, and Respiratory Health: A Rapid Systematic Review', *Environmental Science & Technology*, 58(52). doi: 10.1021/acs.est.3c09524.
- Chaudhary, A., Sharma, R. and Vemireddy, V. (2024) 'Consumer perspectives on food traceability—A systematic literature review

- and future research agenda', *International Journal of Consumer Studies*, 48(6). doi: 10.1111/ijcs.13101.
- Codex Alimentarius Commission (2023) *General Principles of Food Hygiene (CXC 1-1969)*. Rome: FAO/WHO.
- Flinders, C., Barnhart, B., Morrison, E.B., Anderson, P.D. and Landis, W.G. (2025) 'Probabilistic approaches for risk assessment and regulatory criteria development: current applications, gaps, and opportunities', *Integrated Environmental Assessment and Management*, 21(6), pp. 1281–1292. doi: 10.1093/inteam/vjaf016.
- Gizaw, Z. (2019) 'Public health risks related to food safety issues in the food market: a systematic literature review', *Environmental Health and Preventive Medicine*, 24, Article 68. doi: 10.1186/s12199-019-0825-5.
- Jha, P.K., Hanin, A., Tiwari, B.K. and Dallagi, H. (2026) 'Microbial safety in cold-preserved foods: risks, regulatory gaps, and mitigation strategies', *Food Control*, 182, 111869. doi: 10.1016/j.foodcont.2025.111869.
- Kelly, B., Ng, S.H., Carrad, A. and Pettigrew, S. (2024) 'The Potential Effectiveness of Front-of-Pack Nutrition Labeling for Improving Population Diets', *Annual Review of Nutrition*, 44, pp. 405–440. doi: 10.1146/annurev-nutr-011224-030917.
- King, H. (2020) *Food Safety Management Systems: Achieving Active Managerial Control of Foodborne Illness Risk Factors in a Retail Food Service Business*. Cham: Springer. doi: 10.1007/978-3-030-44735-9.
- Lane, M.M. et al. (2024) 'Ultra-processed food exposure and adverse health outcomes: umbrella review of epidemiological meta-analyses', *BMJ*, 384, e077310. doi: 10.1136/bmj-2023-077310.
- Leung, A.S.Y., Estrada-Reyes, E., Goto, K., Huang, C.H., Li, J.M., Nagarajan, S.A., Ranasinghe, T., Sato, S., Srisuwatchari, W., Zepeda-Ortega, B. and Tham, E.H. (2025) 'Global trend of food-induced anaphylaxis: Up to date', *Pediatric Allergy and Immunology*, 36(12), e70246. doi: 10.1111/pai.70246.
- Li, W., Wu, Y., Du, L., Shang, X. and Shi, J. (2025) 'Hyperspectral Imaging for Foreign Matter Detection in Foods: Advances, Challenges, and Future Directions', *Foods*, 14(17), 3026. doi: 10.3390/foods14173026.

- McEntire, J. and Kennedy, A.W. (eds.) (2019) *Food Traceability: From Binders to Blockchain*. Cham: Springer. doi: 10.1007/978-3-030-10902-8.
- Munteanu, C. and Schwartz, B. (2022) 'The relationship between nutrition and the immune system', *Frontiers in Nutrition*, 9, 1082500. doi: 10.3389/fnut.2022.1082500.
- Njoagwuani, E.I., Onyeaka, H., Mazi, I.M., Akegbe, H., Oladunjoye, I.O., Ochulor, C.E., Omotosho, A.D., Odeyemi, O.A., Nwaiwu, O. and Tamasiga, P. (2023) 'Food safety in vulnerable populations: A perspective on the challenges and solutions', *The FASEB Journal*, 37(5), e22872. doi: 10.1096/fj.202201713R.
- Onyeaka, H. (2025) 'Risk communication in food safety: addressing the gap between scientific risk assessments and public perception, and strategies to improve transparency and trust in food safety regulations', *Food Safety and Risk*, 12(1), Article 7. doi: 10.1186/s40550-025-00116-y.
- Onyeaka, H. (2025) 'Risk communication in food safety: addressing the gap between scientific risk assessments and public perception, and strategies to improve transparency and trust in food safety regulations', *Food Safety and Risk*, 12(1), Article 7. doi: 10.1186/s40550-025-00116-y.
- Paoli, G.M., Hartnett, E. and Price, P.S. (2025) 'Use of probabilistic exposure models in the assessment of dietary exposure to chemicals', *Food Additives & Contaminants: Part A*, 42(7), pp. 819–848. doi: 10.1080/19440049.2025.2506104.
- Pekmezci, H., Sipahi, S. and Başaran, B. (2025) 'Health Risk Assessment of Dietary Chemical Exposures: A Comprehensive Review', *Foods*, 14(23), Article 4133. doi: 10.3390/foods14234133.
- Rini, L., Schouteten, J.J., Faber, I., Frøst, M.B., Perez-Cueto, F.J.A. and De Steur, H. (2024) 'Social media and food consumer behavior: A systematic review', *Trends in Food Science & Technology*, 143, 104290. doi: 10.1016/j.tifs.2023.104290.
- Röhrs, S., Rohn, S. and Pfeifer, Y. (2024) 'Risk Classification of Food Incidents Using a Risk Evaluation Matrix for Use in Artificial Intelligence-Supported Risk Identification', *Foods*, 13(22), 3675. doi: 10.3390/foods13223675.
- Stewart, A.G. and Hursthouse, A.S. (2018) 'Environment and Human Health: The Challenge of Uncertainty in Risk Assessment', *Geosciences*, 8(1), Article 24. doi: 10.3390/geosciences8010024.

- Taormina, P.J. and Hardin, M.D. (eds.) (2021) *Food Safety and Quality-Based Shelf Life of Perishable Foods*. Cham: Springer. doi: 10.1007/978-3-030-54375-4.
- Vergis, J., Pollumahanti, N., Sahu, R., Rawool, D.B. and Barbuddhe, S.B. (2025) 'Ensuring food safety: microbiological risk assessment strategies', *Current Opinion in Food Science*, 62, Article 101272. doi: 10.1016/j.cofs.2025.101272.
- Vitale, M., Costabile, G., Testa, R., D'Abbronzio, G., Nettore, I.C., Macchia, P.E. and Giacco, R. (2024) 'Ultra-Processed Foods and Human Health: A Systematic Review and Meta-Analysis of Prospective Cohort Studies', *Advances in Nutrition*, 15(1), 100121. doi: 10.1016/j.advnut.2023.09.009.
- Warren, C., Gupta, R., Seetasith, A., Schuldt, R., Wang, R., Iqbal, A., Gupta, S. and Casale, T.B. (2024) 'The clinical burden of food allergies: Insights from the Food Allergy Research & Education (FARE) Patient Registry', *World Allergy Organization Journal*, 17(3), 100889. doi: 10.1016/j.waojou.2024.100889.
- WHO (2022) *Pesticide residues in food*. Geneva: World Health Organization.
- WHO (2024) *Food safety*. Geneva: World Health Organization.
- Yang, M., Wang, Y., Yang, G., Wang, Y., Liu, F. and Chen, C. (2024) 'A review of cumulative risk assessment of multiple pesticide residues in food: Current status, approaches and future perspectives', *Trends in Food Science & Technology*, 144, Article 104340. doi: 10.1016/j.tifs.2024.104340.
- Zahir, A., Ge, Z. and Khan, I.A. (2025) 'Public Health Risks Associated with Food Process Contaminants – A Review', *Journal of Food Protection*, 88(2), 100426. doi: 10.1016/j.jfp.2024.100426.

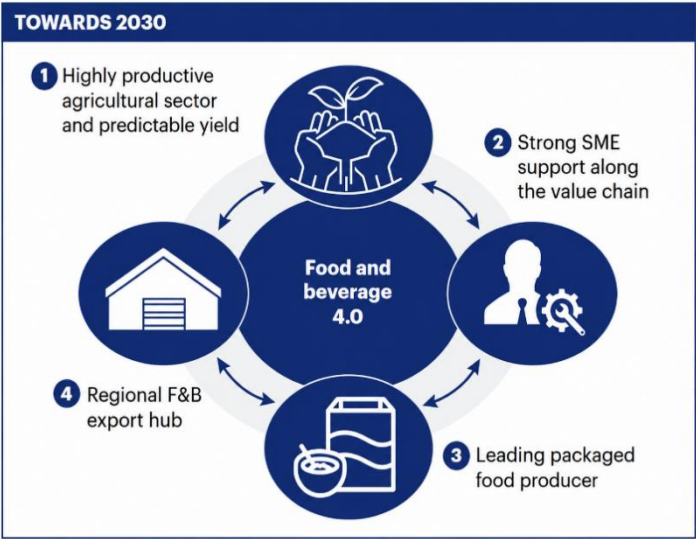
BAB 6

PERSPEKTIF INDUSTRI: IMPLEMENTASI NANOTEKNOLOGI DAN BIOTEKNOLOGI DI SEKTOR PANGAN

Industri pangan global saat ini berada pada titik balik transformasi teknologi yang sangat signifikan. Bab-bab sebelumnya telah membedah mekanisme molekuler dan teknis dari nanoteknologi serta bioteknologi. Pada bab ini akan dibahas tentang perspektif industri dalam melihat berbagai inovasi sebagai instrumen strategis untuk menjawab tantangan kedaulatan pangan. Pengembangan berbagai jenis bisnis dan industri pangan berbasis komoditas lokal perlu menjadi prioritas strategis (Mariyanto, 2025; Rosadi, 2023). Hal tersebut sejalan dengan Peta Jalan *Making Indonesia 4.0* yang menempatkan pembangunan industri manufaktur yang kokoh. Sektor pangan, yaitu makanan dan minuman (*Food and Beverage*) menjadi salah satu sektor utama penerapan awal dari teknologi (Gambar 6.1). Pengembangan sektor ini mentargetkan pembangunan industri makanan dan minuman *powerhouse* di tingkat ASEAN pada tahun 2030 (KemenperinRI, 2018).

Sektor industri pangan bukan hanya sekadar pelaksana produksi dari makanan dan minuman saja. Industri pangan harus menjadi jembatan kritis yang mengubah terobosan di meja laboratorium menjadi produk nyata yang aman, terjangkau, dan berkualitas di tangan konsumen. Penerapan nanoteknologi dan bioteknologi pada industri pangan sangat sesuai relevan dengan beberapa tujuan *Sustainable Development Goals* (SDGs), terutama SDG 2: *Zero Hunger* melalui peningkatan kualitas dan ketahanan

pangan, SDG 3: *Good Health and Well-being* dalam mendukung keamanan dan kesehatan pangan, SDG 9: *Industry, Innovation and Infrastructure* melalui penerapan inovasi teknologi pada industri pangan, serta SDG 12: *Responsible Consumption and Production* yang berkaitan dengan produksi pangan berkelanjutan dan efisiensi pengolahan (Alisjahbana dan Murniningtyas, 2018).



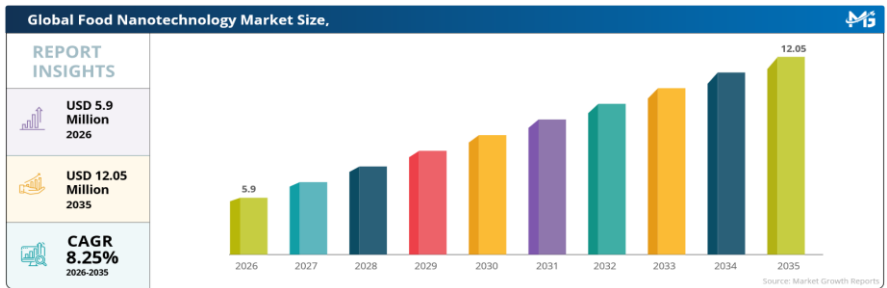
Gambar 6.1. Pengembangan sektor makanan dan minuman pada Peta Jalan *Making Indonesia 4.0* pada tahun 2030
(Sumber : Kemenperin RI, 2018)

Urgensi adopsi nanoteknologi dan bioteknologi dalam industri pangan didorong oleh proyeksi kebutuhan makronutrien global yang diperkirakan akan meningkat drastis pada tahun 2050 seiring pertumbuhan populasi dunia yang mencapai 9 miliar jiwa (Food and Agriculture Organization, 2025; Jafarizadeh-malmiri *et al.*, 2019). Dalam konteks ini, efisiensi konvensional tidak lagi mencukupi. Industri memerlukan teknologi yang mampu merombak seluruh rantai pasok dari hulu ke hilir (*farm-to-plate*), meminimalkan limbah, dan memperpanjang masa simpan produk tanpa merusak nilai gizinya (Eden *et al.*, 2025). Integrasi nanoteknologi dalam pemrosesan dan pengemasan, yang dipadukan dengan teknik bioteknologi modern seperti pemanfaatan enzim amobil, telah

menciptakan kategori baru dalam industri yang dikenal sebagai pangan berbasis teknologi tinggi (Jabeen *et al.*, 2023; Putra *et al.*, 2025). Transformasi ini menuntut industri pangan untuk beralih dari praktik padat karya menuju ekosistem berbasis pengetahuan (*knowledge-based ecosystem*), di mana keamanan produk dan kepercayaan konsumen menjadi parameter utama dalam persaingan global (Ahmad *et al.*, 2025). Bab ini akan menutup buku dengan memberikan kontribusi strategis dalam mendukung pengembangan industri pangan modern yang inovatif, aman, dan berkelanjutan.

6.1 Lanskap Pasar dan Potensi Ekonomi Global

Implementasi nanoteknologi dan bioteknologi bukan lagi sekadar tren riset, melainkan mesin pertumbuhan ekonomi baru. Nilai pasar global untuk produk-produk yang memanfaatkan nanoteknologi terus menunjukkan tren kenaikan yang eksponensial. Perkembangan keseluruhan pasar global pangan berbasis nanoteknologi (*nanofood*) diperkirakan akan terus meningkat seiring perkembangan riset nanoteknologi (Dwivedi *et al.*, 2026; Jafarizadeh-malmiri *et al.*, 2019). Berdasarkan data *Market Growth Reports* (Gambar 6.2), pasar *nanofood* telah tumbuh sebesar USD 5,9 miliar pada tahun 2026 dan diperkirakan tumbuh menuju USD 12,05 miliar dengan tingkat pertumbuhan tahunan (CAGR) sebesar 8,25% pada tahun 2035 (Market Growth Reports, 2026). Peningkatan nilai pasar tersebut menunjukkan bahwa nanoteknologi dan bioteknologi telah menjadi pendorong transformasi industri pangan global.



Gambar 6.2. Perkiraan perkembangan pasar *nanofood* global sampai tahun 2035
(Sumber : Market Growth Reports, 2026)

Lanskap pasar ini digerakkan oleh tiga sektor utama yang paling responsif terhadap inovasi:

1. Sektor pengemasan aktif dan cerdas (*active and smart packaging*)
Industri melihat peluang besar dalam pengurangan biaya logistik melalui perpanjangan masa simpan produk dan sistem deteksi kerusakan pangan secara *real-time* (Eden et al., 2025).
2. Sektor pangan fungsional dan suplemen (*nutraceuticals*)
Penggunaan nano-enkapsulasi untuk meningkatkan penyerapan vitamin dan mineral menarik minat produsen besar untuk menciptakan produk kesehatan premium yang lebih efektif (Lugani et al., 2021).
3. Sektor keamanan pangan
Pemanfaatan *nanosensor* untuk deteksi patogen secara cepat menjadi fokus investasi bagi perusahaan besar guna menghindari risiko penarikan produk (*product recall*) yang merugikan secara finansial (Lugani et al., 2021).

Saat ini, diperkirakan lebih dari 400 perusahaan di seluruh dunia telah mengintegrasikan nanoteknologi ke dalam operasional mereka (Jafarizadeh-malmiri et al., 2019). Meskipun pasar global masih didominasi oleh pemain dari Amerika Serikat dan Uni Eropa, kawasan Asia menunjukkan akselerasi yang signifikan melalui investasi besar dalam riset biosintesis nanomaterial yang lebih efisien biaya dan ramah lingkungan (Bhattacharya, 2015; Salamanca-buentello et al., 2005).

6.2 Transisi Teknologi Laboratorium ke Industri

Salah satu tantangan terbesar dalam implementasi nanoteknologi dan bioteknologi di sektor pangan bukanlah pada penemuan inovasinya, melainkan pada aspek skalabilitas. Transisi dari skala laboratorium yang menggunakan satuan mililiter atau gram menuju skala industri yang membutuhkan satuan tonase sering kali menghadapi kendala teknis dan ekonomi yang kompleks. Industri tidak hanya menuntut efektivitas fungsional, tetapi juga reproduisibilitas (kemampuan menghasilkan kualitas yang sama secara berulang) dan efisiensi biaya produksi (Jafarizadeh-malmiri et al., 2019). Ketidakmampuan dalam mengelola fase krusial ini sering

kali menyebabkan inovasi hebat terhenti hanya pada tahap prototipe. Fenomena dalam manajemen inovasi tersebut dikenal sebagai *The Valley of Death* (Gbadegeshin *et al.*, 2022). Agar terobosan nanoteknologi dan bioteknologi yang telah dibahas pada bab-bab sebelumnya dapat memberikan dampak ekonomi dan sosial yang nyata, sektor industri perlu melakukan rekayasa ulang pada skalabilitas operasional, kontrol kualitas, dan hilirisasi.

6.2.1 Tantangan Skalabilitas Produksi

Dalam skala laboratorium, pembuatan nanomaterial sering kali menggunakan metode yang sangat presisi. Hal tersebut seringkali sulit untuk diperbesar kapasitasnya secara linier. Sebagai contoh, teknik nanolitografi yang menghasilkan partikel satu dimensi sangat akurat namun dinilai terlalu mahal untuk diaplikasikan dalam produksi massal kemasan pangan (Lugani *et al.*, 2021). Contoh lain pada skala laboratorium, peneliti bisa membuat emulsi nano (seperti mikrokapsul vitamin atau omega-3) berukuran <100 nm dengan stabil. Namun, saat memproduksi ribuan liter, sulit untuk menjaga ukuran partikel tetap seragam. Ukuran yang tidak seragam tersebut mengurangi efektivitas, mengubah rasa, atau membuat bahan aktif terdegradasi lebih cepat (Ahmad *et al.*, 2025). Kunci keberhasilan transisi ini terletak pada optimasi rekayasa proses dan pemilihan metode manufaktur kontinu yang mampu menyeimbangkan antara presisi teknis laboratorium dengan efisiensi biaya pada volume produksi skala besar.

6.2.2 Standarisasi dan Kontrol Kualitas

Menjaga konsistensi parameter nanomaterial, seperti distribusi ukuran partikel dan stabilitas material, dalam volume produksi yang besar adalah tantangan manajemen mutu yang nyata. Variasi kecil dalam suhu atau kecepatan pengadukan pada bioreaktor skala industri dapat mengubah sifat fisik produk akhir, yang pada gilirannya memengaruhi keamanan pangan. Oleh karena itu, industri memerlukan integrasi sensor pemantauan *real-time* di sepanjang lini produksi untuk memastikan setiap *batch* memenuhi standar keamanan yang ketat sebelum diedarkan (Eden *et al.*, 2025). Regulasi mutu pada industri nanoteknologi dan bioteknologi pangan, utamanya di Indonesia, berfokus pada pemastian keamanan

konsumen melalui pendekatan berbasis risiko. Dengan demikian, industri pangan perlu tetap memenuhi regulasi yang berlaku seperti UU No. 18 Tahun 2012 tentang Pangan, Peraturan BPOM Nomor 19 Tahun 2024 tentang Pengawasan Pangan Produk Rekayasa Genetik, pedoman penerapan GMP (*Good Manufacturing Practices*), dokumen HACCP (*Hazard Analysis Critical Control Point*), ISO 22000: 2018 tentang *Food Safety Management*, serta berbagai regulasi nasional dan internasional lainnya (Sudibyo dan Djumarman, 2008; Allan *et al.*, 2021). Kepatuhan industri terhadap regulasi menjadi prasyarat krusial guna memperkuat daya saing dan memastikan keberterimaan produk inovatif berbasis nanoteknologi dan bioteknologi di pasar.

6.2.3 Strategi Hilirisasi

Hilirisasi pangan ditujukan untuk memperkuat pembangunan ekonomi yang berkelanjutan. Strategi utama hilirisasi sektor industri pangan adalah mendorong peningkatan nilai tambah, inklusivitas, dan ketahanan pangan melalui pendekatan teknologi (ISEI, 2024). Keputusan industri untuk mengadopsi nanoteknologi dan bioteknologi sangat bergantung pada kemudahan integrasi dengan infrastruktur yang sudah ada. Metode biosintesis atau *Green Synthesis* kini menjadi primadona industri karena dinilai lebih ramah lingkungan, minim residu bahan kimia beracun, dan sering kali lebih hemat energi dibandingkan penggunaan berbagai metode fisik-kimia konvensional (Jafarizadeh-malmiri *et al.*, 2019; Lugani *et al.*, 2021). Penerapan inovasi nanoteknologi umumnya difokuskan pada upaya peningkatan kualitas, fungsionalitas, dan stabilitas produk pangan. Sementara itu, bioteknologi lebih ditujukan untuk menghasilkan produk pangan baru, meningkatkan keamanan, dan efisiensi produksi. Langkah-langkah yang perlu ditempuh antara lain perbaikan faktor produksi, mengatasi kesenjangan regulasi, dan promosi perdagangan produk hasil industri pangan (ISEI, 2024).

6.3 Analisis Biaya-Manfaat dan Nilai Tambah

Biaya manufaktur dan produksi nanoteknologi masih tergolong tinggi untuk implementasi skala industri. Adopsi nanoteknologi dan bioteknologi pada industri pangan tidak hanya

didasarkan pada keunggulan saintifik, tetapi juga pada kalkulasi ekonomi yang ketat (Singh *et al.*, 2023). Analisis biaya-manfaat (*Cost-Benefit Analysis*) menjadi instrumen penentu bagi perusahaan dalam mengevaluasi kemampuan efisiensi jangka panjang untuk mengompensasi risiko investasi awal yang besar. Industri harus melihat teknologi bukan sebagai biaya tambahan (*cost center*), melainkan sebagai investasi strategis yang menciptakan nilai tambah (*value-added*) dan keunggulan kompetitif di pasar global (Jafarizadeh-malmiri *et al.*, 2019). Evaluasi industri perlu difokuskan pada dua dimensi ekonomi utama untuk memahami alur inovasi teknologi agar dapat memberikan keuntungan finansial yang berkelanjutan. Dimensi pertama menyangkut rekayasa struktur biaya internal perusahaan dan dimensi kedua berfokus pada transformasi karakteristik produk.

6.3.1 Struktur Biaya

Implementasi nanoteknologi dan bioteknologi, termasuk pada sektor pangan, membutuhkan belanja modal (*Capital Expenditure* atau CAPEX) yang tinggi di awal, terutama untuk pengadaan mesin pemrosesan skala nano seperti *high-pressure homogenizers*, alat *electrospinning*, atau bioreaktor canggih untuk produksi enzim (Lugani *et al.*, 2021). Namun, secara operasional (*Operating Expenditure* atau OPEX), teknologi ini menawarkan penghematan yang signifikan. Sebagai contoh, penggunaan kemasan aktif berbasis nanopartikel perak (AgNPs) atau nanokomposit lempung (*nanoclay*) dapat memperpanjang masa simpan produk secara signifikan, yang secara langsung mengurangi kerugian akibat kerusakan pangan (*food waste*) selama distribusi (Eden *et al.*, 2025). Setidaknya USD 1 triliun kerugian akibat *food loss and waste* dapat dihemat dengan penggunaan nanoteknologi dan bioteknologi pada industri pangan (United Nations Framework Convention on Climate Change, 2024).

6.3.2 Penciptaan Nilai Tambah Produk

Nilai tambah yang dihasilkan dari integrasi teknologi ini memungkinkan industri untuk memosisikan produk mereka di segmen pasar premium. Melalui nano-enkapsulasi, produsen dapat menjamin bioavailabilitas nutrisi yang lebih tinggi, memberikan perlindungan terhadap degradasi zat aktif, dan melakukan pelepasan

nutrisi terkendali dalam tubuh. Hal-hal tersebut tidak mungkin dicapai dengan metode konvensional (Eden *et al.*, 2025; Lugani *et al.*, 2021). Nilai tambah juga diperoleh dari manfaat kesehatan yang ditawarkan kepada konsumen. Berbagai pangan fungsional dapat dihasilkan melalui penerapan nanoteknologi dan bioteknologi berskala industri. Teknologi *nanocoating* juga terbukti meningkatkan nilai tambah karena ketahanan produk pangan dari mikroorganisme perusak pangan. Deteksi pangan berbasis molekuler pada produk pangan juga meningkatkan kepercayaan konsumen terkait keamanan pangan dari produk tersebut (Shweta *et al.*, 2025).

Di sisi industri, penggunaan *nanosensor* pada *smart packaging* memberikan nilai tambah berupa "jaminan kesegaran" bagi konsumen, sehingga mengurangi risiko hukum akibat keracunan pangan. Pemanfaatan kembali limbah industri pangan juga menjadi tren yang turut meningkatkan efisiensi produksi dan menguntungkan bagi industri. Berbagai jenis limbah organik yang dihasilkan dari pengolahan pangan dapat dimanfaatkan kembali menjadi bahan baku bernilai tambah, seperti nanopartikel, bioplastik, bioaktif fungsional, biofertilizer, bioenergi, serta bahan pengemas ramah lingkungan. Hal tersebut mendukung konsep ekonomi sirkular dan mengurangi beban lingkungan akibat pembuangan limbah. Di samping itu, industri akan diuntungkan karena dapat memenuhi standar regulasi pengolahan limbah industri pangan yang aman bagi lingkungan (Borah *et al.*, 2023; Betoret *et al.*, 2024).

6.4 Ekosistem Inovasi

Keberhasilan implementasi nanoteknologi dan bioteknologi di sektor pangan sangat bergantung pada ketersediaan ekosistem inovasi yang dinamis. Mengingat kompleksitas teknis dan tingginya biaya riset di bidang ini, inovasi tidak dapat lagi dilakukan secara terisolasi oleh satu perusahaan saja. Industri membutuhkan aliran pengetahuan yang kontinu dari institusi riset, dukungan regulasi yang adaptif dari pemerintah, dan infrastruktur manufaktur yang memadai untuk mengubah prototipe menjadi komoditas pasar (Jafarizadeh-malmiri *et al.*, 2019). Untuk menciptakan ekosistem yang tangguh, paradigma kolaborasi harus bergeser dari

hubungan transaksional menjadi kemitraan strategis yang terintegrasi. Hal ini secara efektif dapat diwujudkan melalui model kolaborasi *Pentahelix*, yang menyinergikan peran pemangku kepentingan utama melalui dua pilar strategi pengembangan sebagai berikut:

6.4.1 Sinergi *Penta Helix*

Model kolaborasi *Pentahelix* atau ABCGM (*Academics, Business, Community, Government, and Media*) merupakan kolaborasi yang perlu dikembangkan untuk mendorong inovasi di bidang nanoteknologi dan bioteknologi pangan. Keterlibatan akademisi, pelaku usaha, komunitas, pemerintah, dan media secara sinergis memungkinkan peningkatan kualitas produk pangan dan percepatan komersialisasi teknologi baru yang bermanfaat bagi industri dan masyarakat (Ansari, 2023; Ramadhana, 2021). Melalui kolaborasi ini, setiap unsur dapat memberikan kontribusi sesuai dengan kapasitas dan perannya masing-masing dalam mendukung pengembangan, implementasi, serta diseminasi inovasi teknologi pangan.

Masing-masing unsur dalam *Pentahelix* memiliki peran dalam membangun kerangka inovasi nanoteknologi dan bioteknologi pangan (Gambar 6.3). Kolaborasi yang sinergis meminimalkan risiko kegagalan pasar dan mempercepat waktu suatu produk dari tahap invensi di laboratorium hingga tersedia di tangan konsumen (Eden et al., 2025). Kerja sama yang terintegrasi memungkinkan identifikasi kebutuhan pasar dilakukan sejak tahap awal pengembangan teknologi sehingga inovasi yang dihasilkan lebih sesuai dengan kebutuhan pengguna. Pendekatan ini juga mendukung proses hilirisasi hasil penelitian dan peningkatan kepercayaan masyarakat sekaligus membangun ekosistem inovasi yang berkelanjutan (Fitriani et al., 2020; Wicaksono et al., 2023; Alfianto, 2025; Sukarli et al., 2025).



Gambar 6.3. Peta kolaborasi Pentahelix
(Sumber : Wicaksono *et al.*, 2023; Alfianto, 2025)

Peran utama setiap unsur dalam kerangka *Pentahelix* (ABCGM) antara lain:

1. Unsur *Academics* (Akademisi Perguruan Tinggi/Lembaga Riset) berperan melakukan penelitian dasar mengenai nanoenkapsulasi, nanoemulsi, dan pengembangan pangan fungsional yang menjadi landasan ilmiah bagi kemajuan teknologi pangan.
2. Unsur *Business* (Pelaku Usaha/Industri) bertanggung jawab mengimplementasikan dan mengomersialisasikan teknologi, termasuk penerapan nanoteknologi untuk meningkatkan efisiensi proses pengolahan pangan, pengemasan cerdas, dan keamanan produk.
3. Unsur *Community* (Komunitas/Petani/Konsumen) berpartisipasi aktif dalam adopsi teknologi pertanian baru, seperti pupuk pintar (*smart fertilizer*), serta memberikan umpan balik terkait kualitas, keamanan, dan penerimaan produk pangan.
4. Unsur *Government* (Pemerintah) berfungsi sebagai fasilitator melalui penyusunan regulasi, standar keamanan, serta kebijakan yang mendukung inovasi di bidang bioteknologi pangan sekaligus menjamin perlindungan konsumen.

5. Unsur Media Berperan dalam menyebarkan informasi dan meningkatkan kesadaran publik mengenai manfaat, keamanan, dan perkembangan nanoteknologi dalam sektor pangan.

6.4.2 Strategi *Start-up* dan Manajemen Kekayaan Intelektual

Start-up (perusahaan rintisan) sering kali berperan sebagai jembatan yang mengambil risiko teknologi di tahap awal sebelum akhirnya bermitra dengan industri besar untuk skala produksi yang lebih luas. Perkembangan nanoteknologi dan bioteknologi telah membuka peluang besar bagi munculnya startup inovatif yang mampu menghasilkan solusi baru di sektor pangan. Berbagai hasil penelitian pangan fungsional, nanoenkapsulasi senyawa bioaktif, kemasan cerdas (*smart packaging*), biosensor keamanan pangan, hingga teknologi produksi yang lebih berkelanjutan menjadi dasar perintisan *start-up* teknologi pangan. Ekosistem inovasi yang kuat sangat diperlukan untuk mendukung pertumbuhan *start-up* tersebut melalui sinergi *Pentahelix*. Komponen utama ekosistem ini meliputi ketersediaan pendanaan, dukungan kelembagaan, kebijakan yang mendorong inovasi, perlindungan Hak Kekayaan Intelektual, dan mekanisme transfer teknologi yang efektif dari laboratorium menuju pasar. Selain itu, pengembangan model bisnis yang adaptif dan berorientasi pada kebutuhan industri menjadi faktor penting dalam meningkatkan keberhasilan komersialisasi teknologi pangan berbasis nanoteknologi dan bioteknologi (Bora, 2025; Lodhi *et al.*, 2025).

Di sisi lain, meningkatnya minat investor terhadap sektor bioteknologi dan nanoteknologi menunjukkan bahwa peluang pengembangan *start-up* teknologi pangan semakin terbuka. Tren investasi global memperlihatkan peningkatan aliran modal pada perusahaan rintisan berbasis teknologi maju, didukung oleh pertumbuhan riset, paten hasil penelitian, serta integrasi teknologi digital seperti kecerdasan buatan (*artificial intelligence*) yang berpotensi menghasilkan inovasi disruptif. Strategi penguatan ekosistem *start-up* teknologi pangan tidak hanya berfokus pada pengembangan produk tunggal, tetapi juga pada pembangunan *platform* teknologi yang dapat diaplikasikan pada berbagai subsektor

pangan sehingga memiliki nilai komersial yang lebih luas. Namun demikian, tingginya kebutuhan modal, kompleksitas regulasi, isu etika, dan panjangnya proses hilirisasi masih menjadi tantangan utama yang perlu diatasi melalui kolaborasi *Pentahelix*. Dengan strategi tersebut, startup nanoteknologi dan bioteknologi pangan dapat berkembang lebih kompetitif, mempercepat adopsi teknologi, dan memberikan kontribusi terhadap ketahanan pangan serta pembangunan bioekonomi yang berkelanjutan (Bora, 2025; Lodhi *et al.*, 2025; Samudra *et al.*, 2025).

Hak Kekayaan Intelektual (HaKI) atau *Intellectual Property Rights* (IPR) berupa paten hasil penelitian juga merupakan aset strategis dalam industri pangan berbasis teknologi tinggi. Manajemen paten yang efektif memungkinkan universitas atau lembaga riset untuk melisensikan penemuan mereka kepada perusahaan teknologi yang sudah mapan atau mulai mendirikan *start-up* dalam melakukan validasi pasar (Jafarizadeh-malmiri *et al.*, 2019). HKI merupakan elemen penting dalam ekosistem inovasi nanoteknologi dan bioteknologi pangan karena mampu melindungi hasil penelitian, mendorong investasi penelitian dan pengembangan, serta mempercepat komersialisasi teknologi. Dalam sektor pangan, HKI mencakup perlindungan terhadap teknologi proses, formulasi produk, material nano, merek, dan indikasi geografis yang mendukung peningkatan kualitas, keamanan, dan daya saing produk. Selain itu, harmonisasi antara sistem HKI dan regulasi keamanan pangan diperlukan agar perlindungan inovasi tetap sejalan dengan kepentingan publik dan standar keamanan yang berlaku (Bhurat *et al.*, 2025).

Sementara itu, penerapan HKI yang terlalu ketat dapat menjadi hambatan bagi *start-up* dan pelaku usaha kecil karena tingginya biaya perlindungan, kompleksitas regulasi, serta keterbatasan akses terhadap pengetahuan dan teknologi. Pengelolaan HKI yang seimbang antara perlindungan inovasi dan akses teknologi perlu diperkuat melalui kemitraan publik-swasta, peningkatan kapasitas manajemen HKI, dan kebijakan pemerintah yang adaptif terhadap perkembangan teknologi. Pendekatan ini dapat mendukung terciptanya ekosistem inovasi yang inklusif, kompetitif, dan

berkontribusi pada pembangunan berkelanjutan serta ketahanan pangan (Sultana, 2024; Chikhaoui dan Hussein, 2025).

6.5 Mitigasi Risiko dan Kepatuhan Industri

Setelah ekosistem inovasi terbentuk, tantangan selanjutnya bagi industri adalah memastikan bahwa operasional mereka berjalan dalam koridor keamanan yang ketat. Penerapan nanoteknologi dan bioteknologi dalam industri pangan tidak hanya menawarkan berbagai manfaat, tetapi juga menimbulkan berbagai tantangan terkait keselamatan, kesehatan, dan lingkungan. Hal tersebut harus dimulai dari kepatuhan industri terhadap regulasi yang memerlukan pendekatan mitigasi risiko yang komprehensif. Mitigasi risiko bukan hanya soal memenuhi kewajiban hukum, tetapi juga merupakan bagian dari manajemen reputasi merek. Industri harus proaktif dalam menyikapi potensi bahaya seperti migrasi nanomaterial ke dalam produk pangan atau akumulasi partikel nano di lingkungan kerja (Lugani et al., 2021). Untuk menjaga keseimbangan antara inovasi dan keamanan, industri perlu mengadopsi kerangka kerja kepatuhan (*compliance*) yang dirancang dengan cermat. Sistem penilaian risiko perlu diterapkan dengan ketat untuk memantau aspek keamanan pangan seperti karakterisasi nanomaterial, evaluasi toksisitas, studi migrasi dari kemasan pangan, perilaku nanomaterial selama proses pencernaan, serta potensi bioakumulasi dalam jaringan tubuh. Selain itu, transparansi informasi, pelabelan produk yang jelas, pemantauan lingkungan, dan pengembangan metode analisis yang akurat menjadi aspek penting untuk meningkatkan kepercayaan konsumen sekaligus memastikan keamanan produk pangan berbasis nanoteknologi dan bioteknologi (Rouhi et al., 2022; Singh dan Kumar, 2023; Ghosh dan Kumar, 2024).

Dari perspektif kepatuhan industri, pengembangan kerangka regulasi yang adaptif dan berbasis sains menjadi faktor kunci dalam mendukung komersialisasi teknologi secara bertanggung jawab. Regulasi perlu mencakup standar keamanan, metode pengujian yang terharmonisasi, prosedur evaluasi risiko, perlindungan hak kekayaan intelektual, serta pertimbangan etika dan sosial dalam proses pengambilan keputusan. Mengingat masih tingginya ketidakpastian ilmiah terkait dampak jangka panjang nanomaterial,

pendekatan manajemen risiko yang bersifat bertahap, kolaboratif, dan fleksibel lebih relevan dibandingkan pendekatan regulasi yang kaku. Keterlibatan pemerintah, akademisi, industri, dan masyarakat dalam proses pengawasan juga diperlukan untuk memastikan bahwa inovasi yang dihasilkan tidak hanya memenuhi aspek teknis dan ekonomi, tetapi juga selaras dengan prinsip keselamatan, keadilan, transparansi, dan keberlanjutan. Dengan demikian, strategi mitigasi risiko dan kepatuhan industri yang efektif dapat mempercepat adopsi nanoteknologi dan bioteknologi pangan sekaligus meminimalkan potensi dampak negatif bagi konsumen maupun lingkungan (Kuzma dan Besley, 2008; Marchant *et al.*, 2008; Ghosh dan Kumar, 2024).

Strategi pengawasan terhadap standar nasional dan internasional sekaligus penerapan teknologi pemantauan internal yang mencakup tiga aspek utama, yaitu respons terhadap regulasi terkait yang berlaku, keamanan operasional di lingkungan kerja, dan penerapan manajemen mutu berbasis teknologi. Pelaku usaha harus terus menyelaraskan operasional mereka dengan standar dari otoritas keamanan pangan seperti FDA (Amerika Serikat), EFSA (Uni Eropa), atau Peraturan BPOM (Indonesia) yang kini mulai mewajibkan pelabelan khusus untuk produk pangan hasil nanoteknologi dan bioteknologi. Kepatuhan ini krusial untuk memastikan akses ke pasar ekspor (Jafarizadeh-malmiri *et al.*, 2019). Sementara itu, perlindungan terhadap pekerja industri perlu menjadi prioritas. Industri perlu menerapkan prosedur penanganan material (SOP) yang ketat guna meminimalkan risiko paparan melalui inhalasi atau kontak kulit. Deteksi kontaminan kini juga dapat dilakukan secara *real-time* menggunakan nanobiosensor. Industri dapat mengintegrasikan teknologi ini ke dalam sistem *Quality Control* (QC) mereka untuk mendeteksi patogen seperti *Salmonella* atau *E. coli* sebelum produk keluar dari pabrik (Eden *et al.*, 2025; Lugani *et al.*, 2021).

6.6 Penerimaan Konsumen

Pada akhirnya, keberhasilan komersialisasi teknologi ini ditentukan di rak supermarket oleh konsumen. Meskipun nanoteknologi dan bioteknologi menawarkan manfaat besar dalam

meningkatkan fungsi zat gizi atau memperpanjang kesegaran produk, tantangan "neofobia" atau ketakutan terhadap teknologi baru tetap ada di masyarakat. Persepsi publik terhadap keamanan pangan sering kali dipengaruhi oleh tingkat transparansi industri dalam menyajikan informasi produk (Jafarizadeh-malmiri et al., 2019). Hal tersebut juga menjadi salah satu faktor penentu keberhasilan adopsi nanoteknologi dan bioteknologi dalam industri pangan. Ketidakpastian mengenai manfaat dan risiko nanoteknologi dan Produk Rekayasa Genetika (PRG) dalam pangan sering kali memicu perdebatan publik (Grobe dan Rissanen, 2012). Tingkat penerimaan konsumen dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk pengetahuan sains, persepsi risiko dan manfaat, preferensi terhadap produk alami, serta informasi yang diperoleh melalui media massa dan media digital (Chuah *et al.*, 2018). Kekhawatiran konsumen terhadap dampak produk pangan berbasis nanoteknologi dan bioteknologi bagi kesehatan manusia serta perlindungan hewan, tumbuhan, dan lingkungan tetap memengaruhi sikap konsumen terhadap penerimaan produk (Frewer *et al.*, 2014).

Membangun kepercayaan publik memerlukan pendekatan komunikasi yang lebih dari sekadar pemasaran konvensional. Industri harus bertransformasi menjadi komunikator sains yang mampu mengedukasi pasar. Transparansi informasi, pelabelan produk yang jelas, komunikasi risiko yang efektif, serta keterlibatan aktif peneliti, industri, dan regulator menjadi strategi penting untuk membangun kepercayaan publik dan meningkatkan penerimaan terhadap produk pangan berbasis nanoteknologi dan bioteknologi (Chuah *et al.*, 2018; Grobe & Rissanen, 2012). Industri perlu menyampaikan manfaat nyata teknologi secara jujur, misalnya bagaimana nano-bioteknologi mampu mengurangi penggunaan bahan pengawet kimia berbahaya melalui sistem enkapsulasi yang lebih stabil. Kampanye edukasi harus menyoroti nilai keberlanjutan dan kesehatan konsumen (Eden *et al.*, 2025). Kejujuran dalam pelabelan bukan hanya sekedar prosedur tuntutan regulasi, tetapi juga perlu dipandang sebagai alat untuk membangun loyalitas. Perusahaan yang terbuka mengenai penggunaan teknologi dan menjamin keamanan produknya cenderung memenangkan

kepercayaan jangka panjang dari konsumen yang kini semakin kritis (Jafarizadeh-malmiri *et al.*, 2019).

6.7 Integrasi Ekonomi Sirkular Keberlanjutan

Transformasi industri pangan ke depan tidak hanya diukur dari efisiensi produksi, tetapi juga dari kontribusinya terhadap kelestarian lingkungan. Implementasi nanoteknologi dan bioteknologi telah membuka jalan bagi paradigma baru yang dikenal sebagai Ekonomi Sirkular (*Circular Economy*). Dalam model ini, limbah tidak lagi dipandang sebagai residu yang membebani biaya operasional, melainkan sebagai sumber daya mentah bernilai tinggi yang dapat diolah kembali menjadi komponen fungsional melalui rekayasa teknologi (Eden *et al.*, 2025). Peta jalan (*roadmap*) industri pangan masa depan akan sangat bergantung pada kemampuan sektor manufaktur dalam menyintesis inovasi hijau dengan efisiensi industri (Gambar 6.4). Industri kini mulai beralih memanfaatkan produk sampingan pertanian sebagai bahan baku kemasan biodegradable, agen enkapsulasi, bahkan bioenergi (Jafarizadeh-malmiri *et al.*, 2019; Lugani *et al.*, 2021; Saxena, 2023).



Gambar 6.4. Konsep Ekonomi Sirkular
(Sumber : United Nations Industrial Development Organization, 2017)

Optimalisasi limbah agro-industri menjadi berbagai bahan baku maupun bahan tambahan semakin luas diterapkan. Strategi ini tidak hanya menekan biaya bahan baku, tetapi juga menurunkan jejak karbon industri secara signifikan. Pemanfaatan sumber daya secara efisien melalui pengurangan limbah, penggunaan kembali material, dan konversi produk samping menjadi produk bernilai tambah semakin diminati oleh industri pangan. Pendekatan ini didukung oleh pengembangan berbagai jenis biomaterial (bahkan bionanomaterial) dari limbah organik yang dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan energi terbarukan maupun produk fungsional bernilai ekonomi tinggi. Dalam konteks industri pangan, berbagai limbah agroindustri dan sisa pangan dapat diolah melalui proses bioteknologi menjadi bioplastik, bioenergi, biomaterial, dan senyawa bioaktif yang mendukung regenerasi sumber daya dan mengurangi ketergantungan pada bahan baku fosil (Marques *et al.*, 2025).

Prinsip ekonomi sirkular yang menekankan *reduce, reuse, dan recycle* (3R) ternyata mampu menekan timbulan limbah dan dampak lingkungan sekaligus menciptakan nilai ekonomi baru melalui pemanfaatan kembali material dalam rantai produksi (Valavanidis, 2018). Integrasi nanoteknologi dan bioteknologi dalam kerangka ekonomi sirkular menjadi strategi penting untuk mewujudkan sistem pangan yang lebih berkelanjutan, efisien, dan berdaya saing di masa depan. Berbagai metode nanoteknologi dan bioteknologi tidak hanya dimanfaatkan untuk membuat produk, tetapi juga dapat diarahkan untuk mengolah limbah industri pangan. Visi industri pangan cerdas dan berkelanjutan (*Smart and Sustainable Food Industry*) perlu terus dikampanyekan. Industri pangan masa depan akan menggunakan konsep penerapan teknologi ini untuk memastikan bahwa setiap unit pangan yang diproduksi memiliki keamanan yang terverifikasi secara otomatis, masa simpan yang optimal, dan dampak lingkungan yang minimal (Eden *et al.*, 2025).

6.8 Penutup

Sebagai bab penutup dari buku kolaborasi ini, perspektif industri berfungsi untuk merekatkan seluruh kepingan inovasi nanoteknologi dan bioteknologi menjadi satu kesatuan strategi yang aplikatif. Melalui pembahasan yang mencakup dasar-dasar teknologi,

peluang komersialisasi, pengelolaan hak kekayaan intelektual, mitigasi risiko, hingga aspek regulasi, satu pesan utama yang muncul adalah bahwa teknologi sehebat apa pun tidak akan memberikan dampak sosial yang nyata apabila tidak mampu menembus dinding komersialisasi industri secara efektif, aman, dan berkelanjutan. Oleh karena itu, keberhasilan implementasi nano-bioteknologi tidak hanya ditentukan oleh keunggulan ilmiahnya, tetapi juga oleh kemampuan berbagai pemangku kepentingan dalam membangun ekosistem inovasi yang mendukung adopsi teknologi di tingkat industri.

Implementasi teknologi pada sektor pangan bukan sekadar upaya meningkatkan profitabilitas, melainkan juga langkah strategis untuk membangun fondasi kedaulatan pangan yang tangguh. Dengan memperpendek kesenjangan antara penemuan di laboratorium dan kebutuhan konsumen, industri dapat berkontribusi dalam menciptakan sistem pangan yang lebih inklusif, sehat, dan berkelanjutan. Masa depan pangan dunia sangat bergantung pada keberanian industri untuk mengadopsi inovasi nanoteknologi dan bioteknologi secara bertanggung jawab melalui kolaborasi lintas disiplin, kepatuhan terhadap prinsip etika dan keamanan, serta komitmen terhadap keberlanjutan. Dengan pendekatan tersebut, teknologi nano-bioteknologi akan terus berkembang dari sekadar konsep ilmiah menjadi solusi nyata yang mampu mendukung transformasi dan ketahanan pangan global secara berkeadilan.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, K., Ahmad, R., Faizan, M., Farah, F., Ali, F., Yousaf, M. M., Ali, F., Niaz, W., Khan, T. U., Khan, S., Ali, S., Ahmed, I., & Hassan, H. (2025). A review of nanotechnology in food industry with implication for viable outlook and safety issues. *Hybrid Advances*, 10(April), 100487. <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2025.100487>
- Alfianto, A. N. (2025). Collaboration Towards A Sustainable Halal Industry Ecosystem: Pentahelix Approach. *Jurnal Ekonomi, Akutansi Dan Manajemen Nusantara (JEAMA)*, 4(1), 1–10. <https://doi.org/https://doi.org/10.55338/jeama.v4i1.179>
- Alisjahbana, A. S., & Murniningtyas, E. (2018). *Tujuan Pembangunan Berkelanjutan di Indonesia: Konsep, Target dan Strategi Implementasi*. Unpad Press.
- Allan, J., Belz, S., Hoeveler, A., Hugas, M., Okuda, H., Patri, A., Rauscher, H., Silva, P., Slikker, W., Sokull-kluettgen, B., Tong, W., & Anklam, E. (2021). Regulatory landscape of nanotechnology and nanoplastics from a global perspective. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 122, 104885. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2021.104885>
- Ansari, M. A. (2023). Nanotechnology in Food and Plant Science: Challenges and Future Prospects. *Plants*, 12, 2565. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/plants12132565>
- Betoret, N., Betoret, E., & Glicerina, V. T. (2024). Valorization and Utilization of Food Wastes and By-Products: Recent Trends, Innovative Technologies and Sustainability Challenges. *Foods*, 13, 9. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/foods13010009>
- Bhattacharya, S. (2015). Nanotechnology and Development : What ' s in it for Emerging Countries ? *Journal of Scientometric Research*, 4(3), 210–212.
- Bhurat, K., Bhurat, S. S., & Dhoot, P. (2025). Understanding the possibilities , challenges , and opportunities in relationship between IPRs and food technology Understanding the possibilities , challenges , and opportunities in relationship between IPRs and food technology Khushboo Bhurat * Swapnil S. *International Journal of Intellectual Property Management*,

- 15(1), 41–59. <https://doi.org/10.1504/IJIPM.2024.10063551>
- Bora, G. (2025). Biotechnology Entrepreneurship and the Startup Ecosystem: Opportunities, Challenges, and Roadmap for Innovation. In P. Shankarishan & V. K. Manam (Eds.), *Integrated Biotechnology for Sustainable Development: Innovations in Health, Agriculture, Environment and Industry* (pp. 26–36).
- Borah, M. S., Tiwari, A., Sridhar, K., Narsaiah, K., Nayak, P. K., & Inbaraj, B. S. (2023). Recent Trends in Valorization of Food Industry Waste and By-Products: Encapsulation and In Vitro Release of Bioactive Compounds. *Foods*, 12, 3823. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/foods12203823>
- Chikhaoui, E., & Hussein, S. A. (2025). The Impact of Intellectual Property Rights on Innovation in Emerging Technologies. In A. Koubaa, A. Ben Mnaouer, W. Boulila, & S. Raghay (Eds.), *International Conference on Smart Systems and Emerging Technologies* (Internatio, pp. 266–278). Springer. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-031-91235-1_24
- Chuah, A. S. F., Leong, A. D., Cummings, C. L., & Ho, S. S. (2018). Label It or Ban It? Public Perceptions of Nano-food Labels and Propositions for Banning Nano-food Applications. *Journal of Nanoparticle Research*, 20, 36. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11051-018-4126-5>
- Dwivedi, P., Kaushik, D., Giri, P., Pundir, R., & Mishra, S. (2026). Nanotechnology in Aquaculture: A Novel Tool for Sustainable Fish Health Management and Future Food Security. *Int J Drug Deliv Technol*, 16(21), 19–28. <https://doi.org/10.25258/ijddt.16.21s.2>
- Eden, R. S., Dharani, D., T, S. K., Babu, L. R., Sevanan, M., & Samuel, V. R. (2025). *Nanobiotechnology : A Recipe for Food Revolution*. 22(8), 1–25. <https://doi.org/https://doi.org/10.48048/tis.2025.9730>
- Fitriani, S., Diponegoro, A., & Wahjusaputri, S. (2020). The Synergy Effect of “ABCGM” for Small and Medium-Sized Enterprises. *Advances in Economics, Business and Management Research*, 144(23rd Asian Forum of Business Education (AFBE 2019)), 40–46. <https://doi.org/https://doi.org/10.2991/aebmr.k.200606.007>

- Food and Agriculture Organization. (2025). *World Food and Agriculture – Statistical Yearbook 2025*. Food and Agriculture Organization.
<https://doi.org/https://doi.org/10.4060/cd4313en>
- Frewer, L. J., Gupta, N., George, S., Fischer, A. R. H., Giles, E. L., & Coles, D. (2014). Consumer Attitudes towards Nanotechnologies Applied to Food Production. *Trends in Food Science & Technology*, 40(2), 211–225.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tifs.2014.06.005>
- Gbadegeshin, S. A., Al Natsheh, A., Ghafel, K., Mohammed, O., Koskela, A., Rimpilainen, A., Tikkanen, J., & Kuoppala, A. (2022). Overcoming the Valley of Death: A New Model for High Technology Startups. *Antti Kuoppala*, 4, 100077.
<https://doi.org/10.1016/j.sftr.2022.100077>
- Ghosh, M., & Kumar, R. (2024). Regulatory Issues in Nanotechnology. In M. Prasad, R. Kumar, M. Ghosh, S. M. Syed, & S. Chakravarti (Eds.), *Nanotechnology Theranostics in Livestock Diseases and Management* (pp. 765–788). Springer.
- Grobe, A., & Rissanen, M. E. (2012). Nanotechnologies in Agriculture and Food - an Overview of Different Fields of Application, Risk Assessment and Public Perception. *Recent Patents on Food, Nutrition & Agriculture*, 4(3), 176–186.
<https://doi.org/https://doi.org/10.2174/2212798411204030176>
- ISEI, I. S. E. I. (2024). *Kajian Kebijakan Publik 5.0 Akselerasi Transformasi Indonesia: Strategi Penguatan Hilirisasi Pangan*. Pengurus Pusat Ikatan Sarjana Ekonomi Indonesia.
- Jabeen, S., Bala, S., Khan, A. R., & Khan, T. (2023). Application of Nanotechnology in Food Processing and Packaging. *Women in STEM*, 10–14.
- Jafarizadeh-malmiri, H., Sayyar, Z., Anarjan, N., & Berenjian, A. (2019). Nanobiotechnology in Food: Concepts , Applications and Perspectives. In *Nanobiotechnology in Food: Concepts, Applications and Perspectives*. Springer Nature Switzerland AG.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-030-05846-3>
- KemenperinRI, K. P. R. I. (2018). *Making Indonesia 4.0*. Kementerian Perindustrian Republik Indonesia.

- <https://www.kemenperin.go.id/download/18384>
- Kuzma, J., & Besley, J. C. (2008). Ethics of Risk Analysis and Regulatory Review: From Bio- to Nanotechnology. *NanoEthics*, 2(1), 149–162. <https://doi.org/10.1007/s11569-008-0035-x>
- Lodhi, S. S., Yadav, P., & Singh, A. K. (2025). Start-Ups and Industry Trends in Bio-Nano Innovations. In V. K. Manam (Ed.), *Innovations in Biotechnology and Nanotechnology: Concepts and Applications* (pp. 89–98).
- Lugani, Y., Sooch, B. S., Singh, P., & Kumar, S. (2021). Nanobiotechnology applications in food sector and future innovations. In *Microbial Biotechnology in Food and Health* (pp. 197–225). Academic Press (Elsevier). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819813-1.00008-6>
- Marchant, G. E., Sylvester, D. J., & Abbott, K. W. (2008). Risk Management Principles for Nanotechnology. *NanoEthics*, 2(1), 43–60. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11569-008-0028-9>
- Mariyanto, J. (2025). Strategi Kebijakan Industri Pangan Lokal sebagai Antisipasi Menghadapi Krisis Pangan Global di Indonesia. *Jurnal Perencanaan Pembangunan Pertanian*, 2(2), 55–73.
- Market Growth Reports. (2026). *Food Nanotechnology Market Size, Share, Growth, and Industry Analysis, By Type (Nanoparticles, Nanoemulsions, Nanosensors), By Application (Food Industry, Packaging, Nutraceuticals), Regional Insights and Forecast to 2035*. <https://www.marketgrowthreports.com/market-reports/food-nanotechnology-market-114352>
- Marques, P. C., Fernandes, P. C. B., Sampaio, P., & Silva, J. (2025). Advances in Biotechnology in the Circular Economy: A Path to the Sustainable Use of Resources. *Sustainability*, 17, 6391. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su17146391>
- Putra, Y. A. S., Ananingsih, V. K., & Setiawan, S. E. (2025). Applications of Nanotechnology in Food Processing, Packaging and Food Safety Risks. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, 13(5), 1344–1353. <https://doi.org/https://doi.org/10.24925/turjaf.v13i5.1344->

- Ramadhana, C. (2021). Strategi Pengembangan Pertanian Guna Tercapainya Ekonomi Pedesaan Berkelanjutan Melalui Sinergitas Model Penta Helix di Desa Pettong, Kabupaten Bangkalan. *Buletin Ekonomika Pembangunan*, 2(2), 175–190. <https://doi.org/https://doi.org/10.21107/bep.v2i2.13870>
- Rosadi, A. H. Y. (2023). Ekonomi Industri Pangan dan Kebijakan Pendukungnya. *JMBI UNSRAT (Jurnal Ilmiah Manajemen Bisnis Dan Inovasi Universitas Sam Ratulangi)*, 10(3), 2015–2029.
- Rouhi, M., Nateghi, L., Aghamirzaei, M., Yousefi, S., Garavand, F., Feyzi, S., Nooshkam, M., & Jafari, S. M. (2022). Safety, Standards and Regulations of Nanotechnology in Food. In S. Lević, V. Nedović, & B. Bugarski (Eds.), *Encapsulation in Food Processing and Fermentation* (pp. 335–358). CRC Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1201/9780429324918>
- Salamanca-buentello, F., Persad, D. L., Court, E. B., Martin, D. K., Daar, A. S., & Singer, P. A. (2005). Nanotechnology and the Developing World. *PLoS Medicine*, 2(5), 383–386. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.0020097>
- Samudra, D., Mufidah, M., Mursid, M. C., & Muhtarom, A. (2025). Global Investment Trends In The Biotechnology and Nanotechnology Sector: Market Analysis and Opportunities. *Zakatuna : Journal of Economics and Business*, 1(2), 8–19.
- Saxena, N. (2023). Bio-nanotechnology in Waste to Energy Conversion in a Circular Economy Approach for Better Sustainability. In S. Dwivedi & N. Dwivedi (Eds.), *Bionanotechnology Towards Green Energy* (pp. 207–230). CRC Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1201/9781003316374>
- Shweta, S., Brindhav, A. M., Sharma, S., Azizi, S., & Rana, V. S. (2025). Unveiling the cutting-edge applications of nanotechnology in the food industry- from lab to table-a comprehensive review. *Journal of Agriculture and Food Research*, 21, 101831. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.101831>
- Singh, R., Dutt, S., Sharma, P., Sundramoorthy, A. K., Dubey, A., Singh, A., & Arya, S. (2023). Future of Nanotechnology in Food Industry: Challenges in Processing , Packaging , and Food Safety. *Global*

- Challenges*, 2200209(7), 2200209.
<https://doi.org/10.1002/gch2.202200209>
- Singh, R., & Kumar, S. (2023). Regulatory and Safety Concerns Regarding the Use of Active Nanomaterials in Food Industry. In R. Singh & S. Kumar (Eds.), *Nanotechnology Advancement in Agro-Food Industry* (pp. 269–306).
<https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-981-99-5045-4>
- Sudibyo, A., & Djumarman, D. (2008). Penerapan Nanoteknologi dalam Industri Pangan dan Pengembangan Regulasinya. *Jurnal Riset Industri*, 2(3), 171–183.
- Sukarli, Syahni, R., Elfindri, & Tanjung, H. B. (2025). Analysis of the Role of Simultaneous Social Entrepreneurship (SE) and Penta-Helix Collaboration (PH) on Sustainable Food Crop Agriculture: Case Study from West Sumatra, Indonesia. *TPM – Testing, Psychometrics, Methodology in Applied Psychology*, 32(3), 1185–1200.
- Sultana, S. M. M. (2024). The Role of IPR in Innovation for a Sustainable Future. In J. Ahamad, A. Jabbar, M. G. Barkati, & M. Tabish (Eds.), *Education, Technology, and Sustainability* (pp. 195–211). Bluerose Publishers.
- United Nations Framework Convention on Climate Change. (2024). *Food loss and waste account for 8-10% of annual global greenhouse gas emissions; cost USD 1 trillion annually*. UN Climate Change News. <https://unfccc.int/news/food-loss-and-waste-account-for-8-10-of-annual-global-greenhouse-gas-emissions-cost-usd-1-trillion>
- Valavanidis, A. (2018). *Concept and Practice of the Circular Economy: Turning Goods at the End of Their Service Life into Resources, Closing Loops in Industrial Ecosystems and Minimizing Waste*. <https://chem-tox-ecotox.org/wp-content/uploads/2018/07/CIRCULAR-ECONOMY-REVIEW-JULY2018.pdf>
- Wicaksono, A. D., Agustina, D., & Hidayat, A. R. R. T. (2023). Pentahelix Model for Eco-Industrial Development: A Collaborative Policy Approach. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 18(9), 2673–2683.
<https://doi.org/https://doi.org/10.18280/ijstdp.180906>

BIODATA PENULIS



Yohanes Harvinda, S.Pi., M.Sc.

Dosen Program Studi S1 Ilmu Kelautan
Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan
Universitas Jenderal Soedirman

Lahir di Pangkalan Bun, 26 September 1999. Penulis menempuh pendidikan sarjana di Prodi Teknologi Hasil Perikanan, Universitas Gadjah Mada, dan lulus pada tahun 2021. Melanjutkan studi di bidang yang sama di Prodi Magister Ilmu Perikanan Universitas Gadjah Mada dan lulus pada tahun 2022, dengan tesis tentang produksi, pemurnian, dan karakterisasi enzim kitinase dari *Micromonospora* sp. AR17. Pada jenjang magister ini, ia lulus *cumlaude* dan meraih predikat Wisudawan Terbaik Fakultas Pertanian.

Sejak tahun 2025, penulis berkarier sebagai Dosen di Program Studi Ilmu Kelautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Jenderal Soedirman (UNSOED) Purwokerto. Bidang keilmuan yang digeluti meliputi pengolahan hasil perikanan, bioteknologi kelautan, mikrobiologi pangan laut, serta inovasi berbasis sumber daya hayati pesisir.

Selain mengajar dan meneliti, penulis juga aktif dalam kegiatan pengabdian masyarakat, khususnya pada isu-isu ketahanan pangan laut, pengembangan UMKM berbasis perikanan, dan pemberdayaan masyarakat pesisir melalui diversifikasi produk hasil perikanan.

Minat riset saat ini meliputi:

1. Bioplastik biodegradable berbasis sumber daya laut,

2. Bioteknologi mikroba untuk pangan fungsional, dan
3. Pengembangan model bisnis berbasis hasil perikanan yang ramah lingkungan.

Dengan latar belakang akademik, pengalaman profesional, dan komitmen pada pengembangan ilmu pengetahuan, penulis terus berupaya memberikan kontribusi nyata bagi sektor perikanan dan kelautan Indonesia, baik melalui pendidikan, penelitian, maupun pengabdian masyarakat.

Penulis dapat dihubungi melalui

e-mail : yohanes.harvinda@unsoed.ac.id

LinkedIn : Yohanes Harvinda

Instagram : yohanesharvinda_

BIODATA PENULIS



Kun Mardiwati Rahayu, S.Si., M.Biomed

Dosen Program Studi Biologi

Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Al Azhar Indonesia

Penulis lahir di Tangerang, 20 Maret 1980. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Biologi, Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Al Azhar Indonesia. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Biologi FMIPA Universitas Lampung dan S2 pada Jurusan Biomedik FK Universitas Indonesia. Keilmuan yang ditekuni penulis dibidang Biologi, Biomedik, Ilmu Pendidikan dan Kajian Halal. Penulis aktif dalam kegiatan sosial kemanusiaan, perempuan dan lingkungan. Dapat dihubungi melalui kun_rahayu@uai.ac.id dan rahayukun@gmail.com.

BIODATA PENULIS



Philipus Uli Basa Hutabarat, S.Kel., M.Sc., PhD.

Dosen Program Studi Magister Ilmu Kelautan
Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Jenderal
Soedirman.

Penulis lahir di Medan, pada tanggal 4 Maret 1992. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Magister Ilmu Kelautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Jenderal Soedirman, Purwokerto. Penulis menyelesaikan pendidikan S1 pada Program Studi Ilmu Kelautan Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan Universitas Diponegoro, pendidikan S2 pada *Department of Chemistry, Biology, and Marine Science, Graduate School of Science and Engineering* University of The Ryukyus, Okinawa, Jepang, dan pendidikan S3 pada *Department of Marine and Environmental Sciences, Graduate School of Science and Engineering*, University of The Ryukyus, Okinawa, Jepang. Penulis menyelesaikan Program S2 dan S3 dibawah Program *Coral Reefs Advanced Biology Systematic (CRABS)* dengan beasiswa *Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT)* dari Pemerintah Jepang. Pada tahun 2016-2017, Penulis bekerja sebagai *Teaching Assistant* di *Graduate School of Science and Engineering*, University of The Ryukyus, Okinawa, Japan. Pada tahun 2017-2022, Penulis pernah bekerja sebagai *Research Assistant* di *Graduate School of Science and Engineering*, University of The Ryukyus, Okinawa, Japan

BIODATA PENULIS



DR. Indah Kusumananingrum, S.TP., M.Si.

Dosen Program Studi Ilmu Gizi

Fakultas Ilmu-Ilmu Kesehatan UHAMKA

Penulis lahir di Jakarta pada 22 Oktober 1974. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Ilmu Gizi FIKES UHAMKA. Pendidikan yang ditempuh mulai dari Fakultas Teknologi Pangan dan Gizi (FATETA) IPB. Lulus pada tahun 1997, penulis melanjutkan pendidikan S2 Ilmu Pangan di Fakultas Teknologi Pertanian IPB dan lulus pada tahun 2012. Penulis kemudian melanjutkan pendidikan S3 Ilmu Gizi di Fakultas Ekologi Manusia IPB University dan lulus tahun 2024. Penulis bekerja sebagai dosen tetap di Program Studi Ilmu Gizi Fakultas Ilmu-Ilmu Kesehatan sejak 2006 hingga sekarang dan memiliki jabatan fungsional Lektor. Penulis pernah menduduki jabatan sebagai sekretaris program studi Ilmu Gizi FIKES UHAMKA. Penulis aktif di organisasi profesi seperti PATPI dan AIPGI, sebagai reviewer di jurnal *Amarta* UNAIR, Jurnal *Health and Nutrition* (JHN) Politeknik Kesehatan Gorontalo, *Journal of Nutrition* College UNDIP, dan *Jurnal Gizi Indonesia* UNDIP. Penulis juga aktif melakukan penelitian dan pengabdian kepada masyarakat di bidang gizi dan pangan.

BIODATA PENULIS



Dr. Lalu Unsunnidhal

Fakultas Teknologi Pangan dan Agroindustri
Universitas Mataram

Penulis lahir dari orang tua (Alm) H. L. Zainuddin Manshur dan Hj. Sri Puspawati sebagai anak ketiga dari tiga bersaudara. Penulis dilahirkan di Mataram, Kota Mataram, Provinsi Nusa Tenggara Barat pada tanggal 9 Januari 1990. Penulis menempuh pendidikan dimulai dari SDN 45 Mataram (Lulus Tahun 2002), melanjutkan studi pada SMPN 2 Mataram (Lulus Tahun 2005), kemudian melanjutkan kembali pada SMAN 5 Mataram (Lulus Tahun 2008), setelah itu melanjutkan studi ke Perguruan Tinggi Universitas Mataram (Lulus Tahun 2012), dan melanjutkan studi kembali ke perguruan tinggi Universitas Gadjah Mada untuk gelar Master of Biotechnology (Lulus Tahun 2018), kemudian melanjutkan kembali ke perguruan tinggi yang sama yaitu Universitas Gadjah Mada untuk gelar Doktor (Lulus Tahun 2023). Hingga kini penulis aktif sebagai Dosen di Program Studi Ilmu dan Teknologi Pangan, Fakultas Teknologi Pangan dan Agroindustri, Universitas Mataram di Kota Mataram, Provinsi Nusa Tenggara Barat.

BIODATA PENULIS



Firman Fajar Perdhana, S.Si., M.Biotech.

Dosen Program Studi Ilmu dan Teknologi Pangan
Fakultas Teknologi Pangan dan Agroindustri Universitas Mataram

Penulis lahir di Kabupaten Purworejo, Jawa Tengah. Penulis menempuh pendidikan tinggi di Program Studi S1 Biologi Universitas Negeri Semarang dan melanjutkan studi di Program Studi S2 Bioteknologi Universitas Gadjah Mada. Saat ini, penulis terdaftar sebagai dosen tetap di Program Studi S1 Ilmu dan Teknologi Pangan Universitas Mataram. Penulis aktif meneliti bidang Bioteknologi Industri Pangan, Mikrobiologi Pangan, dan Keamanan Pangan. Penulis juga melakukan beberapa kegiatan pendampingan multi tahun untuk penerapan ilmu dan teknologi tepat guna bersama masyarakat, perangkat desa, LPPM Universitas, dan Pemerintah Daerah melalui Dinas terkait. Mata kuliah yang diampu oleh penulis antara lain Biologi, Mikrobiologi Pangan, Sanitasi Industri Pangan, Teknologi Fermentasi Pangan, Pengantar Bioteknologi Pangan, Teknologi Pengolahan Limbah Industri Pangan, Kewirausahaan, dan Aplikasi Komputer. Penulis menjadi pendamping mahasiswa pada berbagai kegiatan kompetisi inovatif dan berhasil menjuarai silver medal poster mahasiswa tingkat internasional; gold, silver, dan bronze medal lomba essay mahasiswa tingkat nasional; serta beberapa pendanaan hibah kewirausahaan mahasiswa.