

PRODUKSI PROTEIN SEL TUNGGAL DARI LIMBAH TAHU

Prof. Dr. Yani Suryani, S.Pd., M.Si.

Siska Tridesianti, S.Pd., M.Si.

Adisty Virakawugi Darniwa, S.Pd., M.Si.

Diterbitkan oleh:
Bimedia Pustaka Utama
2025

PRODUKSI PROTEIN SEL TUNGGAL DARI LIMBAH TAHU

Penulis:

Prof. Dr. Yani Suryani, S.Pd., M.Si.
Siska Tridesianti, S.Pd., M.Si.
Adisty Virakawugi Darniwa, S.Pd., M.Si.

Editor: Siska Tridesianti, S.Pd., M.Si.

Desain sampul: Nazla Fauziyah Octaviani

Tata letak: Beni Subarna

Kontributor:

Nazla Fauziyah Octaviani
Lutfi Akmal Aji
Devi Novianti
Nasywa Yumna Zainah
Anisa Zahra
Silva Lupita
Vania Ulfa Ramdhanawati

Diterbitkan oleh:

Bimedia Pustaka Utama
Jalan Babakan Loa Permai No. 13
Padalarang Bandung Barat 40533
email:bimediacipta@gmail.com
www.bimediacipta.web.id

Cetakan Pertama, November 2025

viii + 80 hlm. 15 cm x 21 cm

ISBN: 978-623-8080-21-2

Hak cipta dilindungi undang-undang Dilarang
mengutip atau memperbanyak sebagian atau seluruh
isi buku tanpa izin tertulis dari Penerbit

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT, atas segala limpahan, rahmat, karunia dan hidayah-Nya, sehingga penulisan buku dengan judul *Produksi Protein Sel Tunggal dari Limbah Tahu* dapat diselesaikan dengan sebaik-baiknya melalui kerjasama tim penulis. Buku ini diharapkan dapat memberikan kontribusi positif dalam ilmu pengetahuan khususnya terkait dengan Protein Sel Tunggal dalam rumpun Mikrobiologi.

Buku ini berisi tentang pertimbangan umum penggunaan limbah tahu, biokonversi limbah tahu menjadi protein sel tunggal, mikroorganisme yang digunakan untuk produksi protein sel tunggal, kultivasi mikroorganisme untuk produksi protein sel tunggal, produksi protein sel tunggal dari limbah tahu, aspek ekonomi protein sel tunggal dari limbah tahu, manfaat dan nutrisi protein sel tunggal dari limbah tahu, tantangan dan hambatan produksi protein sel tunggal, dan perspektif masa depan protein sel tunggal limbah tahu.

Penulis menyadari bahwa buku ini masih banyak kekurangan dalam penyusunannya. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan saran dan kritik yang membangun guna kesempurnaan buku ini.

Penulis mengucapkan terima kasih kepada berbagai pihak yang telah membantu dalam proses penyelesaian buku ini. Semoga buku ini dapat menjadi sumber referensi yang mudah dipahami oleh pembaca.

Bandung, Oktober 2025

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI.....	v
BAB I PERTIMBANGAN UMUM TENTANG PENGGUNAAN LIMBAH TAHU.....	1
BAB II BIOKONVERSI LIMBAH TAHU MENJADI PROTEIN SEL TUNGGAL.....	5
BAB III MIKROORGANISME YANG DIGUNAKAN UNTUK PRODUKSI PROTEIN SEL TUNGGAL....	11
A. Kriteria Mikroorganisme Penghasil Protein Sel Tunggal	11
B. Pengujian Keamanan Mikroorganisme Penghasil Protein Sel Tunggal	12
C. Kualitas Nutrisi Protein Sel Tunggal	14
D. Optimasi Produksi Protein Sel Tunggal	15
E. Jenis Mikroorganisme Penghasil Protein Sel Tunggal.....	15

BAB IV KULTIVASI MIKROORGANISME UNTUK PRODUKSI PROTEIN SEL TUNGGAL.....	21
A. Teknik Isolasi untuk Mendapatkan Isolat Penghasil Protein Sel Tunggal	22
B. Media Kultivasi Mikroorganisme.....	22
C. Faktor Fisik Kultivasi Mikroorganisme.....	24
D. Alat-Alat Pendukung Kultivasi.....	26
E. Penyimpanan Mikroorganisme	29
BAB V PRODUKSI PROTEIN SEL TUNGGAL DARI LIMBAH TAHU.....	31
A. Pembuatan Media Fermentasi	32
B. Pembuatan Starter Bakteri	33
C. Fermentasi.....	34
D. Pemanenan Protein Sel Tunggal.....	35
BAB VI ASPEK EKONOMI PROTEIN SEL TUNGGAL DARI LIMBAH TAHU.....	37
A. Ketersediaan dan Biaya Bahan Baku	37
B. Biaya Produksi.....	38
C. Nilai Tambah dan Harga Pasar	38
D. Aplikasi Industri	39
E. Prospek Regional	41
F. Kelayakan Ekonomi	42
BAB VII MANFAAT NUTRISI PROTEIN SEL TUNGGAL DARI LIMBAH TAHU.....	45
A. Komposisi Gizi Protein Sel Tunggal yaitu Protein.....	46
B. Profil Asam Amino Esensial Protein Sel Tunggal	46

C. Vitamin dan Mineral dalam Protein Sel Tunggal	48
D. Manfaat Nutrisi Protein Sel Tunggal bagi Pakan Ternak	48
BAB VIIIITANTANGAN DAN HAMBATAN PRODUKSI PROTEIN SEL TUNGGAL.....	
A. Tantangan Produksi Protein Sel Tunggal Berdasarkan Pemilihan Sumber Protein.....	51
B. Tantangan Produksi Protein Sel Tunggal Berdasarkan Pengolahan Hilirisasi	52
C. Tantangan Produksi Protein Sel Tunggal Berdasarkan Aspek Ekonomi	53
D. Tantangan Produksi Protein Sel Tunggal Berdasarkan Standar Keamanan dan Regulasinya	54
E. Solusi Tantangan dan Hambatan Produksi Protein Sel Tunggal	57
BAB IX PERSPEKTIF MASA DEPAN PROTEIN SEL TUNGGAL LIMBAH TAHU.....	
DAFTAR PUSTAKA.....	67
TENTANG PENULIS.....	77

BAB I

PERTIMBANGAN UMUM TENTANG PENGGUNAAN LIMBAH TAHU

Protein merupakan makromolekul esensial bagi manusia maupun hewan yang memainkan peran penting dalam berbagai proses fisiologis tubuh. Protein berperan penting dalam memperbaiki jaringan yang rusak, membentuk jaringan baru, produksi enzim, produksi hormon, serta produksi antibodi dalam membentuk sistem imun.

Umumnya kebutuhan protein harian bagi orang dewasa dengan aktivitas fisik yang ringan diperkirakan sekitar 0,8 g per kg berat badan. Namun, pemenuhan kebutuhan protein secara global menghadapi berbagai tantangan, terutama dalam hal ketersediaan, keberlanjutan, dan dampak lingkungan dari sumber protein konvensional.

Lebih lanjut, menurut Organisasi Perserikatan Bangsa-Bangsa (PBB), tantangan ini diperkirakan akan semakin meningkat seiring dengan proyeksi pertumbuhan populasi dunia yang terus berlanjut selama 50 hingga 60 tahun ke depan, dan diperkirakan mencapai puncaknya sekitar 10,3 miliar jiwa pada pertengahan tahun 2080. Peningkatan jumlah penduduk ini secara langsung meningkatkan permintaan pangan, termasuk protein yang merupakan komponen esensial dalam pola makan sehat.

Akan tetapi, sumber protein hewani secara tradisional memiliki dampak signifikan terhadap emisi gas rumah kaca dan konsumsi

air berlebihan dalam proses produksinya. Kekhawatiran ini semakin diperburuk oleh fakta bahwa peningkatan permintaan terhadap protein hewani diperkirakan akan memperbesar tekanan terhadap lahan, dikarenakan meningkatnya kebutuhan untuk memproduksi pakan ternak.

Meskipun sumber protein nabati seperti kedelai, kacang-kacangan, dan biji-bijian dianggap lebih ramah lingkungan, namun keberadaan *anti-nutritional factors* (seperti asam fitat, tanin dan inhibitor protease) pada sebagian tanaman yang dapat menghambat penyerapan nutrisi secara optimal. Selain itu, sumber protein konvensional yang biasanya diperoleh dari hewan maupun tumbuhan memerlukan waktu lama dan biaya yang relatif tinggi untuk mendapatkannya. Oleh karena itu, diperlukan pengembangan sumber protein alternatif yang mendukung sistem ketahanan pangan yang ramah lingkungan dan berkelanjutan. Salah satunya melalui penggunaan Protein sel tunggal.

Protein sel tunggal merupakan protein yang diperoleh dari sel mikroorganisme yang memiliki kandungan protein tinggi. Kandungan protein yang terdapat dalam protein sel tunggal dapat mencapai hingga 80% dari biomassa keringnya. Selain itu, protein sel tunggal juga mengandung profil asam amino yang tinggi baik asam amino esensial dan non-esensial seperti asam aspartat, asam glutamat, asparagin, serin, glutamin, histidin, glisin, sitrulin, alanin, arginin, tirosin, metionin, valin, isoleusin, fenilalanin, lisin dan leusin.

Penggunaan protein sel tunggal sebagai sumber alternatif protein masih perlu pengembangan lebih lanjut untuk meningkatkan efisiensi produksi, serta mendukung pemanfaatan sumber daya lokal yang tersedia. Salah satu upaya untuk mengoptimalkan potensi protein sel tunggal dilakukan melalui pemanfaatan bakteri *indigenous*. Bakteri *indigenous* merupakan bakteri yang tumbuh secara alami di lingkungan asalnya, seperti tanah, air, atau limbah.

Umumnya, sumber untuk produksi protein sel tunggal berasal dari limbah dan bahan mentah seperti pati, buah-buahan, limbah

buah, serta molase. Penggunaan bakteri *indigenous* dalam produksi protein sel tunggal dapat menjadi pendekatan yang berpotensi meningkatkan efisiensi produksi, karena bakteri ini telah beradaptasi secara alami dengan kondisi lingkungan asalnya. Adaptasi ini memungkinkan bakteri *indigenous* lebih efektif untuk memanfaatkan nutrisi dalam limbah organik sebagai substrat untuk pertumbuhan.

Indonesia merupakan salah satu negara dengan produksi tahu dalam jumlah besar. Tahu sendiri menjadi salah satu sumber protein yang mudah untuk diperoleh masyarakatnya. Namun dalam proses produksinya menyisakan limbah tahu yang berpotensi mencemari lingkungan apabila tidak dikelola dengan baik. Besarnya jumlah tahu yang dihasilkan juga sebanding dengan banyak limbah yang dihasilkan.

Namun, pemanfaatan limbah tahu oleh masyarakat masih sangat terbatas, seperti hanya digunakan sebagai pakan ternak atau dibuang begitu saja. Padahal limbah tahu ini masih mengandung nutrisi yang cukup tinggi, terutama protein, karbohidrat, dan lemak. Dengan komposisi nutrisi tersebut, menjadikan limbah tahu berpotensi dimanfaatkan sebagai substrat untuk pertumbuhan bakteri *indigenous*, sekaligus menjadi sumber isolat bakteri *indigenous* yang berpotensi sebagai kandidat penghasil protein sel tunggal.

Pemanfaatan limbah tahu sebagai substrat untuk pertumbuhan bakteri *indigenous* dalam produksi protein sel tunggal, tidak hanya berkontribusi dalam pengembangan sumber protein alternatif yang berkelanjutan, tetapi juga membantu mengurangi pencemaran lingkungan dari limbah hasil agroindustri. Oleh karena itu, penting untuk mengeksplorasi potensi limbah tahu sebagai media pertumbuhan sekaligus sumber isolat bakteri *indigenous* yang berperan dalam produksi protein sel tunggal.

BAB II

BIOKONVERSI LIMBAH TAHU MENJADI PROTEIN SEL TUNGGAL

Produksi tahu di Indonesia yang besar setiap harinya menghasilkan juga produk sampingan berupa limbah tahu dalam jumlah yang besar. Limbah tahu termasuk ke dalam jenis limbah organik yang dihasilkan dari proses industri pembuatan tahu, yang terdiri atas limbah padat dan cair. Limbah padat tahu berasal dari hasil penyaringan bubur kedelai untuk memperoleh sari kedelai yang digunakan sebagai bahan dalam proses pembuatan tahu. Sementara itu, limbah cair tahu dapat dihasilkan dari berbagai tahap proses produksi, seperti air bekas cucian kedelai, pembersihan peralatan, sisa pemasakan kedelai, pemadatan dan pencetakan tahu.

Pemanfaatan limbah tahu oleh masyarakat masih sangat terbatas. Umumnya, limbah padat tahu hanya dimanfaatkan sebagai pakan ternak tanpa pengolahan lebih lanjut, sedangkan limbah cair tahu cenderung belum banyak dimanfaatkan dan justru dibuang begitu saja ke saluran perairan atau lingkungan sekitar tanpa adanya pengolahan yang baik. Kondisi ini berpotensi dapat menimbulkan masalah pencemaran, terutama terhadap kualitas air dan tanah di lingkungan sekitar.

Limbah padat tahu sendiri diketahui masih memiliki kandungan nutrisi dan kadar air yang cukup tinggi, sehingga sangat mudah mengalami pembusukan. Proses pembusukan ini dapat menimbulkan

bau tidak sedap, serta mencemari lingkungan sekitarnya apabila tidak ditangani dengan benar. Sementara itu, limbah cair tahu yang dibuang begitu saja ke perairan tanpa pengolahan berpotensi mempengaruhi sifat fisik dan kimia air, yang dapat berpengaruh terhadap kelangsungan hidup organisme perairan.

Tingginya kandungan nutrisi yang masih dimiliki oleh limbah tahu memberikan peluang untuk dimanfaatkan menjadi produk yang memiliki nilai tambah. Setiap 100 g limbah padat tahu mengandung karbohidrat 41,3 g; protein 26,6 g; lemak 18,3 g dan air 9 g. Sementara itu, limbah cair tahu juga masih mengandung zat gizi meskipun dalam kadar yang lebih rendah, yaitu kadar air sebesar 93,18%, abu 0,21%, protein kasar 2,77%, serat kasar 1,65%, karbohidrat 1,88% dan energi sebesar 21,48 kalori per 100 g. Meskipun kadar protein dan karbohidrat tidak setinggi pada limbah padat tahu, kandungan tersebut tetap menjadikan limbah cair tahu berpotensi menyediakan nutrisi untuk dimanfaatkan dalam menghasilkan produk baru yang lebih bernilai.

Salah satu pendekatan yang dapat dilakukan dalam pemanfaatan limbah tahu adalah melalui proses biokonversi. Biokonversi merupakan proses pengolahan limbah organik seperti limbah tahu menjadi produk baru yang memiliki nilai lebih dengan memanfaatkan agen biologis. Agen biologis tersebut berperan penting dalam menguraikan senyawa-senyawa organik yang terdapat dalam limbah tahu melalui proses metabolisme dan reaksi enzimatik yang dimilikinya. Biokonversi menjadi salah satu solusi alternatif dalam pengelolaan limbah yang berkelanjutan karena tidak hanya mengurangi pencemaran, tetapi juga mampu menghasilkan produk baru yang memiliki nilai tambah.

Biokonversi cocok diaplikasikan pada limbah tahu dikarenakan masih memiliki kandungan nutrisi yang cukup tinggi, seperti protein, karbohidrat dan lemak yang dapat dimanfaatkan oleh agen biologi seperti mikroorganisme sebagai sumber nutrisi untuk mendukung pertumbuhannya. Kandungan nutrisi tersebut tidak hanya mendukung pertumbuhan mikroorganisme, tetapi juga menjadikan limbah tahu

tersebut sebagai habitat potensial berbagai jenis mikroorganisme. Dengan demikian, limbah tahu memiliki potensi besar untuk dimanfaatkan melalui proses biokonversi untuk menghasilkan produk yang lebih bernilai.

Agen biologi seperti mikroorganisme tidak hanya berperan dalam menguraikan senyawa-senyawa organik yang terkandung dalam limbah tahu, namun juga dapat dimanfaatkan dalam menghasilkan produk baru yang memiliki nilai lebih. Salah satu produk potensial yang dihasilkan dari mikroorganisme adalah produksi protein sel tunggal. Protein sel tunggal merupakan biomassa protein yang dapat diperoleh dari berbagai jenis mikroorganisme termasuk cendawan, khamir, alga dan bakteri.

Protein sel tunggal diketahui memiliki kandungan protein tinggi yang dapat mencapai 80% dari berat kering selnya. Kemampuan dalam menghasilkan kadar protein tersebut bervariasi, tergantung dengan jenis mikroorganisme yang digunakan. Selain itu, protein sel tunggal juga memiliki kandungan asam amino dengan spektrum yang luas, kandungan lemak yang rendah, serta mengandung berbagai vitamin seperti tiamin, riboflavin, piridoksin, asam nikotinat, asam pantotenat, asam folat, biotin, asam askorbat, β -karoten, dan α -tokoferol. Oleh karena itu, pemanfaatan limbah tahu melalui biokonversi dalam produksi protein sel tunggal dapat menjadi solusi strategis dalam pengolahan limbah industri dan penyediaan sumber protein alternatif.

Protein sel tunggal memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan sumber protein konvensional. Mikroorganisme penghasil protein sel tunggal umumnya memiliki laju pertumbuhan yang cepat, sehingga memungkinkan untuk produksi biomassa protein dengan waktu yang lebih singkat. Proses produksinya juga tidak memerlukan lahan yang luas seperti halnya pada peternakan ataupun pertanian, tidak menghasilkan limbah dalam proses produksinya, serta tidak bergantung pada kondisi musim dan iklim, sehingga dapat diproduksi sepanjang tahun.

Selain itu, keunggulan protein sel tunggal lainnya adalah dapat memanfaatkan limbah-limbah organik seperti limbah tahu sebagai substrat untuk media pertumbuhan mikroorganisme penghasil protein sel tunggal. Hal tersebut berpotensi untuk mengurangi biaya produksi. Adapun pemilihan substrat juga harus mempertimbangkan berdasarkan kelimpahannya di sekitar area produksi. Dengan berbagai keunggulan tersebut menjadikan protein sel tunggal menjadi salah satu solusi yang potensial dalam penyediaan sumber protein alternatif yang ramah lingkungan dan lebih ekonomis.

Efisiensi tersebut dapat semakin ditingkatkan melalui penggunaan bakteri *indigenous* sebagai agen biologi dalam proses biokonversi. Bakteri *indigenous* merupakan bakteri yang hidup secara alami di lingkungan asalnya, seperti tanah, air dan limbah, termasuk limbah tahu. Bakteri *indigenous* yang berpotensi sebagai penghasil protein sel tunggal biasanya tumbuh pada substrat yang mengandung unsur karbon dan nitrogen, seperti yang terdapat pada limbah tahu. Bakteri *indigenous* yang berasal dari limbah tahu memiliki potensi besar untuk dimanfaatkan dalam proses biokonversi limbah tahu untuk menghasilkan protein sel tunggal sebagai produk bernilai lebih. Keunggulan bakteri *indigenous* sebagai agen biologi dalam proses biokonversi terletak pada kemampuannya yang telah beradaptasi dengan kondisi lingkungan asalnya, sehingga bakteri akan memiliki ketahanan dan aktivitas metabolismik yang optimal terhadap limbah tersebut.

Pemilihan isolat bakteri *indigenous* dari limbah tahu harus melalui serangkaian tahapan seleksi keamanan dan identifikasi untuk memastikan bahwa isolat tersebut aman untuk digunakan sebagai agen biologi dalam proses biokonversi limbah tahu menjadi protein sel tunggal. Isolat bakteri *indigenous* tersebut harus memenuhi sejumlah kriteria penting, antara lain bersifat tidak patogen dan tidak menghasilkan toksin, dapat tumbuh pada substrat dengan biaya rendah dan mudah didapatkan seperti limbah organik, memiliki laju pertumbuhan cepat dan produktivitas yang baik, toleran terhadap

suhu dan pH. Selain itu, isolat bakteri tersebut harus memiliki stabilitas genetik untuk menjamin konsistensi pertumbuhan selama proses fermentasi, serta komposisi produk akhir, khususnya kadar protein yang tinggi dan kandungan asam nukleat yang rendah.

Setelah diperoleh isolat bakteri *indigenous* dari limbah tahu yang memenuhi berbagai kriteria, tahapan selanjutnya adalah proses fermentasi. Proses fermentasi berperan penting untuk mendukung pertumbuhan isolat bakteri yang akan dikembangkan menjadi produk baru berupa protein sel tunggal. Secara umum, proses biokonversi limbah tahu menjadi produk berupa protein sel tunggal terdiri dari beberapa tahapan (Gambar 1), yaitu persiapan isolat bakteri dan media fermentasi, pelaksanaan fermentasi, pemisahan dan pemurnian biomassa, lalu diakhiri dengan tahap pengeringan.



Gambar 1. Skema produksi protein sel tunggal (Thiviya dkk., 2022)

Pada tahap fermentasi, isolat bakteri *indigenous* diinokulasikan ke dalam substrat yang mengandung limbah tahu. Selain itu, parameter lingkungan seperti suhu, pH, kadar oksigen, dan lama waktu fermentasi harus dikontrol dengan baik agar proses pertumbuhan bakteri berlangsung secara optimum. Selama proses ini, bakteri akan memanfaatkan nutrisi yang terkandung dalam limbah tahu, seperti protein, karbohidrat dan lemak sebagai sumber energi dan bahan penyusun sel. Proses ini didukung oleh kondisi lingkungan yang optimum dan terkontrol untuk pertumbuhan bakteri, sehingga pertumbuhan bakteri akan berlangsung secara maksimal dan meningkatkan hasil produksi biomassa protein sel tunggal.

Setelah tahap fermentasi selesai, langkah selanjutnya adalah pemurnian biomassa untuk memisahkannya dari media fermentasi. Pemurnian dapat dilakukan dengan proses sentrifugasi untuk memisahkan biomassa sel bakteri yang berbentuk padat dari media fermentasi yang berbentuk cair. Tahapan ini penting dilakukan agar diperoleh biomassa protein yang murni dan bebas dari kontaminan serta sisa-sisa substrat dalam media fermentasi.

Setelah diperoleh biomassa murni, tahap selanjutnya adalah pengeringan. Pengeringan bertujuan untuk mengurangi kadar air yang terdapat dalam biomassa protein sel tunggal agar memiliki daya simpan yang lebih lama. Tahapan ini dapat dilakukan dengan metode *drum drying*, *spray drying*, atau *oven drying* sebagai metode yang murah untuk menghilangkan kadar air dalam biomassa.

Melalui serangkaian tahapan dalam proses biokonversi, limbah tahu yang sebelumnya tidak termanfaatkan secara optimal dapat diubah menjadi produk bernilai tambah tinggi berupa protein sel tunggal. Pemanfaatan limbah organik ini tidak hanya berkontribusi dalam mengurangi pencemaran lingkungan, tetapi juga menjadi sumber protein alternatif yang berkelanjutan dan ekonomis.

BAB III

MIKROORGANISME YANG DIGUNAKAN UNTUK PRODUKSI PROTEIN SEL TUNGGAL

Protein sel tunggal merupakan protein yang dihasilkan dari biomassa mikroorganisme bersel tunggal meliputi bakteri, khamir, kapang, atau pun mikroalga yang telah dikeringkan. Kehadiran protein sel tunggal dapat menjadi protein alternatif dari sumber konvensional berupa hasil pertanian, perikanan dan peternakan. Komponen utama protein sel tunggal berupa asam amino, mineral, karbohidrat, lemak, vitamin, fosfor dan kalium dapat dimanfaatkan sebagai pangan atau suplemen kesehatan bagi manusia serta pakan untuk meningkatkan nutrisi pada pertumbuhan hewan-hewan.

A. Kriteria Mikroorganisme Penghasil Protein Sel Tunggal

Keamanan mikroorganisme penghasil protein sel tunggal sebagai pakan dan pangan perlu melalui pendekatan dan serangkaian pengujian yang ketat. Kriteria penting yang harus diperhatikan dalam penggunaan mikroorganisme sebagai penghasil protein sel tunggal dapat ditinjau dari aspek keamanan bagi kesehatan dan lingkungan, kandungan nutrisi, serta optimalisasi kegiatan produksi. Mikroorganisme penghasil protein sel tunggal yang aman bagi kesehatan adalah mikroorganisme yang bersifat tidak patogen dan

tidak menghasilkan zat toksin yang dapat menyebabkan penyakit pada manusia, hewan, dan tumbuhan. Kualitas nutrisi yang baik pada protein sel tunggal meliputi kandungan protein yang tinggi dengan komposisi asam amino yang baik, dan asam nukleat yang rendah. Ditinjau dari segi industri, produksi protein sel tunggal yang optimal perlu didukung oleh mikroorganisme yang mampu beregenerasi dalam waktu cepat dengan biaya produksi yang murah.

B. Pengujian Keamanan Mikroorganisme Penghasil Protein Sel Tunggal

Mikroorganisme penghasil protein sel tunggal harus bersifat tidak patogen yaitu tidak membahayakan kesehatan dan lingkungan. Patogen merupakan mikroorganisme yang dapat menyebabkan penyakit dengan cara menginfeksi dan merusak sel serta jaringan inangnya. Sifat tersebut dapat diketahui dengan melakukan serangkaian pengujian patogenitas secara mikrobiologis pada manusia, hewan dan tumbuhan.

Uji patogenitas pada manusia dan hewan dapat dilakukan dengan uji hemolis menggunakan *Blood Agar Plate* (BAP) yang bertujuan untuk mengetahui kemampuan bakteri dalam menghasilkan enzim hemolis yang dapat melisiskan sel darah. Bakteri patogen dapat ditandai dengan terbentuknya zona bening pada sekitar koloni (β -hemolisis) setelah bakteri diinokulasikan dan diinkubasi selama 24 jam. Zona bening terbentuk disebabkan oleh pecahnya sel darah merah secara keseluruhan sehingga hemoglobin terlepas dan terbawa aliran darah. Serta perubahan warna media pada sekitar koloni dari merah menjadi abu-abu atau kehijauan (α -hemolisis) karena adanya lisis parsial yaitu reduksi hemoglobin menjadi methemoglobin. Sedangkan bakteri yang dinyatakan tidak patogen pada manusia dan hewan ditandai dengan tidak terjadinya perubahan warna media pada sekitar koloni, dengan kata lain

bakteri tidak dapat melisiskan darah (γ -hemolisis). Bakteri yang menunjukkan sifat γ -hemolisis inilah yang dapat digunakan sebagai penghasil protein sel tunggal.

Uji patogenitas pada tumbuhan perlu dilakukan untuk mengetahui sifat bakteri yang aman dan ramah lingkungan karena bersifat tidak patogen pada tanaman. Pengujian ini dilakukan dengan metode uji hipersensitivitas yaitu menginokulasikan suspensi mikroorganisme pada tanaman tembakau. Hipersensitif merupakan respons yang diberikan oleh tanaman karena keberadaan patogen. Gejala hipersensitif ditandai dengan adanya klorosis atau nekrosis (perubahan daun menjadi warna kuning hingga jaringan mati) menandakan mikroorganisme bersifat patogen. Sebaliknya, mikroorganisme yang bersifat tidak patogen dan aman untuk digunakan adalah mikroorganisme yang tidak menunjukkan adanya gejala kerusakan dan kematian sel tanaman.

Pengujian lebih lanjut mengenai keamanan kesehatan adalah risiko alergi yang dapat ditimbulkan oleh protein sel tunggal sebagai pangan dan pakan dapat diketahui dengan metode *in vivo* dan *in silico*. Metode *in vivo* dilakukan menggunakan hewan uji dengan sistem gastrointestinal, menghasilkan immunoglobulin E (IgE), serta reaksi antigenik yang mirip dengan manusia. Maka, hewan uji yang idealnya dipilih adalah tikus BALB/c. Pengujian dilakukan menggunakan serum dari hewan uji dengan alergi yang diketahui untuk meninjau adanya pengikatan immunoglobulin E (IgE). Lebih lanjut pengujian secara *in silico* dilakukan dengan membandingkan urutan asam amino yang terkandung pada protein sel tunggal dengan alergen yang telah diketahui.

Selain pengujian patogenitas dan alergenisitas, mikroorganisme perlu diketahui tingkat kepekaannya terhadap antibiotik melalui pengujian resistensi. Resistensi mikroorganisme merupakan kemampuan dalam menghambat kinerja antibiotik. Mikroorganisme dengan sifat resistan akan berdampak buruk bagi kesehatan. Pengujian resistensi antibiotik diharapkan dapat mencegah adanya risiko transfer gen

secara horizontal yang dibawa oleh bakteri resistan pada bakteri rentan melalui elemen genetik yang dimilikinya. Oleh karena itu, untuk menunjang keamanan lingkungan dan kesehatan, bakteri kandidat protein sel tunggal tidak boleh bersifat resistan terhadap antibiotik. Pengujian resistensi dilakukan dengan metode *Kirby Bauer* atau metode cakram. Zona bening yang muncul diukur, tingkatan resistensi didapatkan dengan panduan *Clinical and Laboratory Standards Institute* (CLSI).

C. Kualitas Nutrisi Protein Sel Tunggal

Kualitas nutrisi protein sel tunggal dapat bervariasi tergantung dari jenis mikroorganisme yang digunakan. Umumnya, syarat utama mikroorganisme yang digunakan sebagai penghasil protein sel tunggal mampu memproduksi protein dalam jumlah yang tinggi. Berdasarkan SNI 01-3136-1992 kadar protein minimum yang dihasilkan mikroorganisme sebagai protein sel tunggal adalah 40%. Selain itu, komposisi asam amino yang dimiliki oleh protein sel tunggal dari mikroorganisme juga perlu untuk diperhatikan. Asam amino yang dimiliki protein sel tunggal meliputi lisin, treonin, dan metionin yang dinilai dapat menunjang sumber nutrisi seimbang untuk memenuhi asam amino esensial bagi tubuh.

Selain kadar protein yang tinggi dengan kandungan asam amino yang baik, mikroorganisme penghasil protein sel tunggal harus menghasilkan asam nukleat dalam jumlah yang rendah. Hal ini ditinjau dari batas aman maksimum konsumsi asam nukleat bagi manusia dewasa yaitu 4g/hari. Konsumsi asam nukleat berlebih dari standar yang ditetapkan akan menimbulkan gejala hiperurisemia atau meningkatnya konsentrasi asam urat oleh senyawa purin dari pemecahan RNA sehingga dapat menyebabkan pengendapan kristal urat dalam jaringan, peradangan sendi (arthritis), dan batu ginjal.

D. Optimasi Produksi Protein Sel Tunggal

Kemudahan produksi dalam waktu singkat menjadi salah satu keunggulan protein sel tunggal dibandingkan dengan protein nabati dan hewani. Namun hal ini juga dipengaruhi oleh jenis mikroorganisme yang digunakan. Tingginya laju pertumbuhan pada mikroorganisme ditandai dengan meningkatnya jumlah sel secara signifikan yang mengindikasikan mikroorganisme sedang berada pada fase optimal pertumbuhan. Semakin tinggi jumlah sel, maka berat kering sel dan kadar protein yang dihasilkan akan semakin besar pula. Hal ini memberikan keuntungan produksi protein sel tunggal dengan kandungan protein yang baik dalam waktu produksi yang lebih cepat dan efisien.

E. Jenis Mikroorganisme Penghasil Protein Sel Tunggal

Mikroorganisme yang digunakan untuk menghasilkan protein sel tunggal meliputi bakteri, khamir, kapang, dan mikroalga. Secara umum mikroorganisme memiliki kemampuan untuk menghasilkan protein berkadar tinggi dengan kandungan asam amino dan nutrisi berkualitas baik, serta proses produksi yang efisien. Secara spesifik, setiap jenis mikroorganisme memiliki keuntungan dan kekurangan masing-masing, salah satunya ditinjau berdasarkan kadar protein yang dihasilkan dan waktu pertumbuhan (Tabel 1).

Tabel 1. Kadar protein dan laju pertumbuhan berdasarkan jenis mikroorganisme

Jenis Mikroorganisme	Kadar Protein (%)	Laju pertumbuhan (Jam)
Bakteri	50-80	24
Khamir	50-55	48
Kapang	14-45	120
Mikroalga	20-80	240

(Sumber: Pudjiastuti dkk., 2012; Ariyani dkk., 2014; Maryana dkk., 2016; Sekoai dkk., 2024)

1. Bakteri

Bakteri kerap dipilih sebagai kandidat penghasil protein sel tunggal karena memiliki beberapa keunggulan meliputi protein tinggi mencapai 50-80%, waktu regenerasi yang singkat sekitar 24 jam, kandungan asam amino esensial metionin berkisar hingga 3% yang setara dengan standar *Food Agriculture Organization of the United Nation* (FAO), kemampuan tumbuh pada berbagai medium termasuk limbah yang kaya akan nitrogen, substrat berupa gula dan pati. Bakteri genus *Bacillus* sebagai penghasil protein sel tunggal teruji dapat menjadi agen probiotik karena dapat berperan sebagai antibakteri patogen. Sedangkan kekurangan bakteri yaitu pemanenan sulit dilakukan karena ukuran dan kepadatan sel yang rendah, penerimaan di masyarakat buruk, serta mengandung asam nukleat tinggi berkisar 8-12% sehingga perlu melalui tahapan produksi tambahan. Beberapa penelitian telah membuktikan berbagai spesies bakteri mampu menghasilkan protein dengan kadar yang tinggi (Tabel 2).

Tabel 2. Kadar protein berdasarkan spesies bakteri

Spesies Bakteri	Substrat	Kadar Protein (%)
<i>Escherichia coli</i>	Tanduk domba jantan	66
<i>Bacillus Cereus</i>	Tanduk domba jantan	68
<i>B. subtilis</i>	Tanduk domba jantan	71
<i>Rhodococcus opacus</i>	Limbah pertanian	62,2
<i>Rhodopseudomonas palustris</i>	Limbah lembaran karet lateks	55-65
<i>Yarrowiya lipolytica</i>	Limbah biofuel	30-50

Sumber: Korbanoglu & Algur, (2002), Mahan dkk., (2018), Kornochaler dkk., (2014), dan Zhuang dkk., (2024)

Kandidat bakteri penghasil protein sel tunggal secara lebih lanjut adalah *Aeromonas hydrophila*, *Achromobacter delvacvate*, *Acinetobacter calcoaceticus*, *Bacillus megaterium*, *Cellulomonas* sp., *Flavobacterium* sp., *Thermomonospora fusca*, *Lactobacillus* sp., dan *Pseudomonas fluorescens*.

2. Khamir

Khamir menjadi salah satu mikroorganisme yang berperan dalam produksi pangan dan dikenal sejak lama oleh manusia. Khamir dapat tumbuh dan berfermentasi secara optimal memanfaatkan keberadaan oksigen. Kelebihan khamir sebagai penghasil protein sel tunggal meliputi kandungan protein tinggi mencapai 50-55%, kadar asam nukleat yang rendah, asam amino lisin dan treonin yang tinggi, dan mengandung vitamin B kompleks. Sedangkan kekurangan khamir adalah berpotensi menghasilkan toksin. Beberapa penelitian telah membuktikan berbagai spesies khamir mampu menghasilkan protein (Tabel 3).

Tabel 3. Kadar protein yang dihasilkan dari berbagai spesies khamir

Spesies Khamir	Substrat	Kadar protein (%)
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Limbah industri makanan	24-50
<i>Candida utilis</i>	Limbah industri kulit pisang dan ampas jus jeruk	49
<i>C.intermedia</i>	Limbah tongkol jagung	48,4

Sumber: Wu dkk., (2018), Munawar dkk., (2010), dan Aggelopoulos dkk., (2014)

Lebih lanjut kandidat khamir penghasil protein sel tunggal meliputi *Amoco torula*, *Candida. tropicalis*, *C. novellas* *C. boidinii*, *Pichia pastoris*, dan *Ogataea polymorpha*.

3. Kapang

Kapang atau jamur berfilamen sebagai penghasil protein sel tunggal memiliki keunggulan mampu menghasilkan metabolit sekunder berupa β -karoten dan ergosterol, vitamin b, serta proses pemanenan yang mudah karena mengandung filamen. Sedangkan kekurangan kapang adalah beberapa spesies menghasilkan toksin, kandungan asam nukleat 7-10%, laju pertumbuhan yang lambat dan kadar protein lebih rendah dibandingkan mikroorganisme lain yaitu

14-45%. Beberapa penelitian telah membuktikan berbagai spesies kapang mampu menghasilkan protein (Tabel 4).

Tabel 4. Kadar protein yang dihasilkan dari berbagai spesies kapang

Jenis Kapang	Substrat	Kadar Protein (%)
<i>Aspergillus niger</i>	Limbah pengolahan pati kentang	38
<i>Aspergillus oryzae</i>	Dedak padi	24
<i>Fusarium venenatum</i>	Glukosa	44
<i>Trichoderma harzianum</i>	Limbah filtrasi keju	34
<i>Trichoderma viridiae</i>	Bubur jeruk	32

Sumber: De Georgia dkk., (2002), Sisman dkk., (2013), Wiebe, (2002), Ravinder dkk., (2003), Liu dkk., (2013)

4. Mikroalga

Pemanfaatan protein sel tunggal dari mikroalga kerap digunakan sebagai campuran pada makanan karena mengandung aldehida tak jenuh, dimetil sulfida, dan organohalogen yang dapat meningkatkan cita rasa. Selain itu, protein sel tunggal mikroalga dapat dikonsumsi secara langsung dalam bentuk tablet, kapsul, dan cairan. Keunggulan mikroalga sebagai protein sel tunggal adalah kadar protein tinggi berkisar 20-80%, profil asam amino yang setara dengan telur dan kedelai, daya cerna tinggi, mengandung omega 3 dan, vitamin B12, A, C, dan E dengan nilai gizi tinggi.

Salah satu suplemen protein sel tunggal mikroalga yang telah banyak dikenal adalah Spirulina (*Arthrospira platensis*), suplemen ini telah tersertifikasi oleh Badan Pengawas Obat dan Makanan Amerika Serikat (US FDA) serta terbukti mampu meningkatkan sistem imun dan mengurangi risiko berkembangnya penyakit kardiovaskular, degenerative kronis, dan kanker. Namun mikroalga memiliki kekurangan dari segi laju pertumbuhannya yang lama jika dibandingkan dengan mikroorganisme lain. Beberapa penelitian telah membuktikan berbagai spesies kapang mampu menghasilkan protein (Tabel 5).

Mikroalga penghasil protein sel tunggal juga meliputi *Chondrus crispus*, *Scenedesmus* sp., *Chlorella pyrenoidosa*, *Porphyrium* sp. *Aparagopsis taxiformis*, *Gracilaria* sp.

Tabel 5. Kadar protein berasal dari mikroalga

Spesies Mikroalga	Substrat	Kadar Protein (%)
<i>Arthospira platensis</i> (<i>Spirulina platensis</i>)	Media zarounk	46-63
<i>C.sorokiana</i>	Air proses industri	46-65
<i>Euglena gracilis</i>	Penggabungan sumber karbon malat, etanol dan glutamat	50-70

Sumber: Rafiqul dkk., (2005), Safafar dkk., (2016), dan Rodriguez dkk., (2010)

BAB IV

KULTIVASI MIKROORGANISME UNTUK PRODUKSI PROTEIN SEL TUNGGAL

Protein sel tunggal dapat diproduksi oleh mikroorganisme yang berfotosintesis seperti ganggang dan mikroorganisme yang tidak berfotosintesis seperti kapang, bakteri dan khamir. Namun, tidak semua jenis mikroorganisme dapat digunakan dalam produksi protein sel tunggal. Hal tersebut disebabkan oleh adanya persyaratan yang harus dipenuhi dalam memproduksi protein sel tunggal, yaitu tidak menghasilkan senyawa racun, mikroorganisme cepat beradaptasi dengan lingkungan baru, mudah dipanen, serta cepat tumbuh dan berkembang biak.

Produksi protein sel tunggal yang berasal dari mikroorganisme membutuhkan tahapan awal yaitu kultivasi mikroorganisme yang digunakan. Kultivasi merupakan teknik menumbuhkan mikroorganisme pada media kultur dan bertujuan untuk mendapatkan biakan murni. Proses kultivasi mikroorganisme harus dilakukan dengan aseptik sebagai upaya pencegahan adanya kontaminasi mikroorganisme patogen. Langkah awal yang perlu dilakukan sebelum proses kultivasi adalah isolasi bakteri penghasil protein sel tunggal. Setelah isolasi dilakukan dan mendapatkan kultur murni maka proses kultivasi dapat dilakukan dengan alat-alat khusus dan memerlukan media serta faktor lingkungan yang mendukung pertumbuhan bakteri tersebut. Pada sub bab ini akan dijelaskan secara rinci mengenai

tahapan proses isolasi hingga kultivasi mikroorganisme penghasil protein sel tunggal.

A. Teknik Isolasi untuk Mendapatkan Isolat Penghasil Protein Sel Tunggal

Proses isolasi untuk mendapatkan isolat penghasil protein sel tunggal dapat dilakukan dengan beberapa teknik isolasi yaitu:

1. Teknik *streak plate*

Teknik *streak plate* merupakan metode gores dengan menghasilkan sebanyak mungkin pada permukaan media kultur. Pada proses isolasi koloni yang terbentuk pada garis akhir disebabkan oleh sedikitnya mikroorganisme yang dilepaskan pada akhir goresan menyebabkan koloni terpisah dan bergabung menjadi koloni tunggal. Koloni tunggal merupakan koloni yang tumbuh secara terpisah dari satu atau lebih induk.

2. Teknik *spread plate*

Teknik *spread plate* dilakukan dengan menggunakan batang L yang diputarkan sampai sampel mikroorganisme tersebar secara merata. Teknik ini dilakukan dalam proses isolasi mikroorganisme dari lingkungan sebelum didapatkan kultur murni.

3. Teknik *pour plate*

Teknik *pour plate* merupakan teknik yang membutuhkan pengenceran serial kultur. Inokulum yang telah diencerkan lalu ditambahkan media agar dalam kondisi cair kemudian dicampurkan dan dibiarkan mengeras.

B. Media Kultivasi Mikroorganisme

Kultivasi mikroorganisme untuk produksi protein sel tunggal memerlukan media kultur sebagai media pertumbuhan mikroorganisme. Secara

umum, terdapat tiga jenis media pertumbuhan mikroorganisme yang dapat dijadikan sebagai media kultur, yaitu:

1. Media alami merupakan media yang tersusun atas bahan-bahan alami dan komposisi kimianya tidak dapat diketahui secara pasti, seperti *tomato juice agar*.
2. Media semi sintetik merupakan media yang berasal dari bahan alami dan bahan sintetis, seperti *potato dextrose agar* yang mengandung agar, dekstrosa dan ekstrak kentang.
3. Media sintetik merupakan media yang berasal dari bahan sintetis namun jelas komposisinya, seperti media *nutrient agar*.

Berdasarkan kepadatan media, maka media terbagi menjadi tiga macam, yaitu:

1. Media padat digunakan untuk kultur dan isolasi mikroorganisme dalam bentuk padat dan dapat diletakkan pada cawan petri atau tabung reaksi. Berdasarkan bentuknya, media padat dapat berbentuk tegak, miring dan datar.
2. Media cair mengandung nutrisi dengan jumlah tertentu namun tidak mengandung bahan pembentuk agar. Media cair dapat berfungsi sebagai media pertumbuhan mikroorganisme, media fermentasi, dan pengujian lain yang termasuk ke dalam penentuan kualitas metabolisme mikroorganisme dalam menghasilkan protein sel tunggal, seperti kadar gula.
3. Media semi padat merupakan media yang mengandung agar dengan konsentrasi 0,5% dan berfungsi untuk penentuan motilitas mikroorganisme.

Berdasarkan fungsinya, media terbagi menjadi empat, yaitu:

1. Media selektif merupakan media yang digunakan untuk menghambat pertumbuhan mikroorganisme lain dan menumbuhkan mikroorganisme tertentu dengan bahan-bahan khusus yang terkandung pada media. Contoh media selektif adalah *mannitol salt agar*.

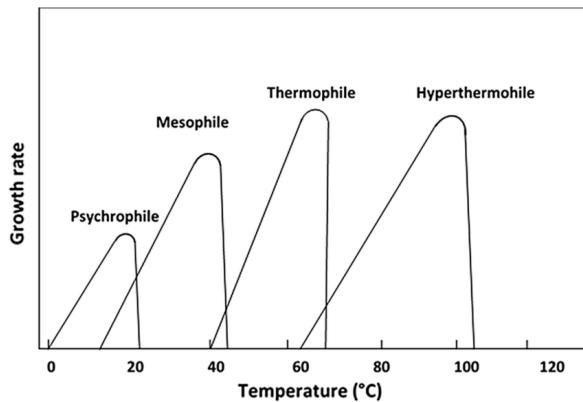
2. Media diferensial merupakan media yang bertujuan untuk dapat membedakan jenis mikroorganisme yang dilihat berdasarkan sifat biokimia dan morfologinya.
3. Media diperkaya merupakan media yang diberikan nutrisi tambahan dan bertujuan untuk dapat menstimulasi pertumbuhan mikroorganisme yang digunakan.
4. Media alternatif merupakan media non-sintetis namun tetap mengandung nutrisi yang dibutuhkan bakteri. Salah satu contoh media alternatif adalah berasal dari limbah cair tahu. Penentuan substrat yang digunakan ditentukan berdasarkan kandungan nutrisi pada substrat tersebut, khususnya unsur karbon dan nitrogen.

C. Faktor Fisik Kultivasi Mikroorganisme

Faktor fisik memiliki peranan utama dalam menentukan keberhasilan kultur mikroorganisme. Faktor fisik kultivasi terdiri dari beberapa aspek yang berpengaruh terhadap proses pertumbuhan, metabolisme dan hasil akhir kultur mikroba. Faktor-faktor fisik tersebut meliputi berikut.

1. Suhu

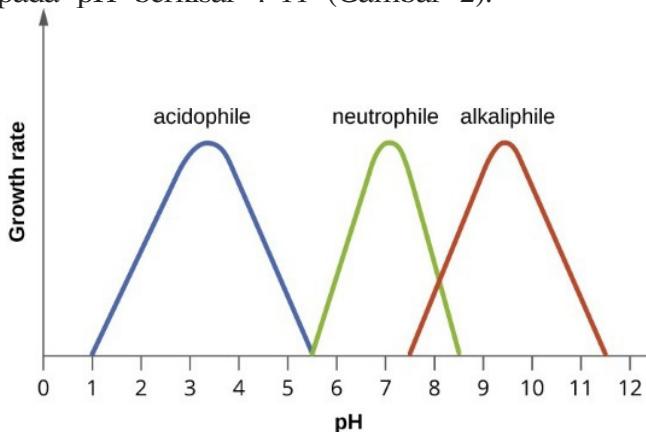
Karakteristik suhu optimal untuk pertumbuhan mikroorganisme sangat bergantung pada jenis mikroorganismenya. Hal tersebut disebabkan oleh suhu optimal yang akan berbanding lurus dengan pertumbuhan mikroorganisme yang dihasilkan. Mikroorganisme terbagi menjadi 4 berdasarkan suhunya yaitu psikofil yang merupakan mikroorganisme yang dapat tumbuh pada suhu antara 0-20°C. Mikroorganisme mesofil merupakan mikroorganisme yang dapat tumbuh pada suhu di atas 18-40°C. Mikroorganisme termofil merupakan mikroorganisme yang dapat tumbuh pada suhu di atas 50°C. Adapun, mikroorganisme hipertermofil merupakan mikroorganisme yang dapat tumbuh pada suhu di atas 80°C (Gambar 1).



Gambar 1. Grafik suhu pertumbuhan mikroorganisme

2. Derajat Keasaman

Derajat keasaman (pH) berbanding lurus juga dengan densitas mikroorganisme yang dihasilkan. Jika dilihat berdasarkan karakteristik kadar pH, maka mikroorganisme dibedakan menjadi beberapa jenis yaitu mikroorganisme asidofilik, neutrofilik dan alkafilik. Mikroorganisme asidofilik merupakan mikroorganisme yang dapat tumbuh pada pH berkisar 1-5. Mikroorganisme neutrofilik merupakan mikroorganisme yang dapat tumbuh pada pH berkisar 5-8. Adapun, mikroorganisme alkafilik merupakan mikroorganisme yang dapat tumbuh pada pH berkisar 7-11 (Gambar 2).



Gambar 2. Grafik derajat keasaman mikroorganisme

3. Oksigen

Kondisi gas berhubungan dengan kebutuhan dan karakteristik mikroorganisme yang terbagi menjadi dua yaitu mikroorganisme aerob (membutuhkan oksigen), anaerob (tidak membutuhkan oksigen), fakultatif aerob (dapat hidup pada kondisi ada atau tidaknya oksigen dan dapat hidup jika kadar oksigen sedikit) dan anaerob obligat (tidak membutuhkan oksigen).

4. Konsentrasi Substrat

Konsentrasi substrat berpengaruh pada pertumbuhan mikroorganisme pada proses kultivasi mikroorganisme. Ketika konsentrasi substrat tinggi maka akan menyebabkan terhambatnya pertumbuhan mikroorganisme dan terganggunya proses metabolisme. Sebaliknya, jika konsentrasi rendah maka akan menyebabkan pertumbuhan mikroorganisme optimal.

D. Alat-Alat Pendukung Kultivasi

Proses kultivasi dapat dilakukan setelah proses isolasi hingga didapatkan kultur murni. Proses kultivasi membutuhkan alat-alat pendukung, yaitu:

1. Tabung Reaksi dan Cawan Petri

Tabung reaksi merupakan alat yang berfungsi sebagai wadah kultivasi mikroorganisme dengan penumbuhan pada media cair atau padat dan dalam bentuk miring atau tegak. Tabung reaksi yang digunakan berdiameter 16 mm. Adapun, cawan petri merupakan wadah datar berbentuk piringan yang digunakan secara umum untuk isolasi dan pengamatan mikroorganisme. Cawan petri yang digunakan berdiameter 90 mm (Gambar 3).



Tabung Reaksi



Cawan Petri

Gambar 3. Tabung reaksi dan cawan petri

2. Ose dan Bunsen

Pemindahan mikroorganisme dari kultur murni ke media kultivasi membutuhkan ose dan bunsen yang bertujuan untuk menjaga kondisi steril selama proses kultivasi mikroorganisme (Gambar 4).



Ose



Bunsen

Gambar 4. Ose dan bunsen

3. Alat Inkubasi

Proses kultivasi didukung oleh proses inkubasi dengan menggunakan inkubator melalui penyetelan suhu dan waktu inkubasi (Gambar 5). Inkubator berfungsi untuk menjaga kondisi lingkungan yang optimal

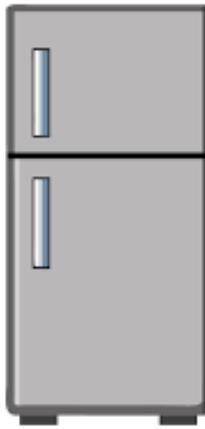
bagi pertumbuhan mikroorganisme dan mencegah kontaminasi dari lingkungan luar guna menjaga kualitas kultur murni yang digunakan.



Gambar 5. Inkubator

4. Kulkas

Pemeliharaan dan penyimpanan stok kultur murni menggunakan kulkas bertujuan untuk menjaga kualitas dan kestabilan dari kultur murni (Gambar 6).



Gambar 6. Kulkas

E. Penyimpanan Mikroorganisme

Penyimpanan mikroorganisme yang memiliki prinsip yaitu menghentikan laju penggunaan energi selama masa simpan. Penyimpanan mikroorganisme dibedakan menjadi dua jenis jika dilihat berdasarkan waktu penyimpanannya, yaitu:

- 1) Penyimpanan jangka pendek umumnya dilakukan untuk keperluan rutin penelitian di laboratorium. Penyimpanan jangka pendek memiliki kekurangan yaitu rentan terkontaminasi. Penyimpanan kultivasi mikroorganisme umumnya dilakukan pada suhu dingin seperti lemari kulkas.
- 2) Penyimpanan jangka panjang yang bertujuan untuk menjaga karakter genetik mikroorganisme. Penyimpanan jangka panjang berkaitan dengan koleksi dan konservasi stok mikroorganisme yang jika suatu saat diperlukan, maka mikroorganisme tersebut dapat ditumbuhkan kembali dan tetap memiliki kinerja seperti semula.

BAB V

PRODUKSI PROTEIN SEL TUNGGAL DARI LIMBAH TAHU

Protein sel tunggal yang dihasilkan dari mikroorganisme bersel satu dapat tumbuh pada substrat yang tidak terpakai atau limbah industri. Dalam banyak kasus, mikroorganisme yang digunakan untuk menghasilkan protein sel tunggal dapat tumbuh dengan cepat dan efektif pada substrat yang murah atau bahkan limbah, seperti limbah pertanian atau produk sampingan industri. Oleh karena itu, pembuatan protein sel tunggal berfokus pada produksi dari limbah cair tahu, serta bakteri *indigenous* yang tumbuh di media ini mampu menghasilkan protein sehingga memberikan alternatif pengolahan limbah yang bermanfaat secara ekonomi dan lingkungan.

Keunggulan utama dari protein sel tunggal adalah kemampuannya untuk diproduksi secara berkelanjutan dan tidak bergantung pada iklim atau musim. Serta memiliki kemampuan untuk mengubah limbah organik menjadi sumber protein, mengurangi pemborosan bahan dan memberikan manfaat ekonomi, sehingga biaya produksinya rendah dan mengurangi dampak lingkungan.

Limbah cair tahu memiliki potensi besar sebagai substrat untuk produksi protein sel tunggal. Kandungan utama dalam limbah cair tahu meliputi protein, nitrogen, dan karbohidrat, yang berfungsi sebagai sumber nutrisi penting bagi mikroorganisme untuk mendukung pertumbuhannya. Limbah cair tahu mengandung total protein sebesar 2,96%, karbohidrat 0,94%, dan lemak sebesar

0,82%. Oleh karena itu, limbah cair tahu dapat digunakan sebagai substrat untuk menghasilkan protein sel tunggal dalam proses fermentasi. Produksi protein sel tunggal meliputi tahapan-tahapan seperti pembuatan media, pembuatan starter, fermentasi, dan pemanenan protein sel tunggal yang akan dijelaskan secara rinci sebagai berikut.

A. Pembuatan Media Fermentasi

Pembuatan media fermentasi dilakukan melalui pengambilan limbah cair tahu dengan kriteria limbah yang masih segar, berwarna kuning keruh dan memiliki bau sedikit asam (Gambar 7). Jangan gunakan limbah yang sudah memiliki bau busuk atau warnanya sudah hampir kecokelatan karena kemungkinan kandungan nutrisinya sudah berbeda atau sudah terfermentasi alami.

Limbah cair tahu yang segar digunakan sebagai substrat utama, kemudian dilakukan penyesuaian pH media menggunakan NaOH 1 M agar pH menjadi 6,5 berdasarkan pH optimal fermentasi agar bakteri dapat tumbuh optimal. Lalu diperlukan penambahan nutrisi anorganik berupa KH_2PO_4 dan $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ masing-masing sebanyak 0,1% dari media fermentasi, campuran yang sudah homogen ini disebut media alternatif.



Gambar 7. Media alternatif limbah cair tahu

Penambahan nutrisi anorganik berfungsi sebagai nutrisi tambahan penyeimbang C/N. KH_2PO_4 berfungsi sebagai sumber fosfor termasuk dalam media pertumbuhan mikroorganisme, sedangkan $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ berfungsi sebagai sumber nitrogen anorganik untuk sintesis protein.

Proses selanjutnya adalah media alternatif dimasukkan ke dalam wadah fermentasi yang tertutup. Lalu, media disterilisasi menggunakan autoklaf pada suhu 121°C selama 15 menit dengan tekanan 1 atm. Media disimpan pada suhu ruang dan pastikan tidak terkontaminasi.

B. Pembuatan Starter Bakteri

Bakteri *indigenous* terpilih sebagai kandidat penghasil protein sel tunggal digunakan sebagai starter. Pembuatan starter diawali dengan peremajaan bakteri menggunakan media NA (*Nutrient Agar*). Setelah peremajaan, isolat bakteri diinokulasi dalam media *Nutrient Broth* (NB) steril sebanyak 1-2 ose di dalam *laminar air flow*. Setelah itu, media diinkubasi dalam *incubator shaker* dengan kecepatan 160 rpm dalam suhu 30°C selama 1 jam. Proses pembuatan starter perlu diuji tingkat kepadatan sel atau *Optical Density* (OD) menggunakan alat Spektrofotometer UV-Vis dengan panjang gelombang 625 nm sampai mencapai nilai absorbansi 0,08-0,1 yang setara dengan $1,5 \times 10^8$ CFU/mL.



Gambar 8. Pembuatan starter, a. proses pengambil starter, b. pengukuran OD

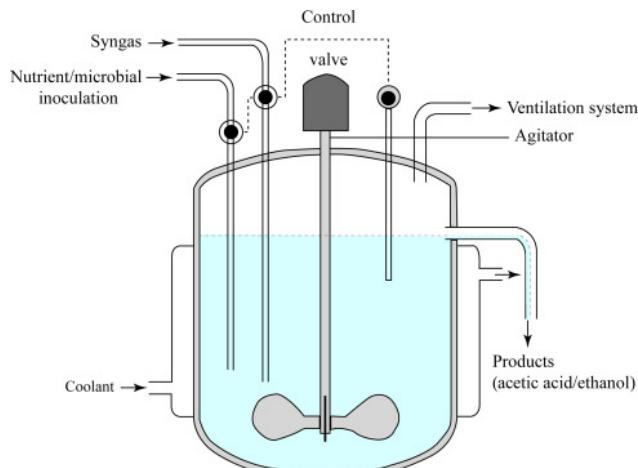
C. Fermentasi

Proses fermentasi dilakukan setelah starter memenuhi nilai absorbansi dan diawali dengan pengambilan inokulum sebanyak 10% dari volume substrat menggunakan mikropipet secara aseptik ke dalam media alternatif yang sudah steril. Proses fermentasi dilakukan selama 4 hari di dalam *incubator shaker* dengan kecepatan 160 rpm dalam suhu 30°C (Gambar 9).

Proses fermentasi juga dapat menggunakan alat lain, seperti fermentor (Gambar 10). Fermentor berfungsi untuk memfasilitasi lingkungan yang tetap untuk pertumbuhan mikroorganisme dan proses biokimia sehingga dapat menghasilkan produk yang diinginkan. Terdapat 3 syarat utama penggunaan fermentor dalam proses fermentasi, yaitu tidak bersifat toksik, tahan terhadap korosi dan dapat menahan tekanan uap.



Gambar 9. Fermentasi dengan menggunakan *incubator shaker*



Gambar 10. Fermentor

Fermentor sering digunakan pada kultur mikroorganisme yang ditumbuhkan pada medium cair. Hal ini dikarenakan proses fermentasi yang dapat dikontrol. Fermentor memiliki beberapa komponen utama, yaitu:

- 1) Tangki sebagai ruang utama mikroorganisme dan media tumbuh
- 2) Sparger yang berfungsi untuk memasok oksigen ke dalam media fermentasi
- 3) Impeller berfungsi sebagai pengaduk media dan mikroorganisme
- 4) Sistem Kontrol yang berfungsi untuk mengontrol parameter fermentasi, seperti suhu, pH dan kecepatan agitasi, dan sistem pengendalian

D. Pemanenan Protein Sel Tunggal

Protein sel tunggal yang dihasilkan terdapat dalam larutan fermentasi sehingga perlu proses pemanenan untuk mendapatkan protein sel tunggal murni. Pemanenan protein sel tunggal dapat dilakukan dengan tiga metode yaitu *drum drying*, *spray drying*, dan *oven drying*.

1. *Drum Drying*

Pengeringan protein sel tunggal murni dengan metode *drum drying* merupakan teknologi pengeringan dengan menggunakan drum silinder berongga yang dipanaskan. Proses yang terjadi adalah media fermentasi ditebarkan di permukaan drum yang berputar. Kemudian menghasilkan bubuk yang dikikis dari permukaan drum.

2. *Spray Drying*

Pengeringan protein sel tunggal murni dengan metode *spray drying* merupakan proses pengeringan dengan menyemprotkan media fermentasi ke udara panas. Penguapan air terjadi secara cepat, sehingga menghasilkan partikel bubuk halus dari protein sel tunggal.

3. *Oven Drying*

Pemanenan protein sel tunggal murni dengan metode *oven drying* diawali dengan pemisahan media dan sel bakteri menggunakan sentrifugasi. Media fermentasi di sentrifugasi dengan kecepatan 10.000 rpm selama 5 menit dalam suhu 4°C sehingga menghasilkan dua fase yaitu pelet dan supernatan (Gambar 11).



Gambar 11. Hasil sentrifugasi (pelet dan supernatan)

Pelet yang diperoleh selanjutnya dikeringkan menggunakan oven. Proses pengeringan dilakukan dalam oven dengan suhu 55 °C hingga mencapai berat kering konstan. Pelet itulah yang disebut sebagai protein sel tunggal.

BAB VI

ASPEK EKONOMI PROTEIN SEL TUNGGAL DARI LIMBAH TAHU

Pemanfaatan limbah tahu untuk produksi protein sel tunggal memberikan keuntungan ekonomi yang signifikan, khususnya di daerah dengan volume produksi tahu yang tinggi. Hal ini tidak hanya berkontribusi terhadap pengelolaan limbah yang berkelanjutan, tetapi juga menghasilkan produk dengan nilai ekonomi tinggi yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber protein alternatif, baik untuk pakan maupun konsumsi manusia. Berikut merupakan uraian aspek ekonomi produksi protein sel tunggal dari limbah tahu.

A. Ketersediaan dan Biaya Bahan Baku

Limbah tahu merupakan produk sisa yang dihasilkan dari proses pengolahan tahu. Terdapat dua jenis limbah tahu yaitu limbah cair dan limbah padat. Limbah cair adalah hasil perendaman, pencucian, perebusan, dan pengepresan tahu. Sementara itu, limbah padat adalah sisa perasan bubur kedelai yang sering disebut dengan ampas kedelai atau ampas tahu. Produksi limbah tahu dari industri pengolahan tahu di Indonesia tergolong tinggi, di mana setiap kapasitas produksi 1 ton kedelai, industri tahu mampu menghasilkan limbah cair sekitar 8.500 L/hari dan limbah padat sekitar 1.4 ton/hari.

Limbah cair tahu sering kali dibuang karena memiliki bau yang menyengat sehingga umumnya dapat diperoleh secara cuma-cuma. Sementara itu, limbah ampas tahu dijual dengan harga yang relatif murah yaitu Rp20.000/karung kapasitas 40 kg atau sekitar Rp400-500/kg berat basah. Hal ini memberikan keuntungan ekonomis yang signifikan karena bahan baku utama untuk produksi protein sel tunggal tersedia secara melimpah dan murah.

B. Biaya Produksi

Biaya produksi protein sel tunggal cenderung lebih rendah dibandingkan dengan sumber protein konvensional dikarenakan beberapa faktor seperti proses produksi yang lebih cepat, penggunaan lahan yang efisien, dan sumber bahan baku. Protein sel tunggal diproduksi oleh mikroorganisme seperti bakteri, kapang dan khamir yang memiliki laju pertumbuhan cepat sehingga proses produksi lebih cepat dan dapat mengurangi sumber daya yang dibutuhkan. Mikroorganisme dapat ditumbuhkan dalam jumlah besar melalui proses fermentasi berkelanjutan dengan menggunakan lahan yang relatif lebih kecil dibandingkan produksi protein konvensional.

Berbagai macam bahan baku dapat digunakan sebagai substrat dalam protein sel tunggal termasuk residu dan produk samping pengolahan pangan bernilai rendah seperti limbah tahu. Pemanfaatan limbah tahu dalam produksi protein sel tunggal dapat mengurangi biaya terkait penanganan, pemrosesan, dan pembuangan limbah yang cukup tinggi dan sering kali menjadi beban operasional.

C. Nilai Tambah dan Harga Pasar

Konversi limbah tahu menjadi protein sel tunggal menghasilkan peningkatan nilai ekonomi yang sangat signifikan. Limbah tahu yang umumnya hanya dibuang atau digunakan sebagai pakan

ternak dengan nilai ekonomi rendah dapat diubah menjadi produk protein berkualitas tinggi yaitu protein sel tunggal.

Protein sel tunggal merupakan biomassa atau sel mikroorganisme kering yang memiliki kandungan protein tinggi. Selain protein, protein sel tunggal juga mengandung lemak, karbohidrat, mineral, vitamin, dan asam nukleat yang menjadikan nilai gizi protein sel tunggal jauh lebih tinggi dibandingkan protein konvensional.

Pasar global untuk protein sel tunggal mencapai USD 10,36 miliar pada tahun 2023 dan diperkirakan akan tumbuh menjadi USD 22,49 miliar pada tahun 2032. Pertumbuhan ini didorong oleh meningkatnya permintaan untuk alternatif protein berkelanjutan di seluruh sektor makanan, pakan ternak, dan industri.

D. Aplikasi Industri

Protein sel tunggal memiliki kandungan gizi tinggi meliputi protein, vitamin esensial, asam amino, mineral, asam nukleat, dan lipid. Hal tersebut membuat protein sel tunggal memiliki potensi untuk diaplikasikan pada berbagai bidang industri seperti makanan, pakan ternak, dan bahan baku industri kimia.

1. Industri Pangan

Protein sel tunggal merupakan bahan yang banyak digunakan dalam industri pangan dikarenakan kandungan protein dan nilai gizinya yang tinggi. Protein sel tunggal dapat diaplikasikan pada produksi makanan dan minuman berprotein tinggi. Protein sel tunggal telah ditambahkan ke dalam berbagai produk makanan seperti protein bar, minuman, dan protein bubuk. Lebih lanjut, protein sel tunggal berfungsi sebagai komponen utama dalam pembuatan pengganti daging seperti burger nabati, sosis vegetarian, dan pengganti ayam.

Protein sel tunggal merupakan sumber asam amino esensial, vitamin, dan nutrisi penting lainnya yang menjadikannya sebagai

bahan yang optimal dalam produksi suplemen makanan dan pangan fungsional. Oleh karena itu, protein sel tunggal merupakan sumber protein alternatif yang menjanjikan pada industri pangan.

2. Industri Pakan

Protein sel tunggal telah banyak digunakan sebagai alternatif pakan hewan menggantikan bungkil kedelai dan tepung ikan. Hal ini dikarenakan kandungan proteinnya yang tinggi, profil asam amino yang seimbang, dan produksinya yang berkelanjutan. Penambahan protein sel tunggal dalam pakan unggas telah terbukti dapat meningkatkan laju pertumbuhan dan kesehatan unggas.

Penggunaan pakan akuakultur berbasis protein sel tunggal dapat mendukung pertumbuhan dan kesehatan ikan dan udang. Pada pakan ternak, protein sel tunggal berfungsi untuk meningkatkan asupan protein yang memfasilitasi pertumbuhan sapi, babi, dan hewan ternak lainnya. Aplikasi protein sel tunggal dalam industri pakan menggambarkan bahwa protein sel tunggal memberikan manfaat lingkungan dan ekonomi bagi industri peternakan, unggas, dan akuakultur.

3. Industri Bahan Baku

Tingginya kadar protein pada protein sel tunggal menjadikannya sebagai bahan baku yang sering digunakan untuk memproduksi berbagai produk bernilai yang memiliki protein dan karbohidrat tinggi. NovoNutrients memproduksi NovoMeal yaitu protein sel tunggal yang berasal dari emisi karbon dioksida industri. NovoMeal merupakan bahan baku fermentasi untuk produksi bahan protein berkelanjutan. Protein ini digunakan dalam pakan ternak, makanan nabati, dan pakan akuakultur.



Gambar 12. NovoMeal

Selain itu, Mango materials menggunakan protein sel tunggal turunan metana untuk memproduksi polihidroksialcanoat (PHA) yaitu biopolimer untuk produksi plastik biodegradable.

E. Prospek Regional

Secara geografis, industri protein sel tunggal terbagi ke dalam beberapa wilayah, yaitu Amerika Utara, Amerika Latin, Eropa Barat, Eropa Timur, Asia Pasifik (tidak termasuk Jepang), Timur Tengah, dan Afrika. Amerika Utara serta Eropa Barat diproyeksikan menyumbang pangsa pendapatan yang signifikan di pasar global. Hal ini disebabkan oleh perubahan pola hidup masyarakat dan meningkatnya kebutuhan akan produk pangan bernilai tambah, yang mendorong konsumsi makanan dengan kandungan gizi yang lebih tinggi di kawasan tersebut.

Wilayah Asia Pasifik dan Timur Tengah diprediksi akan memberikan peluang pertumbuhan yang besar bagi industri protein sel tunggal. Kawasan ASEAN diperkirakan akan meraih pangsa pasar terbesar dalam pemanfaatan protein sel tunggal sebagai sumber pakan bioprotein alternatif untuk mendukung peningkatan kinerja sektor akuakultur. Perusahaan seperti Feedkind yang dikembangkan oleh Calysseco semakin dikenal karena kontribusinya dalam memperkuat

ketahanan pangan di tingkat regional. Stabilitas arus pendapatan perusahaan tersebut turut mendorong terbentuknya pasar yang berkelanjutan bagi pakan bioprotein.

Pasar protein sel tunggal di kawasan ASEAN didominasi oleh Malaysia dengan nilai mencapai USD 9,7 juta pada tahun 2020. Pertumbuhan ini dipicu oleh peningkatan pengeluaran konsumen seiring bertambahnya jumlah populasi di wilayah tersebut. Negara-negara utama seperti Tiongkok, India, dan Vietnam menyumbang sekitar setengah dari total produksi akuakultur, sehingga pemanfaatan protein sel tunggal dipandang sebagai solusi alternatif pengganti tepung ikan.

F. Kelayakan Ekonomi

Pengembangan protein sel tunggal merupakan solusi inovatif untuk memenuhi kebutuhan protein global yang terus meningkat. Selain sebagai sumber protein alternatif, protein sel tunggal juga berpotensi menjadi produk samping yang bernilai ekonomi tinggi, sekaligus menawarkan metode efektif untuk mengurangi biaya penanganan, pemrosesan, dan pembuangan limbah. Hal ini menjadikan protein sel tunggal sebagai opsi yang menarik bagi industri pangan dan lingkungan.

Perkembangan terkini dalam produksi protein sel tunggal juga dipengaruhi oleh isu-isu lingkungan yang semakin mendesak, terutama terkait dengan upaya mitigasi perubahan iklim. Pemanfaatan gas rumah kaca seperti CO₂ dan metana dalam produksi protein sel tunggal alga dan bakteri menunjukkan potensi teknologi ini dalam mengurangi emisi gas berbahaya. Meskipun proses ini mungkin belum layak secara ekonomi dalam jangka pendek karena tantangan dalam produksi skala besar, namun prospek jangka panjangnya tetap menjanjikan.

Keberhasilan pengembangan protein sel tunggal di masa depan akan bergantung pada kemampuan untuk mengatasi hambatan

teknis dan ekonomi, serta memanfaatkan insentif lingkungan seperti premi hijau yang dapat meningkatkan kelayakan ekonomi protein sel tunggal.

Selain memberikan manfaat bagi lingkungan, faktor utama dalam menilai kelayakan ekonomi produksi protein sel tunggal mencakup total biaya produk, kebutuhan investasi modal, serta tingkat profitabilitas. Produksi protein sel tunggal berbasis jamur, sekitar 62% dari total biaya berasal dari bahan baku, sedangkan 19% terkait dengan proses produksi. Biaya bahan baku berkisar antara 35–55% dari total biaya manufaktur, sementara biaya operasional termasuk tenaga kerja, energi, dan bahan habis pakai mencapai 45–55%. Pemanfaatan biomassa limbah umumnya dilakukan sebagai strategi untuk menekan biaya penggunaan substrat.

Skala produksi juga berperan penting dalam menilai kelayakan ekonomi produksi protein sel tunggal. Terdapat hubungan empiris yang menunjukkan keterkaitan antara besarnya skala produksi dan biaya yang dikeluarkan. Proses produksi berkelanjutan terbukti memberikan keuntungan terbesar, dan sebagian besar penerapan protein sel tunggal pada skala industri telah dirancang dengan pendekatan berkelanjutan.

BAB VII

MANFAAT NUTRISI PROTEIN SEL TUNGGAL DARI LIMBAH TAHU

Protein sel tunggal pada dasarnya terdiri dari protein, lemak, karbohidrat, air dan unsur-unsur lain. Protein sel tunggal berperan dalam pengolahan limbah, karena bahan limbah digunakan sebagai substrat. Untuk mendapatkan nilai gizi protein sel tunggal, banyak faktor yang harus di pertimbangkan, termasuk komposisi nutrisi, profil asam amino dan kandungan vitamin. Kandungan komposisi protein sel tunggal ini bergantung pada sifat substrat dan juga mikroorganisme yang digunakan.

Beberapa mikroorganisme selama adanya produksi protein sel tunggal menghasilkan sejumlah besar vitamin yang tidak dapat diproduksi oleh individu inang (manusia dan hewan) dalam jumlah yang cukup. Mikroorganisme dari limbah tahu yang dipilih untuk protein sel tunggal produksi tentunya harus memiliki profil nutrisi yang kuat. Mencakup kandungan protein tinggi, asam amino esensial, dan nutrisi penting lainnya yang tentunya menjadikan protein sel tunggal sebagai sumber protein yang berharga.

Penggunaan mikroorganisme dan substrat yang berbeda menghasilkan rasio asam amino yang bervariasi dalam produk protein sel tunggal. Para ilmuwan dapat menambahkan asam amino yang lebih berharga ke dalam protein melalui rekayasa genetika bertujuan untuk lebih bergizi dibandingkan protein tradisional.

A. Komposisi Gizi Protein Sel Tunggal yaitu Protein

Protein sel tunggal merupakan produk biomassa protein tinggi yang berasal dari mikroorganisme. Mikroorganisme penghasil protein sel tunggal dapat tumbuh pada limbah yang memiliki unsur karbon dan nitrogen yang biasanya terdapat dalam limbah hasil industri. Hasil fermentasi limbah tersebut akan menghasilkan produk dengan kandungan gizi tinggi yaitu protein 60-82%.

Protein sel tunggal juga terdiri dari karbohidrat, asam nukleat, lemak, mineral dan vitamin. Fermentasi akan meningkatkan ketersediaan nutrisi dan menurunkan kadar anti nutrisi, sehingga memperbaiki kualitas gizi protein sel tunggal dibanding substrat aslinya. Selain itu, protein sel tunggal juga memiliki profil asam amino yang sangat baik, yang membuatnya lebih bermanfaat secara gizi dibandingkan sumber protein konvensional. Nilai gizi protein sel tunggal bervariasi yang tentunya tergantung pada mikroorganisme maupun substrat yang digunakan (Tabel 3, 4 dan 5).

B. Profil Asam Amino Esensial Protein Sel Tunggal

Protein sel tunggal mengandung semua asam amino esensial yang berperan penting dalam menjadikan protein sel tunggal sebagai sumber protein alternatif berkualitas tinggi baik untuk manusia maupun untuk hewan. Profil asam amino protein sel tunggal sangat tergantung pada mikroorganisme dan jenis substrat yang digunakan.

Profil asam amino digunakan untuk menilai kualitas dan kuantitas gizi dari protein yang dihasilkan. Profil asam amino menjadi dasar bisa atau tidaknya protein tersebut untuk dijadikan sebagai protein alternatif. Setiap asam amino memiliki kuantitas berbeda-beda bergantung pada mikroorganisme yang digunakan.

Secara umum, profil asam amino terbagi menjadi 2 jenis, yaitu esensial dan non-esensial. Asam amino esensial terbagi menjadi 9 dengan masing-masing memiliki peran penting sebagai berikut:

1. Lisin, diperlukan untuk membantu pembentukan antibodi, hormon, dan enzim.
2. Leusin, membantu sintesis protein dan hormon pertumbuhan.
3. Treonin, membantu dalam meningkatkan fungsi sistem imun.
4. Valin, memainkan peran penting dalam meningkatkan pertumbuhan otot.
5. Metionin, mengontrol serangan bakteri patogen.
6. Fenilalanin, meningkatkan daya ingat membantu menjaga kesehatan sistem saraf.
7. Histidin, membantu untuk pembentukan sel darah merah (eritrosit) dan sel darah putih (leukosit), serta berbagai proses enzimatik.
8. Triptofan, bertanggung jawab atas pembentukan vitamin B3 dan hormon serotonin.
9. Isoleusin, memainkan peran penting dalam pembentukan hemoglobin dan mengangkut oksigen dari paru-paru ke berbagai bagian, dan juga merangsang pankreas untuk menyintesis insulin.

Selain itu, kandungan asam amino esensial ini memenuhi kebutuhan nutrisi harian serta mendukung pertumbuhan dan juga perbaikan jaringan tubuh, karena struktur protein sel tunggal sendiri dapat dibentuk oleh mikroorganisme yang memproduksi biomassa kaya akan protein dan asam amino selama proses fermentasi. Adanya kandungan yang lengkap ini menjadi dasar mengapa protein sel tunggal dari limbah tahu sangat potensial sebagai solusi pangan fungsional dan juga berkelanjutan.

C. Vitamin dan Mineral dalam Protein Sel Tunggal

Protein sel tunggal dalam limbah tahu yang dihasilkan oleh mikroorganisme biasanya mengandung vitamin B12 dalam jumlah yang cukup signifikan. Bakteri dilaporkan memiliki kandungan vitamin B12 dan vitamin A yang tinggi. Vitamin yang paling umum ditemukan dalam protein sel tunggal adalah riboflavin (B2), tiamin (B1), piridoksin (B6), niasin, kolin, asam folat (B9), asam pantotenat, biotin, asam para amino, benzoate, inositol dan B12.

Selain itu juga, protein sel tunggal mengandung mineral penting seperti zat besi, seng, magnesium dan fosfor yang berperan dalam pembentukan hemoglobin, sistem imun, dan juga kesehatan tulang. Adanya kombinasi vitamin dan mineral yang tinggi diperlukan dalam proses metabolisme sehingga keduanya berpengaruh terhadap pertumbuhan.

Beberapa mikroorganisme selama proses produksi protein sel tunggal tentunya akan menghasilkan vitamin yang tidak dapat diproduksi oleh individu inangnya dalam jumlah yang memadai. Pada produksi protein sel tunggal juga membutuhkan kadar air yang rendah dibandingkan dengan sumber nabati. Tidak seperti sumber protein nabati, protein sel tunggal tidak bergantung pada variasi lingkungan dan iklim yang juga dapat diproduksi sepanjang tahun karena mikroorganisme tersedia sepanjang waktu.

D. Manfaat Nutrisi Protein Sel Tunggal bagi Pakan Ternak

Protein sel tunggal merupakan bahan yang banyak digunakan dalam industri pangan, terutama karena terdapat kandungan protein dan nilai gizi yang dinilai cukup tinggi, profil asam amino yang seimbang, dan metode produksi yang berkelanjutan. Hal ini

memberikan kemampuan suatu produksinya yang berkelanjutan, menjadikannya kandidat yang cocok dalam jumlah besar terhadap aplikasi industri, termasuk makanan, pakan ternak, dan bahan baku untuk fermentasi mikroorganisme.

Protein tidak hanya menyediakan komponen gizi dalam sistem pangan tetapi juga menjalankan sejumlah fungsi yang lain. Dengan profil nutrisi yang sangat baik dan juga kapasitas untuk menghasilkan massa otot protein sel tunggal yang ditambahkan ke dalam pakan akuakultur sebagai pengganti tepung ikan. Proses fermentasi skala besar telah mencapai kemajuan yang luar biasa, sehingga mikroorganisme tidak hanya dapat menghasilkan protein sel tunggal tetapi juga dapat mensintesis protease hidrolitik spesifik dan faktor nutrisi lainnya.

Ekspresi sistem enzim hidrolitik yang melimpah mengurangi kandungan protein besar dalam protein sel tunggal, yang juga dapat meningkatkan daya cerna ketika digunakan sebagai produk pakan, seperti pakan unggas atau pakan ikan. Hal ini disebabkan oleh kandungan asam amino esensial, vitamin, karbohidrat dan protein, sehingga protein sel tunggal cocok digunakan sebagai pakan ikan atau hewan. Pemanfaatan protein sel tunggal sebagai pakan hewan juga berfungsi untuk dapat meningkatkan pertumbuhan melalui kandungan nutrisi serta proses metabolisme dan meningkatkan kekebalan tubuh hewan.

Penambahan protein sel tunggal telah terbukti meningkatkan laju pertumbuhan dan meningkatkan kesehatan ternak secara keseluruhan. Hal ini disebabkan karena adanya kontribusi terhadap peningkatan efisiensi pakan dan produksi daging berkualitas lebih tinggi. Selain itu, protein sel tunggal yang digunakan dalam pakan hewan ternak, bertujuan untuk meningkatkan asupan protein dan memfasilitasi pertumbuhan hewan ternak seperti sapi, ayam dan hewan ternak lainnya. Dalam hal ini, pemanfaatan protein sel tunggal dalam pakan ternak tentunya membantu mengurangi

dampak lingkungan dari peternakan, sekaligus memastikan adanya protein yang berkualitas tinggi.

Selain itu, penerapan protein sel tunggal dalam formulasi tepung ikan juga muncul sebagai strategi penting untuk dapat memenuhi kebutuhan protein akuakultur yang terus meningkat. Protein sel tunggal sudah banyak diteliti dan diintegrasikan ke dalam pakan akuakultur. Pemanfaatan protein sel tunggal dalam akuakultur berdampak pada pengurangan biaya pakan ikan. Protein sel tunggal yang berasal dari mikroorganisme merupakan pengganti ideal untuk tepung ikan dalam akuakultur. Protein sel tunggal yang menawarkan kadar protein yang lebih tinggi dengan profil asam amino dan kandungan nukleotida yang dinilai cukup unggul.

Penggunaan protein sel tunggal ke dalam pakan ternak dan pakan ikan bertujuan untuk mengurangi biaya yang terkait dengan impor sumber protein. Adanya kandungan asam amino esensial berupa lisin terhadap metionin, parameter tersebut menjadi nutrisi penting dalam diet unggas, sebanding dengan yang ditemukan dalam tepung ikan yang menggunakan protein sel tunggal.

BAB VIII

TANTANGAN DAN HAMBATAN PRODUKSI PROTEIN SEL TUNGGAL

Protein sel tunggal memiliki ciri yang menarik sebagai protein alternatif jika dilihat berdasarkan kandungan nutrisinya. Protein sel tunggal terdiri dari karbohidrat, lemak, protein dan unsur-unsur lain seperti kalium, fosfor serta asam amino esensial. Pemanfaatan protein sel tunggal menggunakan mikroorganisme memiliki beberapa keunggulan dibandingkan protein konvensional, yaitu proses produksi cepat dan dapat ditumbuhkan dalam lingkungan terkontrol dengan ruang yang lebih sedikit, sehingga dapat dilakukan sepanjang tahun.

Meskipun demikian, produksi protein sel tunggal juga menimbulkan beberapa tantangan dan hambatan, yaitu pengolahan hilir protein sel tunggal, biaya produksi yang cukup tinggi, tantangan regulasi dan standar keamanan; yang akan dibahas secara khusus pada bab ini.

A. Tantangan Produksi Protein Sel Tunggal Berdasarkan Pemilihan Sumber Protein

Pada dasarnya, protein sel tunggal yang berasal dari mikroorganisme memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan protein yang berasal dari sumber protein konvensional, khususnya jika dilihat berdasarkan kualitas gizi, metabolit tambahan yang dihasilkan, kemudahan produksi dan perbanyakannya. Namun, salah satu hal

yang memengaruhi kuantitas dan kualitas nutrisi yang dihasilkan dari protein sel tunggal adalah berdasarkan jenis mikroorganisme yang digunakan untuk produksi protein sel tunggal.

Beberapa mikroorganisme yang digunakan untuk produksi protein sel tunggal, yaitu bakteri, alga dan jamur. Bakteri menghasilkan jumlah protein tertinggi berdasarkan berat kering, namun menghasilkan kandungan asam nukleat yang tinggi dan toksin. Hal tersebut disebabkan oleh tingginya asam nukleat yang dihasilkan berbanding lurus dengan kadar toksin yang dihasilkan, sehingga akan berdampak negatif ketika pemanfaatan yang tidak tepat. Oleh karena itu, penggunaan mikroorganisme untuk protein sel tunggal didominansi oleh pemanfaatan jamur dan alga. Di sisi lain, alga dan jamur memiliki laju pertumbuhan terendah dibandingkan bakteri yang memiliki laju pertumbuhan tercepat sekitar 20 menit.

Jika dikorelasikan dengan beberapa syarat pemilihan mikroorganisme untuk protein sel tunggal yaitu laju pertumbuhan tinggi, waktu generasi singkat, kebutuhan ruang pertumbuhan yang minim, proses produksi dapat dilakukan secara berkelanjutan dan nutrisi yang murah. Maka, hal tersebut berbanding terbalik jika mengutamakan alga dan jamur sebagai mikroorganisme utama. Oleh karena itu, diperlukan standar penelitian lebih spesifik dalam penentuan mikroorganisme untuk protein sel tunggal secara benar dan tepat.

B. Tantangan Produksi Protein Sel Tunggal Berdasarkan Pengolahan Hilirisasi

Proses hilirisasi merupakan tahap pengolahan setelah fermentasi mikroorganisme yang bertujuan untuk mendapatkan produk akhir PST dengan kualitas dan ciri yang sesuai untuk dikonsumsi. Tahap ini penting dilakukan guna meningkatkan nilai gizi dan keamanan protein sel tunggal.

Berdasarkan prosesnya, setelah proses fermentasi biomassa mikroorganisme akan dipisahkan dari media kultur untuk menghilangkan larutan fermentasi. Pemisahan ini akan menghasilkan endapan biomassa yang mengandung protein sel tunggal bercampur dengan komponen lain, seperti metabolit mikroorganisme. Setelah itu, endapan hasil pemisahan dilakukan pengeringan. Pada tahap ini, kandungan asam nukleat yang tinggi akan dikurangi melalui perlakuan kimia agar aman untuk dikonsumsi. Setelah itu, protein diekstraksi dan dimurnikan untuk mendapatkan bahan protein yang berkualitas tinggi.

Berdasarkan proses tersebut, pengolahan hilir protein sel tunggal memerlukan investasi modal yang besar. Serangkaian proses yang melibatkan konsentrasi biomassa sel, ekstraksi, dan pemurnian protein tentu memerlukan sumber daya yang signifikan. Contohnya, protein sel tunggal yang berasal dari bakteri perlu dimurnikan untuk menghilangkan kandungan asam nukleat dalam biomassa sel karena dapat mengakibatkan implikasi kesehatan yang serius. Hal yang sama juga terjadi dengan protein sel tunggal yang berasal dari alga dan jamur memiliki dinding sel tebal dan tidak dapat dicerna oleh hewan, sehingga perlu dihilangkan untuk meningkatkan kadar protein protein sel tunggal.

C. Tantangan Produksi Protein Sel Tunggal Berdasarkan Aspek Ekonomi

Biaya produksi protein sel tunggal bernilai lebih tinggi jika dibandingkan dengan sumber protein konvensional, seperti tepung ikan. Hal tersebut disebabkan oleh kebutuhan operasional yang tinggi, seperti sistem sterilisasi yang berfungsi untuk mencegah kontaminasi dari mikroorganisme lain, bioreaktor yang berfungsi untuk menumbuhkan mikroorganisme dan proses hilir berupa unit pemurnian serta pengeringan. Selain itu, diperlukan juga biaya energi yang berfungsi untuk mengoperasikan sistem operasional tersebut.

Saat ini, produksi protein sel tunggal didominansi dengan skala yang lebih kecil, sehingga biaya distribusi protein sel tunggal akan jauh lebih tinggi dibandingkan protein konvensional. Fenomena ini dikenal dengan ketidakmampuan mencapai efisiensi skala. Dalam aspek ekonomi, protein sel tunggal memiliki biaya modal dan operasional yang tinggi, sehingga tidak dapat terdistribusi secara efektif. Oleh karena itu, harga jualnya tidak kompetitif dengan protein konvensional lainnya. Tantangan ekonomi yang kompleks dapat menghambat produksi massal. Selain itu, biaya produksi yang tinggi menyebabkan protein sel tunggal sulit bersaing dengan sumber protein konvensional yang sudah ada.

D. Tantangan Produksi Protein Sel Tunggal Berdasarkan Standar Keamanan dan Regulasinya

Pemanfaatan protein sel tunggal sebagai pakan dan pangan memiliki tantangan tersendiri untuk dapat memenuhi standar keamanan yang berlaku. Tantangan keamanan yang didasarkan pada pemanfaatan sebagai bahan pakan, yaitu:

1. Toksisitas dan Kontaminasi

Tantangan utama dari pemanfaatan protein sel tunggal sebagai bahan pakan adalah memastikan bahwa protein sel tunggal yang diproduksi tidak mengandung racun atau kontaminan berbahaya bagi hewan. Oleh karena itu, mikroorganisme yang digunakan harus terbukti aman.

Di samping itu, substrat dalam produksi protein sel tunggal yang berasal dari limbah pertanian haruslah bersifat steril terhadap residu pestisida dan kontaminasi mikotoksin. Hal tersebut disebabkan oleh kontaminasi residu pestisida limbah pertanian dapat bersifat

toksik bagi mikroorganisme karena dapat menghambat pertumbuhan mikroorganisme. Selain itu, limbah pertanian bersifat rentan terhadap kontaminasi jamur yang dapat menghasilkan mikotoksin, seperti aflatoksin yang melemahkan sistem imun hewan, sehingga rentan terhadap infeksi dan penyakit.

2. Regulasi

Proses distribusi dan konsumsi protein sel tunggal dalam bidang pakan dan pangan perlu memenuhi berbagai uji keamanan yang ketat oleh otoritas tertentu, seperti Badan Pengawasan Obat dan Makanan (BPOM) dan Badan Standarisasi Nasional (BSN). Proses ini tidak hanya memakan waktu, namun juga memerlukan biaya besar untuk berbagai pengujian yang menyangkut toksisitas, nutrisi dan kualitas protein sel tunggal yang akan didistribusikan.

Dalam skala global, Uni Eropa, misalnya, memiliki regulasi yang ketat mengenai pangan. Hingga saat ini, mikroorganisme masih sekadar dimanfaatkan untuk bahan pakan hewan, dan semakin berpotensi untuk dikembangkan sebagai bahan makanan manusia. Meski demikian, standar prosedur dan indikator umum untuk menentukan kelayakan protein sel tunggal masih belum ditetapkan. Hal demikian mengingat masih berlangsungnya perdebatan: apakah regulasi penentuan kelayakan protein sel tunggal akan berfokus pada produk hasil finalnya, atau justru berfokus pada penggunaan substrat pertumbuhan pada tahap produksi.

Di Indonesia, regulasi penetapan protein sel tunggal sebagai bahan pakan ditetapkan melalui Standar Nasional Indonesia (SNI) yang diperoleh melalui BSN. Singkatnya, SNI 01-3136-1992 menetapkan mengenai beberapa kriteria mutu yang harus dipenuhi protein sel tunggal sebagai bahan pakan, yaitu:

Tabel 6. Kriteria mutu protein sel Tunggal sebagai bahan baku pangan berdasarkan SNI 01-3136-1992

No.	Kriteria Uji	Satuan	Syarat
1	Air (Maksimal)	% b/b	10
2	Protein (N X 6,25) (Minimal)	% b/b	40
3	Abu (Maksimal)	% b/b	9
4	Serat Kasar (Maksimal)	% b/b	3
5	Cemaran Mikroba:		
	Angka lempeng total (Maksimal)	Kol/g	7,5 x 10 ³
	Kapang (Maksimal)	Kol/g	50
	<i>Salmonella</i> sp.		Negatif/25 g

Di sisi lain, tantangan keamanan produksi protein sel tunggal yang didasarkan pada pemanfaatan sebagai bahan pangan meliputi:

a. Kandungan Asam Nukleat Tinggi

Salah satu tantangan di bidang pangan dari pemanfaatan mikroorganisme sebagai bahan pangan adalah tingginya asam nukleat yang dihasilkan. Tingginya asam nukleat pada protein sel tunggal dapat meningkatkan kadar asam urat dalam tubuh manusia dan berpotensi menyebabkan penyakit asam urat. Oleh karena itu, diperlukan tahap pengolahan hilir yang efektif untuk mengurangi kadar asam nukleat, sehingga protein sel tunggal yang dihasilkan dapat menjadi pangan yang aman untuk dikonsumsi.

b. Standar Regulasi

Pemanfaatan protein sel tunggal sebagai bahan pangan memiliki beberapa kriteria khusus, misalnya berdasarkan Peraturan Menteri Pertanian Nomor 53/PERMENTAN/KR.040/12/2018 yaitu:

- 1) Persyaratan keamanan pangan adalah tidak mengandung cemaran biologis, kimia, dan tidak menggunakan bahan sampingan yang dilarang penggunaannya

- 2) Bahan pangan yang dihasilkan telah memenuhi 5 kriteria utama, yaitu:
 - a) Proses budidaya yang baik (*Good Agricultural Practices*)
 - b) Proses penanganan pasca-panen yang baik (*Good Handling Practices*)
 - c) Proses pengolahan yang baik (*Good Manufacturing Practices*)
 - d) Proses distribusi yang baik (*Good Distributing Practices*)
 - e) Proses ritel yang baik (*Good Retailing Practices*)
- 3) Protein sel tunggal yang akan diedarkan menggunakan kemasan dengan bahan yang melindungi dan tidak mengontaminasi protein sel tunggal. Selain itu, protein sel tunggal yang akan didistribusikan harus memiliki label yang tidak mudah lepas, luntur, atau rusak.

Kriteria-kriteria tersebut berperan sebagai keamanan pangan yang merupakan upaya untuk mencegah pangan dari kemungkinan cemaran biologis dan kimia yang dapat mengganggu, merugikan dan membahayakan kesehatan manusia serta tidak bertentangan dengan agama dan budaya masyarakat, sehingga aman untuk dikonsumsi.

Proses distribusi protein sel tunggal sebagai pangan harus melewati serangkaian pemeriksaan laboratorium sampai dengan pendaftaran dan izin edar produk protein sel tunggal. Hal tersebut menjadi suatu tantangan besar karena kompleksitas regulasi sampai yang linier dengan tingginya biaya yang diperlukan, sehingga diperlukan konsistensi dalam penanganannya.

E. Solusi Tantangan dan Hambatan Produksi Protein Sel Tunggal

Beberapa tantangan yang menjadi hambatan terhadap proses produksi protein sel tunggal, nyatanya dapat diatasi melalui beberapa cara, yaitu:

1. Pemilihan Mikroorganisme

Pemilihan mikroorganisme kandidat penghasil protein sel tunggal dapat dilakukan dengan berbagai cara berikut ini.

- a. Penggunaan pendekatan rekayasa genetika untuk meningkatkan strain potensial dengan karakteristik yang diinginkan, misalnya menghilangkan gen yang menghasilkan toksin.
- b. Pemilihan mikroorganisme yang tepat, yaitu mikroorganisme yang memiliki laju pertumbuhan cepat sehingga dapat menekan risiko kontaminasi. Selain itu, pemilihan mikroorganisme yang tepat berguna untuk mengetahui senyawa yang dihasilkan bersifat toksin untuk kontaminan dan protein sel tunggal yang dihasilkan.
- c. Melakukan uji toksikologi secara menyeluruh terhadap protein sel tunggal yang dihasilkan untuk memastikan tidak adanya kontaminan, toksin dan unsur berbahaya lainnya.

2. Kontaminasi Mikroorganisme

Kontaminasi mikroorganisme dapat diatasi dengan beberapa cara sebagai berikut.

- a. Pemantauan secara *real-time* terhadap perubahan pH, kadar oksigen atau densitas sel yang dapat mengindikasi adanya kontaminan.
- b. Melakukan sistem produksi secara tertutup guna mengurangi risiko kontaminasi dari lingkungan luat.
- c. Proses sterilisasi yang ketat, seperti menggunakan sarung tangan, masker dan pakaian pelindung untuk menghindari kontaminasi asing.

3. Biaya Produksi Protein Sel Tunggal

Biaya produksi protein sel tunggal yang tinggi dapat ditekan melalui beberapa cara, yaitu:

- a. Optimasi substrat yaitu dengan menggunakan bahan baku yang murah dan melimpah, misalnya limbah cair tahu.
- b. Menyederhanakan dan mengurangi proses hilir yang diperlukan agar protein sel tunggal dapat diproses dengan mudah.
- c. Melakukan fermentasi skala besar dapat dilakukan dengan menginvestasikan biaya pada suatu sistem besar dengan kapasitas yang lebih tinggi.
- d. Menggunakan sistem *biorefinery*, yaitu menggabungkan produksi protein sel tunggal dengan produk samping lain yang bernilai guna, seperti enzim dan lainnya.
- e. Melakukan kolaborasi dengan industri pangan besar untuk mendapatkan subsidi alat atau hibah riset yang dapat menekan biaya investasi awal industri protein sel tunggal.

4. Standar Keamanan dan Regulasi Produksi Protein Sel Tunggal

- a. Melakukan sistem produksi kontrol yang baik seperti *Good Manufacturing Practices*, *Hazard Analysis* dan *Critical Control Points*.
- b. Melakukan kolaborasi dengan badan regulasi pakan dan pangan, seperti BSN dan BPOM sejak awal pembuatan protein sel tunggal
- c. Melakukan transparansi data ilmiah dan produk yang lengkap dan transparan, serta mencakup uji toksisitas, alergenisitas, dan nutrisi.

BAB IX

PERSPEKTIF MASA DEPAN PROTEIN

SEL TUNGGAL LIMBAH TAHU

Pertumbuhan populasi yang terus meningkat dengan cepat setiap tahunnya dan keterbatasan lahan sumber daya pangan konvensional menyebabkan terjadinya lonjakan terhadap permintaan bahan pangan khususnya pangan yang kaya akan protein. Kebutuhan akan protein masih ketergantungan pada sumber protein hewani. Ketergantungan yang tinggi terhadap protein hewani menimbulkan tantangan yang lebih serius seperti tingginya biaya pakan ternak, kebutuhan air dan lahan yang luas untuk pemeliharaan hewan ternak, serta kontribusi limbah kotoran ternak terhadap emisi gas rumah kaca. Sehingga kondisi ini mendorong pencarian sumber protein alternatif yang lebih efisien, ramah lingkungan dan dapat diproduksi secara berkelanjutan. Salah satu inovasi yang berpotensi dan sedang berkembang adalah produksi protein sel tunggal dari limbah tahu.

Protein sel tunggal limbah tahu merupakan produk biomassa dengan kadar protein tinggi yang berasal dari bakteri yang diisolasi dari limbah tahu, baik limbah tahu padat maupun cair. Industri tahu di Indonesia merupakan salah satu sektor pangan yang banyak menghasilkan limbah organik berbentuk padat maupun cair dari hasil produksi pembuatan tahu.

Limbah cair tahu biasanya dihasilkan dari proses pencucian, perebusan, pengepresan dan pencetakan tahu. Produksi 1 ton

kedelai, industri tahu mampu menghasilkan limbah cair sekitar 8.500 L/hari dan limbah padat sekitar 1.4 ton/hari. Limbah padat biasanya masih dimanfaatkan oleh masyarakat sebagai pakan ternak sedangkan limbah cair langsung dibuang ke sungai atau perairan terdekat. Hal ini tentunya akan berpengaruh terhadap timbulnya pencemaran air yang akan mempengaruhi sifat fisik dan kimia perairan yang berdampak pada ekosistem di perairan.

Padahal di dalam limbah tahu terdapat kandungan nutrisi yang cukup tinggi seperti protein, karbohidrat, dan lemak. Padahal, kandungan nutrisi pada limbah tahu tersebut dapat dimanfaatkan sebagai substrat dalam produksi protein sel tunggal. Sehingga pemanfaatan dari limbah tahu tidak hanya mengurangi pencemaran, tetapi juga dapat menghadirkan peluang baru dalam menghasilkan sumber protein alternatif untuk memenuhi kebutuhan protein di masa depan yang memiliki nilai ekonomi.

Protein sel tunggal limbah tahu diisolasi dari bakteri *indigenous* dengan kandungan protein yang tinggi sebagai sel kering. Protein sel tunggal yang diisolasi dari bakteri memiliki potensi untuk menghasilkan biomassa dengan kandungan protein yang tinggi dalam bentuk berat kering sel yang dapat mencapai 50-80%. Substrat pertumbuhan dari bakteri *indigenous* yaitu limbah tahu dikategorikan sebagai substrat yang cocok untuk proses produksi protein sel tunggal. Hal ini didasarkan pada komposisi limbah tahu yang memiliki kandungan nitrogen.

Pada umumnya mikroorganisme yang menghasilkan protein sel tunggal tumbuh pada limbah yang memiliki kandungan karbon dan nitrogen yang tinggi. Karbon berfungsi sebagai sumber energi dan nitrogen berfungsi sebagai pembentuk biomassa mikroorganisme selama proses metabolisme berlangsung. Kombinasi dua unsur tersebut memungkinkan mikroorganisme untuk memperbanyak sel dengan cepat sehingga dapat menghasilkan biomassa dengan kadar protein yang tinggi.

Prospek pengembangan dari protein sel tunggal di masa depan tentu sangat menjanjikan karena potensi manfaatnya yang beragam. Salah satu keunggulan utamanya adalah kemampuan produksi protein sel tunggal yang tidak membutuhkan lahan yang luas, berbeda dengan sumber protein konvensional yang sangat bergantung terhadap ketersediaan lahan dan sumber daya air. Selain itu, proses produksi protein sel tunggal tidak menghasilkan limbah, dan proses produksinya berjalan dengan cepat. Hal ini dikarenakan sebagian besar mikroorganisme memiliki laju pertumbuhan yang sangat cepat dan menghasilkan biomassa dalam jumlah yang besar, sehingga dapat mempercepat proses produksi.

Selain itu, protein sel tunggal juga dapat menjadi solusi sebagai protein alternatif untuk memenuhi kebutuhan protein karena memiliki biaya produksi yang relatif rendah, proses produksinya mudah, menggunakan sumber daya yang minimal, kualitas nutrisi dari protein sel tunggal yang tinggi, produksi protein sel tunggal tidak dipengaruhi oleh faktor eksternal karena kondisi fermentasi dapat diatur, tidak terpengaruh oleh kondisi iklim dan lingkungan karena mikroorganisme akan selalu tersedia sepanjang waktu, sehingga proses produksi dapat selalu dilakukan serta proses yang fleksibel karena protein sel tunggal dapat menggunakan berbagai macam substrat dan mikroorganisme.

Pemanfaatan limbah tahu sebagai substrat untuk produksi protein sel tunggal juga memiliki beberapa keuntungan yaitu kandungan nutrisi dengan kadar yang tinggi menjadikan limbah tahu berpotensi sebagai sumber nutrisi untuk pertumbuhan bakteri. Beberapa penelitian yang membahas mengenai pemanfaatan limbah tahu sebagai substrat untuk pertumbuhan bakteri yang akan dijadikan sebagai protein sel tunggal, seperti Yuliana, dkk (2021) yang menyatakan bahwa limbah padat tahu memiliki potensi yang lebih baik untuk dijadikan sebagai nutrisi pada pertumbuhan *Staphylococcus aureus*. Maryana, dkk (2016) juga menyatakan bahwa limbah cair tahu potensial digunakan sebagai substrat pertumbuhan *Rhizopus oryzae*.

Selain itu, penggunaan limbah tahu membuat proses perubahan limbah organik dengan biaya rendah menjadi suatu produk yang bermanfaat dan mengurangi adanya pencemaran lingkungan.

Selain berperan sebagai solusi terhadap pengelolaan limbah. Pemanfaatan protein sel tunggal limbah tahu juga memiliki manfaat yang strategis terhadap masa depan sistem pangan yang lebih berkelanjutan. Produk protein sel tunggal ini berpotensi untuk dijadikan sebagai bahan pangan dan pakan ternak sama halnya dengan kebanyakan protein sel tunggal yang berasal dari berbagai substrat lainnya. Hal ini didasarkan karena protein sel tunggal memiliki kandungan nutrisi yang lengkap mencakup protein, vitamin, asam amino, mineral, asam nukleat dan lipid esensial. Dengan kandungan nutrisi tersebut maka protein sel tunggal mampu berperan sebagai sumber protein alternatif.

Kandungan protein di dalam protein sel tunggal dipengaruhi oleh ketersediaan nutrisi pada substrat yang digunakan pada proses fermentasi. Semakin baik nutrisi yang terdapat pada substrat, maka pertumbuhan sel bakteri akan semakin cepat, sehingga hal tersebut berpengaruh terhadap meningkatnya kadar protein di dalam sel.

Penggunaan protein sel tunggal limbah tahu sebagai pakan ternak tentunya memiliki manfaat yang sangat potensial dalam mendukung keberlanjutan sektor peternakan. Pembuatan protein sel tunggal sebagai pakan ternak tidak hanya bertujuan untuk mengonversikan limbah organik yang dihasilkan oleh industri tahu menjadi produk yang bernilai, tetapi juga menyubstitusi sumber karbohidrat pada pakan ternak yang selama ini memiliki harga relatif mahal dan ketersediaannya tidak selalu stabil. Dengan kandungan protein yang cukup tinggi dan kandungan asam amino yang cukup lengkap, protein sel tunggal dari limbah tahu dinilai mampu untuk meningkatkan gizi pakan sekaligus menekan biaya produksi dari peternak.

Tidak hanya pada sektor peternakan, pemanfaatan protein sel tunggal limbah tahu juga memiliki potensi yang besar untuk

dolah sebagai bahan pangan yang dapat dikonsumsi oleh manusia. Produk biomassa ini dapat digunakan sebagai bahan tambahan untuk makanan. Dengan kandungan nutrisi yang sebanding atau bahkan bisa lebih unggul dibandingkan dengan sumber protein konvensional, maka pemanfaatan protein sel tunggal limbah tahu ini diyakini mampu untuk mengurangi ketergantungan terhadap sumber protein tradisional dan juga mendukung ketahanan pangan di masa yang akan datang.

Pembuatan protein sel tunggal pada umumnya menggunakan proses fermentasi. Produksi protein sel tunggal berasal dari pemanfaatan limbah yang tersedia oleh mikroorganisme sebagai media pertumbuhan untuk menambah massa sel. Setelah berakhirnya proses fermentasi, biomassa dari mikroorganisme akan dipanen. Biomassa tersebut menyediakan sumber protein yang sangat potensial.

DAFTAR PUSTAKA

- Amalia, R.N., Devy, S.D., Kurniawan, A.S., Hasanah, N., Salsabila, E.D., Ratnawati, D.A.A., ... & Aturdin, G.A. (2022). Potensi Limbah Cair Tahu sebagai Pupuk Organik Cair di RT. 31 Kelurahan Lempake Kota Samarinda. *ABDIKU: Jurnal Pengabdian Masyarakat Universitas Mulawarman*, 1(1), 36-41.
- Aggelopoulos, T., Katsieris, K., Bekatorou, A., Pandey, A., Banat, I.M., & Koutinas, A.A. (2014). Solid State Fermentation of Food Waste Mixtures for Single Cell Protein, Aroma Volatiles and Fat Production. *Food Chemistry*, 145 (1), 710-716.
- Ajomiwe, N., Boland, M., Phongthai, S., Bagiyal, M., Singh, J., & Kaur, L. (2024). Protein Nutrition: Understanding Structure, Digestibility, and Bioavailability for Optimal Health. *Foods*, 13(11), 1771.
- Andriani, Y., Yusmar, F.A., Ilhampradja, H., Aldiansyah, K., & Aisyah. (2025). Berbagai Teknik Pengeringan *Chlorella* sp. sebagai Sumber Protein Pakan Ikan. *Jurnal Ruaya*. 13(1), 40-48.
- Andriyanto, W., Giri, N.A., & Marzuqi, M. (2018). Aplikasi Protein Sel Tunggal dan “Spent Grains” dalam FORMULASI PAKAN untuk Pemeliharaan Kerapu Hibrid (*Epinephelus fuscoguttatus* x *Epinephelus polyphekadion*). *Media Akuakultur*, 13(1), 41.
- Apriani, E.F., Ahmadi, A., & Hardestyariki, D. (2022). Pemanfaatan Limbah Ampas Tahu Menjadi Produk Pangan Sehat dengan

- Nilai Tambah Ekonomis di Desa Pulau Semambu Indralaya Sumatera Selatan. Sriwijaya Journal of Community Engagement And Innovation, 1(2), 67-75.
- Ariyani, S.B., Asmawit & Utomo, P.P. (2014). Optimasi Waktu Inkubasi Produksi Enzim Selulase oleh *Aspergillus niger* Menggunakan Fermentasi Substrat Padat. BIOPROPAL INDUSTRI. 5(2). 61-67.
- Azwar, A., Mukhlishien, M., Muslim, A., Hadissa, P., Ningsih, U.H., Zanil, M.F., & Ali, J.M. (2021). Production of Single Cell Protein from Banana Peel Waste in Batch Fermentation Using *Saccharomyces Cerevisiae*. Jurnal Bahan Alam Terbarukan, 10(2), 104-112.
- Balhis, M.N., Indriyanti, D.R., Widyaningrum, P., & Setiati, N. (2022). Biokonversi Limbah Roti Apkir dan Ampas Tahu dengan Memanfaatkan Larva *Hermetia illucens*. Life Science, 11(2), 132-142.
- Basaniah, B., Rahayu, Y.P., Nasution, H.M., & Dalimunthe, G.I. (2024). Produksi Protein Sel Tunggal dari Kultur *Bacillus Cereus* dengan Medium Limbah Cair Tahu. Vitalitas Medis: Jurnal Kesehatan dan Kedokteran, 1(2), 129-147.
- Bratosin, B. C., Darjan, S., & Vodnar, D. C. (2021). Single Cell Protein: A Potential Substitute in Human and Animal Nutrition. Sustainability, 13(16), 9284.
- Chamodi, K.K.D., Vu, N.T., Domingos, J.A., & Loh, J.Y. (2025). Cellular Solutions: Evaluating Single-Cell Proteins as Sustainable Feed Alternatives in Aquaculture. Biology, 14(7), 764.
- De Gregorio, A., Mandalari, G., Arena, N., Nucita, F., Tripodo, M.M., & Curto, R.L. (2002). SCP and Crude Pectinase Production by Slurry-State Fermentation of Lemon Pulps. Bioresource Technology, 83(2), 89-94.
- Fajri, N.A., & Harmayani, R. (2020). Biokonversi Limbah Organik Menjadi Magot Sebagai Sumber Protein Pengganti Tepung Ikan. Jurnal Sains Teknologi dan Lingkungan, 6(2), 223-231.

- Fatimatuzzahrah, B.S., Handayani, B.R., Nazaruddin, N., & Bachmida, E.A. (2024). The Study of Fresh Tofu Dreg Quality from Abian Tubuh Production Center. *Pro Food*, 10(2), 162-175.
- Fitri, E., Widianitini, F., & Yulia, E. (2023). Kejadian dan Uji Hipersensitivitas Bakteri yang Berasosiasi dengan Penyakit Busuk Batang Jagung di Sumbawa Nusa Tenggara Barat. *Agrikultura*, 34(2), 210-217.
- Glencross, B.D., Huyben, D., & Schrama, J.W. (2020). The Application of Single-Cell Ingredients in Aquaculture Feeds—a Review. *Fishes*, 5(3), 22.
- Gundupalli, M.P., Ansari, S., da Costa, J.P.V., Qiu, F., Anderson, J., Luckert, M., & Bressler, D.C. (2024). Bacterial Single Cell Protein (BSCP): A Sustainable Protein Source from *Methylobacterium* Species. *Trends in Food Science & Technology*, 147(1). 1-13.
- Hafsan. (2022). Prospek dan Perkembangan Bioteknologi Mikroorganisme. Depok: Rajawali Pers PT. RajaGrafindo Persada.
- Harahap, M., Rahayu, Y.P., Lubis, M.S., & Yuniarti, R. (2024). Produksi Protein Sel Tunggal dari Kultur *Saccharomyces cerevisiae* dengan Medium Limbah Cair Tahu. Vitalitas Medis: Jurnal Kesehatan dan Kedokteran, 1(2), 109-128.
- Henchion, M., Hayes, M., Mullen, A.M., Fenelon, M., & Tiwari, B. (2017). Future Protein Supply and Demand: Strategies and Factors Influencing a Sustainable Equilibrium. *Foods*, 6(7), 53.
- Kieliszek, M. (2017). Biotechnological use of *Candida* yeasts in the Food Industry: A Review. *Fungal Biol. Rev.* 31, 185–198.
- Kips, J.C., Anderson, G.P., Fredberg, J.J., Herz, U., Inman, M.D., Jordana, M & Chung, K.F. (2003). Murine models of asthma. *European Respiratory Journal*, 22(2), 374-382.
- Kornochalert, N., Kantachote, D., Chaiprapat, S., & Techkarnjanaruk, S. (2014). Use of *Rhodopseudomonas palustris* P1 stimulated growth by fermented pineapple extract to treat latex rubber sheet wastewater to obtain single cell protein. *Annals of microbiology*, 64(3), 1021-1032.

- Kumar, R., Raj, T., Næss, G., Sørensen, M., & Dhawan, V. (2024). Opportunities and challenges in single-cell protein production using lignocellulosic material. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 18(1), 310-321.
- Kurbanoglu, E.B., and Algur, O.F. (2002). Single-cell protein production from ram horn hydrolysate by bacteria. *Bioresour. Technol.* 85, 125–129.
- Kurniasari, I., Sulistyaningtyas, A.R., & Darmawati, S. (2022). Isolasi Bakteri Proteolitik Hasil Fermentasi Inasua Ikan Bawal (*Collossoma macropomum*). In Prosiding Seminar Nasional Unimus. 5(1). 1285-1296
- Lafarga, T., Fernández-Sevilla, J.M., González-López, C., & Acién-Fernández, F.G. (2020). Spirulina for the food and functional food industries. *Food research international*, 137(1). 2-10.
- Li, Y.P., Ahmadi, F., Kariman, K., & Lackner, M. (2024). Recent advances and challenges in single cell protein (SCP) technologies for food and feed production. *npj Science of Food*, 8(1), 66.
- Mahan, K.M., Le, R.K., Wells Jr, T., Anderson, S., Yuan, J.S., Stoklosa, R.J., ... & Ragauskas, A.J. (2018). Production of single cell protein from agro-waste using *Rhodococcus opacus*. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 45(9), 795-801.
- Marín, S., Cabestrero, O., Demergasso, C., Olivares, S., Zetola, V., & Vera, M. (2021). An *indigenous* bacterium with enhanced performance of microbially-induced Ca-carbonate biomineralization under extreme alkaline conditions for concrete and soil-improvement industries. *Acta Biomaterialia*, 120, 304-317.
- Maryana, L., Anam, S., & Nugrahani, A.W. (2016). Produksi protein sel tunggal dari kultur *Rhizopus oryzae* dengan medium limbah cair tahu. *Jurnal Farmasi Galenika*, 2(2), 132-137.
- Muller, V., Kramer, H.D.S., Pacheco, F., Ehrenring, H.Z., Christ, R., Valiati, V., ... & Fonseca Tutikian, B. (2025). Survey of *Indigenous* Bacteria as a Simplified Alternative to Produce Self-Healing Cementitious Matrices. *Coatings*, 15(2), 152.

- Munawar, R.A. (2010). Biosynthesis of single cell biomass of *Candida utilis* by submerged fermentation. *Pakistan Journal of Science*, 62(1). 1-5.
- Nasution, M.N., Feliatra, F., & Effendi, I. (2021). Analisis Pertumbuhan Protein sel tunggal Bakteri *Bacillus cereus* dengan Media yang Berbeda. *Jurnal Perikanan Dan Kelautan*, 26(1), 47.
- Nelson, L. (2023). The building blocks of life: Exploring the essential functions and benefits of protein. *J Food Technol Pres.* 7(3), 1-2.
- Nostia, R., Kurniawan, A., & Koderi. (2023). Analysis of Solid and Liquid Waste Characteristics of Tofu Industry in Bancar Village, Bungkal District, Ponorogo Regency. *Jurnal Pembangunan Dan Alam Lestari*, 14(1).
- Nurdin, A., Setiasih, I.S., & Djali, M. (2017). Pengaruh Pengeringan Ampas Tahu Terhadap Karakteristik Fisik dan Kimia Tepung Ampas Tahu. *Jurnal Penelitian Pangan*, 2(1), 47-54.
- Onyeaka, H., Anumudu, C.K., Okpe, C., Okafor, A., Ihenetu, F., Miri, T., & Anyogu, A. (2022). Single cell protein for foods and feeds: A review of trends. *The Open Microbiology Journal*, 16(1), 1-17.
- Pagoray, H., Sulistyawati, S., & Fitriyani, F. (2021). Limbah Cair Industri Tahu dan Dampaknya Terhadap Kualitas Air dan Biota Perairan. *Jurnal Pertanian Terpadu*, 9(1), 53-65.
- Patias, L.D., Maroneze, M.M., Siqueira, S. F., de Menezes, C.R., Zepka, L.Q., & Jacob-Lopes, E. (2018). Single-cell protein as a source of biologically active ingredients for the formulation of antiobesity foods. In *Alternative and replacement foods*. 1(1). 317-353.
- Pradana, T.D., Suharno, S., & Apriansyah, A. (2018). Pengolahan limbah cair tahu untuk menurunkan kadar TSS dan BOD. *Jurnal Vokasi Kesehatan*, 4(2), 56-62.
- Pudjihastuti, I., Margaretha, T.S., Wahyuningsih, W., & Supriyo, E. Optimasi Produksi Protein Sel Tunggal Dari Bagase Terhidrolisa

- dengan Fermentasi Oleh *Saccharomyces cereviceae*. METANA, 8(02). 18-24.
- Putri, A., & Achyar, A. (2023). Optimasi Isolasi DNA Bakteri Patogen pada Sampel Air Sungai Berbasis PCR. Jurnal Serambi Biologi, 8(4), 471-475.
- Putri, C.I., Wardhana, M.F., Andrifianie, F., & Iqbal, M. (2023). Literature Review: Kejadian Resistensi Pada Penggunaan Antibiotik. Medical Profession Journal of Lampung, 13(3), 219-225.
- Putri, E.Y., Nggina, S A., Tanul, T.T., Alus, H.A., & Rofita, D. (2022). Pemanfaatan Limbah Cair Tahu Menjadi Pupuk Organik Cair (POC) di Ruteng, Kecamatan Langke Rempong Kabupaten Manggarai. Jurnal Pendidikan dan Konseling, Vol 4(5); 145-149.
- Rafiqul, I.M., Jalal, K.C.A., & Alam, M.Z. (2005). Environmental factors for optimisation of Spirulina biomass in laboratory culture. Biothecnology. 4(1). 19-22
- Rahayu, L.H., Sudrajat, R.W., & Rinihapsari, E. (2016). Teknologi Pembuatan Tepung Ampas Tahu untuk Produksi Aneka Makanan bagi Ibu-Ibu Rumah Tangga di Kelurahan Gunungpati, Semarang. E-Dimas: Jurnal Pengabdian kepada Masyarakat, 7(1), 68-76.
- Rasyid, I., Azri, N., Syahiddin, S., & Nasrullah, R.C.L. (2023). Kajian Awal Pabrik Protein Sel Tunggal Berbasis Kulit Kopi. Jurnal Inovasi Ramah Lingkungan, 4(3), 21-25.
- Ravinder, R., Venkateshwar Rao, L., & Ravindra, P. (2003). Studies on *Aspergillus oryzae* mutants for the production of single cell proteins from deoiled rice bran. Food Technology and Biotechnology, 41(3), 243-246.
- Rodriguez-Concepcion, M., Avalos, J., Bonet, M.L., Boronat, A., Gomez-Gomez, L., Hornero-Mendez, D., & Zhu, C. (2018). A global perspective on carotenoids: Metabolism, biotechnology, and benefits for nutrition and health. Progress in lipid research, 70(1), 62-93.
- Sabaghi, M., & Seyedalmoosavi, M.M. (2025). Applications of sustainable proteins in food and feed, and perspectives on

- health and circular bioeconomy. International Journal of Biological Macromolecules, 309, 143193.
- Safafar, H., Uldall Nørregaard, P., Ljubicic, A., Møller, P., Løvstad Holdt, S., & Jacobsen, C. (2016). Enhancement of Protein and Pigment Content in Two Chlorella Species Cultivated on Industrial Process Water. Journal of Marine Science and Engineering, 4(4), 1-15.
- Sagita, D., Shofia, S.M., Putri, R.S., Yulianingsih, R.E., & Diniati, B.T. (2024). Pemanfaatan Limbah Ampas Tahu Menjadi Nilai Ekonomis di Desa Bendosari Kediri. Community Empowerment: Jurnal Pengabdian dan Pemberdayaan Masyarakat, 2(2), 147-159.
- Salazar-López, N.J., Barco-Mendoza, G.A., Zuñiga-Martínez, B.S., Domínguez-Avila, J.A., Robles-Sánchez, R.M., Ochoa, M.A.V., & González-Aguilar, G.A. (2022). Single-Cell Protein Production as a Strategy to Reincorporate Food Waste and Agro by-products back into the Processing Chain. Bioengineering, 9(11), 623.
- Samadi, S., Delima, M., Hanum, Z., & Akmal, M. (2012). Pengaruh level substitusi protein sel tunggal (C_j Prosin) pada pakan komersial terhadap performan ayam broiler. Jurnal Agripet, 12(1), 7-15.
- Samtiya, M., Aluko, R.E., & Dhewa, T. (2020). Plant food anti-nutritional factors and their reduction strategies: an overview. Food Production, Processing and Nutrition, 2(1), 6.
- Sekoai, P.T., Roets-Dlamini, Y., O'Brien, F., Ramchuran, S., & Chunilall, V. (2024). Valorization of food waste into single-cell protein: an innovative technological strategy for sustainable protein production. Microorganisms, 12(1), 166.
- Sharif, M., Zafar, M.H., Aqib, A.I., Saeed, M., Farag, M.R., & Alagawany, M. (2021). Single cell protein: Sources, mechanism of production, nutritional value and its uses in aquaculture nutrition. Aquaculture, 531(1), 1-8.
- Sharma, S., Sindhu, S., Saloni, S., & Singh, P. (2024). Production of single cell protein from fruit wastes. Adding Value to Fruit

- Wastes: Extraction, Properties, and Industrial Applications, August, 291–313.
- Sisman, T., Gür, Ö., Do an, N., Özdal, M., Algur, Ö.F., & Ergon, T. (2013). Single-cell protein as an alternative food for zebrafish, *Danio rerio*: a toxicological assessment. *Toxicology and industrial health*, 29(9), 792-799.
- Suherman, M.S., Rita Maliza, S.Si., M.Si., P., Dr. Fathma Syahbanu, S.T., Atep Dian Supardan, S.SI., M.S., Rauza Sukma Rita, Arisanty, D., Minarsih, T., Yerizel, E., Amrinanto, A.H., Handito, D., & Jati, M.A.S. (2024). Analisis Zat Gizi Pangan. in Penambahan Natrium Benzoat dan Kalium Sorbat (Antiinversi) dan Kecepatan Pengadukan sebagai Upaya Penghambatan Reaksi Inversi Pada Nira Tebu.
- Suryani, E.M., & Gaffar, A. (2024). Isolasi dan Karakterisasi Bakteri Asam Laktat dari Susu Kuda Bima (*Equus* sp.) Yang Berpotensi sebagai Probiotik. *Jurnal Ilmiah Biosaintropis (Bioscience-Tropic)*, 9(2), 102-108
- Suryani, Y., & Taupiqurrahman, O. (2021). Mikrobiologi dasar. LP2M UIN Sunan Gunung Djati Bandung.
- Suryantarini, N.W.P.W., Hasbi, N., & Ayunda, R.D. (2024). Antibiotics Susceptibility Testing Against *Staphylococcus aureus* from Nasal Isolats in Food Handlers in Canteen of Mataram University. *Jurnal Biologi Tropis*, 24(1), 51-63.
- Thiviya, P., Gamage, A., Kapilan, R., Merah, O., & Madhujith, T. (2022). Single Cell Protein Production Using Different Fruit Waste: a Review. *Separations*, 9(7), 178.
- Ugalde, U.O., & Castrillo, J.I. (2002). Single cell proteins from fungi and yeasts. *Applied mycology and biotechnology* (Vol. 2, pp. 123-149). Elsevier.
- United Nations (2024). Global Issues Population. Diakses pada 29 Juli 2025 di link: <https://www.un.org/en/global-issues/population>

- Wiebe, M. (2002). Myco-protein from *Fusarium venenatum*: a well-established product for human consumption. *Applied microbiology and biotechnology*, 58(4), 421-427.
- Wirawan, W., Suliana, G., & Iskandar, T. (2017). Pemanfaatan ampas tahu untuk olahan pangan dari limbah pengolahan industri tahu di kelurahan Tunggulwulung kota Malang. *JAPI (Jurnal Akses Pengabdian Indonesia)*, 2(1), 64-70.
- Wu, G. (2016). Dietary protein intake and human health. *Food & function*, 7(3), 1251-1265.
- Wu, J., Hu, J., Zhao, S., He, M., Hu, G., Ge, X., & Peng, N. (2018). Single-cell Protein and Xylitol Production by a Novel Yeast Strain *Candida intermedia* FL023 from Lignocellulosic Hydrolysates and Xylose. *Applied biochemistry and biotechnology*, 185(1), 163-178.
- Zhang, Z., Chen, X., & Gao, L. (2024). New strategy for the biosynthesis of alternative feed protein: Single-cell protein production from straw-based biomass. *GCB Bioenergy*, 16(2), 1-18.
- Zhuang, Z., Wan, G., Lu, X., Xie, L., Yu, T., & Tang, H. (2024). Metabolic engineering for single-cell protein production from renewable feedstocks and its applications. *Advanced Biotechnology*, 2(35), 1-18.

TENTANG PENULIS



Prof. Dr. Hj. Yani Suryani, M.Si lahir di Ciamis, 18 Mei 1972, merupakan Guru Besar Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Gunung Djati Bandung dengan spesialisasi Mikrobiologi. Setelah menyelesaikan pendidikan dasar di SDN Sukamulya Ciaurbeuti Ciamis (1985), SMPN Ciaurbeuti Ciamis (1988), SMAN 2 Tasikmalaya (1991). Kemudian melanjutkan studi pada Jurusan Pendidikan Biologi FPMIPA IKIP Bandung (1996) dan Program Magister Biologi Sekolah Pascasarjana ITB (2001) dengan predikat *cumlaude*. Program Doktor bidang Biologi pada prodi IPA Unpad (2014) dengan predikat *cumlaude*. Riwayat karir sebagai guru PNS pada SMAN 20 Bandung, Dosen pada Jurusan Tadris FTK IAIN Sunan Gunung Djati Bandung, dan sejak 2006 dialihugaskan pada Jurusan Biologi FST UIN Sunan Gunung Djati Bandung sampai sekarang.

Peraih penghargaan Satyalencana Karya 10 dan 20 Tahun dari Presiden RI., pernah diamanahi sebagai Kaprodi Biologi Jurusan Sains FST UIN Sunan Gunung Djati Bandung (2006-2010, dan 2010-214). Wakil Dekan II FST UIN Sunan Gunung Djati Bandung (periode 2014- 2015 dan periode 2015-2019) dan menjadi anggota

Senat Universitas (2019-sekarang). Di sela-sela kesibukannya menjadi dosen ia mengikuti berbagai pelatihan, dan telah banyak menulis puluhan karya tulis ilmiah yang diterbitkan pada jurnal nasional dan internasional, serta melakukan desiminasi pada berbagai forum ilmiah nasional dan internasional.



Adisty Virakawugi D., M.Si. Lahir di Bandung, 24 Agustus 1989, merupakan dosen tetap dengan jabatan Lektor di Jurusan Biologi Fakultas Sains dan Teknologi, UIN Sunan Gunung Djati Bandung. Menyelesaikan pendidikan dasar di SD Negeri Angkasa V Kabupaten Bandung (2001), SMP Negeri 1 Margahayu Kabupaten Bandung (2004), SMA Negeri 1 Margahayu Kabupaten Bandung (2007). Kemudian melanjutkan studi pada Jurusan Pendidikan Biologi FPMIPA Universitas Pendidikan Indonesia (2011) dan Program Studi Magister Biologi Sekolah Ilmu Teknologi Hayati ITB (2015).

Penulis aktif dalam berbagai kegiatan riset dengan peminatan terkait biodiversitas, fisiologi, perkembangan hewan dan biomedis. Penulis aktif mengikuti berbagai kegiatan pelatihan dan telah menghasilkan berbagai karya tulis ilmiah, serta mendeseminasikannya pada berbagai forum ilmiah.



Siska Tridesianti, S.Pd., M.Si., lahir di Simpang Periuk, Lubuklinggau pada 14 Desember 1991 yang telah menyelesaikan pendidikan dasar di SDN 1 pada tahun 2003, kemudian melanjutkan ke SMP Xaverius pada tahun 2006, dan SMA Xaverius selesai di tahun 2009. Gelar Sarjana Sains dalam bidang Biologi diraihnya dari Jurusan Pendidikan Biologi, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Sriwijaya pada tahun 2013, dan kemudian melanjutkan studi pascasarjana di Pascasarjana Mikrobiologi, Institut Pertanian Bogor sehingga meraih gelar Magister Sains (M.S.i) pada tahun 2017. Saat ini penulis berkarir sebagai Dosen di Program Studi Biologi, Fakultas Sains dan Teknologi, UIN Sunan Gunung Djati Bandung.

Penulis secara aktif terlibat dalam berbagai kegiatan penelitian baik secara mandiri ataupun penelitian yang didanai oleh institusi, dengan fokus utama pada bidang mikrobiologi sehingga telah menghasilkan sejumlah karya ilmiah yang telah dipublikasikan dalam jurnal ilmiah secara nasional maupun internasional. Selain itu, penulis juga menyalurkan aktivitas menulis dalam karya buku antologi sejak tahun 2020.

