

Microwave-Assisted Extraction (MAE) Untuk Pengambilan Protein dari *Chlorella pyrenoidosa*: Review

INFO ARTIKEL

Diterima: 26 Juni 2025
Direvisi : 01 November 2025
Disetujui : 30 November 2025

¹Anis Khairun Nisa ²Margaretha Praba Aulia*
¹Fakultas Pertanian dan Peternakan Universitas Boyolali, Jl. Pandanaran No,405, Dusun Diterima 1, Winong, Kec. Boyolali, Kabupaten Boyolali, Jawa Tengah 57315
²Fakultas Pertanian dan Peternakan Universitas Boyolali, Jl. Pandanaran No,405, Dusun 1, Winong, Kec. Boyolali, Kabupaten Boyolali, Jawa Tengah 57315
*prabaaulia@gmail.com

ABSTRAK

Microwave-Assisted Extraction (MAE) merupakan metode inovatif untuk pengambilan protein dari mikroalga *Chlorella pyrenoidosa*, yang dikenal memiliki kandungan protein tinggi dan berbagai manfaat kesehatan. *Chlorella pyrenoidosa*, yang termasuk dalam kelompok Chlorophyta, memiliki potensi sebagai sumber protein berkelanjutan dan efisien, dengan kandungan protein mencapai 50-60% dari berat keringnya. Namun, proses ekstraksi protein dari mikroalga ini menghadapi tantangan karena dinding sel yang kaku dan ketahanan terhadap pelarut konvensional. *Microwave-Assisted Extraction* (MAE) menggunakan radiasi gelombang mikro untuk memfasilitasi pelepasan protein intraseluler dengan cara memanaskan secara merata, yang mengurangi degradasi termal dan mempertahankan fungsionalitas protein. Penelitian menunjukkan bahwa *Microwave-Assisted Extraction* (MAE) dapat meningkatkan hasil dan kemurnian protein hingga 40-50% dibandingkan metode konvensional, serta mengurangi waktu ekstraksi hingga 50%. Meskipun terdapat tantangan dalam pengaturan parameter proses dan biaya investasi awal, prospek penggunaan MAE dalam ekstraksi protein dari *Chlorella pyrenoidosa* sangat menjanjikan, terutama dalam memenuhi permintaan akan sumber protein nabati yang berkelanjutan dan ramah lingkungan. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengoptimalkan kondisi ekstraksi dan mengeksplorasi aplikasi *Microwave-Assisted Extraction* (MAE) dalam industri pangan dan nutrisi.

Kata kunci: *Chlorella pyrenoidosa*, Microwave-Assisted Extraction, protein, mikroalga, ekstraksi ramah lingkungan

I. PENDAHULUAN

Chlorella pyrenoidosa merupakan mikroalga uniseluler yang termasuk dalam kelompok *Chlorophyta* dan dikenal memiliki kandungan protein dan nutrisi tinggi. *Chlorella pyrenoidosa* telah mendapatkan perhatian yang signifikan karena aplikasi potensialnya dalam makanan, obat-obatan dan biofuel. Mikroalga dapat meningkat sebagai sumber protein yang berkelanjutan dan efisien karena kandungan proteinnya yang tinggi, tingkat pertumbuhan yang cepat, dan jejak lingkungan yang minimal.

Menurut Becker (2007), *Chlorella pyrenoidosa* mengandung sekitar 50-60% protein dari berat keringnya, menjadikannya salah satu sumber protein nabati yang paling kaya dan berkualitas tinggi. Selain nilai gizi yang tinggi, *Chlorella pyrenoidosa* juga memiliki berbagai manfaat kesehatan yang telah diteliti secara mendalam. Penelitian menunjukkan bahwa mengonsumsi *Chlorella* dapat membantu meningkatkan sistem kekebalan tubuh, mengurangi kadar kolesterol, dan mendukung proses

detoksifikasi dalam tubuh (Kato et al., 2008). Klorofil yang terkandung dalam mikroalga ini juga dikenal memiliki sifat anti-inflamasi dan dapat membantu dalam penyembuhan luka (Miyashita et al., 2015). Dengan berbagai manfaat ini, *Chlorella pyrenoidosa* semakin populer digunakan sebagai suplemen kesehatan di kalangan masyarakat.

Di samping manfaat kesehatan, *Chlorella pyrenoidosa* juga memiliki potensi dalam bidang keberlanjutan dan lingkungan. Mikroalga ini dapat diproduksi dengan efisiensi tinggi dan dapat berkontribusi pada pengurangan emisi karbon dioksida melalui proses fotosintesisnya. Menurut Borowitzka (2013), pengembangan industri mikroalga seperti *Chlorella pyrenoidosa* dapat menjadi solusi untuk tantangan global, termasuk ketahanan pangan dan perubahan iklim. Dengan demikian, penelitian lebih lanjut mengenai *Chlorella pyrenoidosa* sangat penting untuk mengeksplorasi potensi dan aplikasinya dalam berbagai bidang.

Mikroalga seperti *Chlorella sp.* menjadi kandidat unggulan sebagai sumber minyak nabati alternatif karena kandungan lipidnya yang sangat tinggi, yakni mencapai 70% dari berat kering. Selain itu, mikroalga tidak memerlukan lahan subur, dapat tumbuh cepat, dan tidak berkompetisi dengan tanaman pangan, sehingga lebih berkelanjutan dibandingkan sumber minyak nabati konvensional seperti kelapa sawit atau jarak pagar. Potensi ini menjadikan mikroalga sebagai solusi yang menjanjikan untuk produksi biodiesel dalam skala besar tanpa mengorbankan ketahanan pangan nasional (Wildan Syaeful Barqi, 2015).

Namun, dalam proses ekstraksi protein dari *Chlorella pyrenoidosa* menantang karena dinding selnya yang kaku sehingga membatasi ketersediaan hayati dan ekstrakibilitas senyawa intraseluler (Safi et al., 2013). Mikroalga *Chlorella pyrenoidosa* juga tahan terhadap pelarut konvensional. Selain itu, metode tradisional untuk ekstraksi protein, seperti ekstraksi alkali, hidrolisis enzimatis, dan gangguan mekanis, sering menghadapi kelemahan termasuk biaya pemrosesan yang tinggi, waktu ekstraksi yang diperpanjang, dan pemulihan protein yang tidak lengkap (Safi et al., 2014). Oleh karena itu, metode ekstraksi yang efisien dan ramah lingkungan sangat diperlukan.

Selain kaya akan kandungan minyak dan protein, mikroalga memiliki kemampuan menghasilkan biomassa dalam jumlah besar. Mikroalga dapat menghasilkan biomassa hingga 50 kali lebih banyak dibandingkan tumbuhan darat lainnya, bahkan minyaknya bisa mencapai 200 kali lebih tinggi dibandingkan tanaman seperti kelapa sawit dalam kondisi optimal. Kemampuan ini menjadikan mikroalga sebagai bahan baku yang sangat efisien dalam produksi pangan fungsional maupun bahan bakar alternatif (Wildan Syaeful Barqi, 2015).

Prinsip dan Keunggulan MAE

Microwave-Assisted Extraction (MAE) menggunakan radiasi gelombang mikro untuk menginduksi interaksi molekuler dalam media ekstraksi, menghasilkan panas melalui rotasi dipol dan konduksi ionik. Efek pemanasan lokal ini mengganggu dinding sel *Chlorella pyrenoidosa*, memfasilitasi pelepasan protein intraseluler ke dalam pelarut di sekitarnya. Dibandingkan dengan ekstraksi termal konvensional, *Microwave-Assisted Extraction*

(MAE) menawarkan pemanasan yang seragam, meminimalkan degradasi termal, dan mempertahankan fungsionalitas protein (Putri et al., 2024).

Dalam beberapa tahun terakhir, *Microwave-Assisted Extraction* (MAE) telah muncul sebagai alternatif yang menjanjikan, menawarkan peningkatan efisiensi ekstraksi, mengurangi waktu pemrosesan, dan konsumsi pelarut yang lebih rendah (Souza et al., 2024). Beberapa penelitian telah menunjukkan bahwa *Microwave-Assisted Extraction* (MAE) dapat secara signifikan meningkatkan hasil dan kemurnian protein. Efisiensi *Microwave-Assisted Extraction* (MAE) tergantung pada berbagai faktor, termasuk daya gelombang mikro, waktu ekstraksi, jenis pelarut, dan rasio padat-ke-cair. Sebuah studi oleh (Ahmad et al., 2016) melaporkan bahwa mengoptimalkan parameter ini menghasilkan peningkatan efisiensi ekstraksi protein sebesar 40-50% dibandingkan dengan metode konvensional. Selain itu, *Microwave-Assisted Extraction* (MAE) sering dikombinasikan dengan hidrolisis enzimatis untuk lebih meningkatkan pemulihan protein dengan memecah agregat protein kompleks (Pratt & Johnson, 1963).

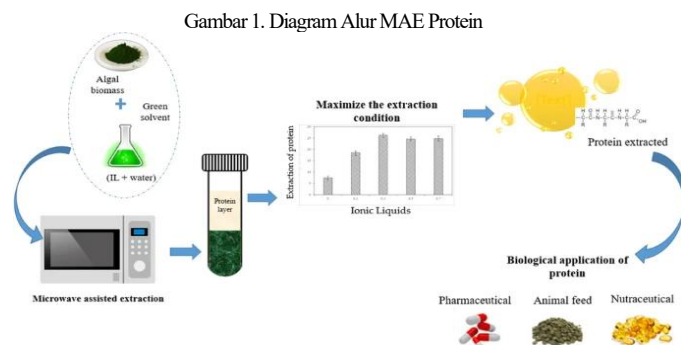
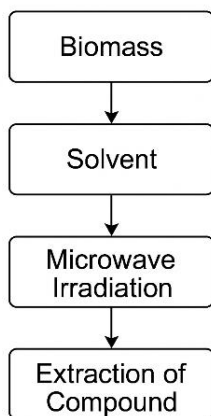
Tinjauan sistematis oleh (Souza et al., 2024), mengevaluasi berbagai metode ekstraksi protein, termasuk pendekatan mekanis, kimia, dan enzimatis, dan menemukan bahwa *Microwave-Assisted Extraction* (MAE) memberikan hasil ekstraksi tertinggi sambil mempertahankan integritas protein. Studi lain oleh (Putri et al., 2024) menyoroti bahwa *Microwave-Assisted Extraction* (MAE) mengungguli metode berbasis pelarut konvensional dengan mengurangi waktu ekstraksi hingga 50% sambil mencapai hasil protein yang sebanding atau unggul.

Microwave-Assisted Extraction (MAE) sangat unggul dari sisi efisiensi energi dan penggunaan pelarut. MAE memungkinkan ekstraksi dengan penggunaan pelarut yang minimal dan waktu ekstraksi yang lebih singkat. Sistem ini bekerja secara selektif memanaskan molekul polar, mempercepat penghancuran dinding sel mikroalga tanpa perlu perlakuan tambahan yang kompleks (Wildan Syaeful Barqi, 2015).

Microwave-Assisted Extraction (MAE) menawarkan banyak keunggulan dibandingkan metode konvensional seperti soxhletasi atau sonikasi. MAE bekerja dengan

memanfaatkan energi gelombang mikro untuk menghancurkan dinding sel mikroalga secara efisien, sehingga memfasilitasi pelepasan senyawa aktif seperti minyak. Proses ini membutuhkan waktu yang lebih singkat, konsumsi energi lebih rendah, serta lebih ramah lingkungan karena meminimalisasi penggunaan pelarut organik dalam jumlah besar (Wildan Syaeful Barqi, 2015).

Microwave-Assisted Extraction



Gambar 2. Alur Proses MAE untuk *Chlorella pyrenoidosa* (Motlagh et al., 2021)

Aplikasi MAE pada *Chlorella pyrenoidosa*

Dalam konteks *Chlorella pyrenoidosa*, aplikasi *Microwave-Assisted Extraction* (MAE) dapat meningkatkan hasil ekstraksi protein dan senyawa bioaktif lainnya, seperti klorofil dan karotenoid. Sebuah studi oleh Zhang et al. (2019) mengungkapkan bahwa penggunaan *Microwave-Assisted Extraction* (MAE) untuk ekstraksi protein dari *Chlorella vulgaris* (spesies yang dekat dengan *Chlorella pyrenoidosa*) menghasilkan rendemen yang lebih tinggi dan kualitas protein yang lebih baik dibandingkan dengan metode ekstraksi lainnya. Hal ini menunjukkan potensi *Microwave-Assisted Extraction* (MAE) dalam meningkatkan efisiensi dan efektivitas ekstraksi nutrisi dari mikroalga.

TABEL 1. Penelitian Terdahulu

No.	Metode Ekstraksi	Kondisi Optimal	Hasil Utama	Catatan
1	MAE dengan Enzimasasi (Zhang et al., 2024)	45,6 °C, pH 9,1, 49,85 menit	Kandungan asam amino esensial meningkat menjadi 22.849,1 mg/100 g; aktivitas antioksidan meningkat	MAE (<i>Microwave-Assisted Extraction</i>) adalah metode ekstraksi yang menggunakan energi gelombang mikro untuk mempercepat proses ekstraksi.
2	MAE dengan Three-Phase Partitioning (TPP) (Chen et al., 2019)	30% ammonium sulfat, rasio slurry 1:1, 120 detik, 100 W	Yield protein mencapai 63,2%; efisiensi pemisahan 67,2%	TPP (Three-Phase Partitioning) adalah teknik pemisahan yang memanfaatkan tiga fase untuk memisahkan komponen target dari campuran.
3	Kombinasi Etanol, Enzim, Ultrasonik, Homogenisasi (Duan et al., 2017)	Tidak disebutkan secara spesifik	Yield protein mencapai 72,4%	
4	Ekstraksi Alkali dari Residu Lipid & Pigmen (Hu et al., 2019)	NaOH 7,9%, 70 °C, 34,8 menit	Yield protein 722,7 mg/g; indeks asam amino esensial (EAAI) 1,49	EAAI (<i>Essential Amino Acid Index</i>) adalah indeks yang menunjukkan kualitas protein berdasarkan kandungan asam amino esensial.
5	MAE untuk Polisakarida (<i>Chlorella</i> sp.) (Zhou et al., 2023)	50 °C, 2,3 jam, 380 W, enzim	Yield polisakarida 0,72%; aktivitas antioksidan DPPH 17,58%	

Keunggulan utama lain dari MAE adalah kemampuannya menjaga stabilitas senyawa termolabil seperti asam lemak tak jenuh. Karena sistem MAE memiliki kontrol suhu yang lebih akurat, metode ini mampu mencegah degradasi senyawa bioaktif, sehingga kualitas hasil ekstraksi tetap terjaga. Hal ini menjadikan MAE cocok untuk aplikasi pada ekstraksi senyawa nutrisi dari mikroalga (Wildan Syaeful Barqi, 2015).

Rendemen ekstraksi sangat dipengaruhi oleh parameter waktu dan daya. Hasil tertinggi dicapai pada daya 450 W selama 20 menit. Semakin lama waktu dan semakin besar daya, maka semakin rusak dinding sel mikroalga dan semakin tinggi jumlah minyak yang dilepaskan. Hal ini memperlihatkan pentingnya optimasi parameter proses dalam penerapan MAE untuk hasil maksimal (Wildan Syaeful Barqi, 2015). Hasil penelitian menunjukkan bahwa

kombinasi daya microwave sebesar 450 W selama 20 menit menghasilkan rendemen minyak tertinggi sebesar 0,547%. Semakin tinggi daya dan semakin lama waktu ekstraksi, maka semakin besar jumlah minyak yang dihasilkan. Hal ini terjadi karena intensitas panas yang meningkat dapat mempercepat kerusakan dinding sel *Chlorella sp.*, sehingga minyak lebih mudah keluar dan terlarut dalam pelarut non-polar yang digunakan (Wildan Syaeful Barqi, 2015).

Microwave-Assisted Extraction (MAE) tidak hanya efisien dalam hal waktu dan hasil, tetapi juga dapat mempertahankan aktivitas biologis dari senyawa yang diekstraksi. Selanjutnya (Safi et al., 2014) menyelidiki dampak komposisi dinding sel *Chlorella* pada ekstrakabilitas protein dan menemukan bahwa MAE sangat efektif untuk mikroalga dengan dinding sel kaya selulosa yang kaku. Temuan ini menggarisbawahi pentingnya menyesuaikan parameter *Microwave-Assisted Extraction* (MAE) dengan karakteristik struktural spesifik mikroalga.

Penerapan *Microwave-Assisted Extraction* (MAE) dalam ekstraksi protein *Chlorella* melampaui makanan dan nutrisi. Dalam industri biofuel, MAE telah dieksplorasi karena kemampuannya untuk memfasilitasi ekstraksi lipid dan senyawa bioaktif lainnya, menawarkan pendekatan ekstraksi multi-komponen (Purwanti, 2015).

Minyak yang diekstraksi dari *Chlorella sp.* menggunakan metode MAE mengandung asam lemak tak jenuh seperti asam oleat serta senyawa bioaktif lain seperti heptacosane. Asam oleat merupakan komponen utama dalam banyak minyak nabati dan memiliki nilai ekonomi tinggi sebagai bahan baku biodiesel. Sementara itu, kehadiran senyawa heptacosane yang juga terdeteksi menunjukkan bahwa proses ekstraksi dengan daya tinggi turut melepaskan senyawa polifenol, yang berpotensi sebagai antioksidan alami (Wildan Syaeful Barqi, 2015).

Tantangan dan Prospek

Meskipun *Microwave-Assisted Extraction* (MAE) menawarkan banyak keuntungan dalam ekstraksi protein dari *Chlorella pyrenoidosa*, terdapat beberapa tantangan yang perlu diatasi. Salah satu tantangan utama adalah pengaturan parameter proses, seperti waktu, suhu, dan jenis pelarut yang digunakan. Parameter yang tidak tepat dapat mengakibatkan degradasi protein dan senyawa bioaktif

lainnya, sehingga mengurangi kualitas ekstrak yang dihasilkan. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengoptimalkan kondisi ekstraksi agar dapat memaksimalkan hasil dan kualitas protein (Zhang et al., 2019).

Tantangan lainnya adalah biaya investasi awal untuk peralatan *Microwave-Assisted Extraction* (MAE) yang mungkin lebih tinggi dibandingkan dengan metode ekstraksi konvensional. Meskipun MAE dapat menghemat waktu dan meningkatkan efisiensi, biaya awal yang lebih tinggi dapat menjadi penghalang bagi beberapa industri kecil atau produsen mikroalga. Oleh karena itu, penting untuk melakukan analisis biaya-manfaat yang komprehensif untuk menentukan kelayakan ekonomi dari penerapan *Microwave-Assisted Extraction* (MAE) dalam skala industri (Chemat et al., 2017).

Di sisi lain, prospek penggunaan MAE untuk pengambilan protein dari *Chlorella pyrenoidosa* sangat menjanjikan. Dengan meningkatnya permintaan akan sumber protein nabati yang berkelanjutan, mikroalga seperti *Chlorella pyrenoidosa* menjadi pilihan yang menarik. MAE dapat meningkatkan efisiensi ekstraksi, sehingga memungkinkan produksi protein dalam jumlah yang lebih besar dan dengan kualitas yang lebih baik. Hal ini dapat memenuhi kebutuhan pasar yang terus berkembang untuk suplemen makanan dan produk kesehatan berbasis nabati (Chemat et al., 2019).

Selain itu, dengan meningkatnya kesadaran akan keberlanjutan dan dampak lingkungan dari produksi makanan, penggunaan mikroalga sebagai sumber protein dapat menjadi solusi yang ramah lingkungan. *Microwave-Assisted Extraction* (MAE), yang memungkinkan ekstraksi yang lebih cepat dan efisien, dapat berkontribusi pada pengembangan industri mikroalga yang lebih berkelanjutan. Dengan penelitian dan pengembangan yang terus berlanjut, *Microwave-Assisted Extraction* (MAE) dapat menjadi metode utama dalam ekstraksi protein dari *Chlorella pyrenoidosa*, membuka peluang baru dalam industri pangan dan nutrisi (Zhang et al., 2019).

Kandungan Senyawa Bioaktif Tambahan

Selain asam oleat, minyak hasil ekstraksi juga mengandung senyawa lain seperti heptacosane dan tanin.

Heptacosane merupakan senyawa hidrokarbon yang umumnya bersifat bioaktif dan tanin berfungsi sebagai antioksidan alami. Keberadaan senyawa ini menambah nilai fungsional dari hasil ekstraksi mikroalga, menjadikannya bukan hanya sumber energi, tetapi juga bahan aktif fungsional (Wildan Syaeful Barqi, 2015).

Mikroalga tidak hanya menghasilkan asam lemak utama seperti asam oleat, tetapi juga mengandung senyawa bioaktif lain yang penting seperti heptacosane. Heptacosane adalah senyawa hidrokarbon rantai panjang yang dalam beberapa literatur memiliki potensi sebagai agen antibakteri dan antioksidan. Kandungan ini terdeteksi lebih tinggi pada ekstraksi menggunakan daya microwave 450 W selama 20 menit, yang menunjukkan bahwa parameter ekstraksi sangat memengaruhi profil kimia hasil (Wildan Syaeful Barqi, 2015).

Selain heptacosane, senyawa tanin juga ditemukan sebagai komponen utama dalam fraksi hasil ekstraksi. Tanin dikenal sebagai senyawa polifenol yang memiliki sifat antioksidan, antimikroba, dan berperan sebagai pewarna alami. Keberadaan tanin mengindikasikan bahwa proses ekstraksi tidak hanya melepaskan senyawa lipid, tetapi juga membuka kemungkinan untuk pemanfaatan mikroalga sebagai bahan dasar suplemen kesehatan, kosmetik, atau pewarna alami (Wildan Syaeful Barqi, 2015).

Hasil tersebut memperkuat potensi mikroalga sebagai sumber senyawa multifungsi, yang tidak hanya berkontribusi terhadap sektor bioenergi, tetapi juga dapat diperluas ke sektor pangan dan farmasi. Efisiensi ekstraksi senyawa bioaktif ini membuka peluang untuk pendekatan ekstraksi terpadu (integrated extraction), di mana satu proses dapat menghasilkan lebih dari satu jenis senyawa fungsional. Pendekatan ini penting untuk meningkatkan nilai tambah biomassa mikroalga secara ekonomis dan berkelanjutan (Wildan Syaeful Barqi, 2015).

Selain komponen utama seperti asam oleat dan *heptacosane*, hasil ekstraksi juga menunjukkan keberadaan senyawa alkohol rantai panjang seperti *2-metil-1-heksadecanol*. Senyawa ini termasuk dalam kelompok alkohol alifatik yang memiliki potensi sebagai bahan aktif dalam produk kosmetik dan farmasi karena sifatnya yang

emolien dan mampu memperbaiki lapisan lipid pada kulit (Wildan Syaeful Barqi, 2015).

Senyawa bioaktif seperti oleic acid juga terbukti memiliki peran penting dalam meningkatkan kualitas minyak mikroalga untuk aplikasi pangan dan kesehatan. Dalam konteks pangan, asam oleat dikenal sebagai asam lemak tak jenuh yang baik untuk menurunkan kolesterol LDL dan meningkatkan HDL. Dalam aplikasi industri, kandungan oleic acid juga sangat diinginkan untuk pembuatan pelumas hayati dan sabun cair karena kestabilan oksidatifnya (Wildan Syaeful Barqi, 2015).

Penemuan berbagai senyawa tersebut menunjukkan bahwa produk ekstrak mikroalga bukan hanya dapat dijadikan biodiesel, tetapi juga memiliki potensi sebagai sumber bahan aktif multifungsi. Kombinasi senyawa lipid dan non-lipid dalam hasil ekstraksi memperluas spektrum pemanfaatan mikroalga, termasuk untuk industri farmasi, kosmetik, pangan fungsional, bahkan sebagai bahan aktif dalam pestisida nabati (Wildan Syaeful Barqi, 2015).

Lebih lanjut, teknik GC-MS dalam penelitian tersebut membuktikan bahwa karakteristik senyawa yang keluar sangat bergantung pada parameter MAE. Penggunaan daya yang lebih tinggi dan waktu lebih lama memicu keluarnya senyawa kompleks yang awalnya tidak terdeteksi pada perlakuan ringan. Artinya, optimalisasi parameter MAE tidak hanya mempengaruhi kuantitas, tetapi juga kualitas dan keragaman senyawa yang diekstraksi (Wildan Syaeful Barqi, 2015).

Efek peningkatan daya juga terlihat pada keluarnya pigmen dan zat warna dari mikroalga, salah satunya tanin, yang berperan sebagai pewarna alami berwarna kecokelatan. Tanin ini sangat penting karena dapat dimanfaatkan sebagai pewarna makanan atau tekstil alami, serta memiliki aktivitas antioksidan yang kuat. Peningkatan konsentrasi tanin pada perlakuan daya tinggi memperkuat hipotesis bahwa MAE dapat mengekstrak senyawa-senyawa non-tradisional secara lebih efektif (Wildan Syaeful Barqi, 2015).

Dengan demikian, penerapan MAE dalam ekstraksi mikroalga bukan hanya berorientasi pada hasil tunggal seperti minyak atau protein saja, tetapi juga membuka potensi strategi ekstraksi multi-komponen. Hal ini mendukung pendekatan bio-refinery yang menyasar

pemanfaatan semua fraksi dari mikroalga, sehingga mendukung efisiensi produksi sekaligus menciptakan produk turunan bernilai tinggi dari satu sumber biomassa (Wildan Syaeful Barqi, 2015).

Keterbatasan MAE dalam Skala Industri

Meski memiliki berbagai keunggulan, implementasi MAE pada skala industri masih menghadapi tantangan, terutama dalam hal investasi peralatan dan pengaturan presisi parameter proses. Efektivitas MAE sangat bergantung pada pengaturan suhu, waktu, dan daya gelombang mikro yang tepat. Ketidaksiuaian sedikit saja bisa mengakibatkan hasil yang kurang optimal atau bahkan degradasi senyawa (Wildan Syaeful Barqi, 2015).

Meskipun *Microwave-Assisted Extraction* (MAE) menawarkan banyak keuntungan dalam ekstraksi mikroalga, tantangan besar masih dihadapi dalam implementasinya di skala industri. Salah satunya adalah kebutuhan akan pengaturan parameter yang sangat presisi, seperti suhu, daya microwave, dan durasi waktu. Ketidaktepatan dalam salah satu parameter ini dapat menyebabkan degradasi senyawa aktif, sehingga menurunkan kualitas hasil akhir (Wildan Syaeful Barqi, 2015).

Selain itu, keterbatasan teknologi dan biaya investasi peralatan MAE masih menjadi hambatan. Peralatan MAE yang digunakan dalam skala laboratorium belum sepenuhnya siap untuk produksi massal karena keterbatasan volume pemrosesan dan kontrol proses yang kompleks. Industri kecil dan menengah mungkin mengalami kesulitan dalam mengadopsi teknologi ini tanpa dukungan teknis dan keuangan yang memadai (Wildan Syaeful Barqi, 2015).

Jika tantangan-tantangan ini dapat diatasi, MAE justru berpotensi mengurangi biaya operasional jangka panjang. Efisiensi dalam konsumsi energi dan pelarut, serta kemampuan mengekstraksi senyawa bernilai tinggi dalam satu proses, akan sangat menguntungkan industri ekstraksi berbasis biomassa. Oleh karena itu, pengembangan prototipe skala besar dan studi kelayakan teknis-ekonomis sangat diperlukan sebelum MAE dapat diterapkan secara luas pada industri mikroalga (Wildan Syaeful Barqi, 2015).

Tantangan lainnya dalam skala industri adalah kontrol suhu yang tidak merata saat kapasitas bahan meningkat. Dalam skala laboratorium, gelombang mikro

dapat menyebar merata pada volume kecil, namun dalam jumlah besar sering terjadi ketidakmerataan suhu sehingga menyebabkan ekstraksi yang tidak optimal. Hal ini dapat mengakibatkan senyawa tertentu terdegradasi lebih cepat daripada yang lain, atau bahkan tidak terekstraksi secara menyeluruh (Wildan Syaeful Barqi, 2015).

Peralatan MAE skala industri juga masih terbatas dari sisi produsen dan ketersediaan lokal. Kebanyakan perangkat industri MAE berasal dari luar negeri dan membutuhkan biaya impor serta teknisi khusus. Selain itu, standar keamanan dan kalibrasi pada sistem microwave dalam volume besar juga masih menjadi tantangan, terutama jika harus memenuhi regulasi industri pangan atau farmasi yang sangat ketat (Wildan Syaeful Barqi, 2015).

Belum adanya regulasi atau standar prosedur baku mengenai penerapan MAE pada biomassa mikroalga juga memperlambat adopsi metode ini secara luas. Industri cenderung ragu berinvestasi tanpa adanya pedoman operasional atau jaminan kelayakan teknis dan ekonomis yang jelas. Oleh karena itu, kerja sama antara akademisi, pelaku industri, dan pemerintah sangat diperlukan untuk mengembangkan roadmap dan regulasi bagi komersialisasi teknologi MAE berbasis mikroalga (Wildan Syaeful Barqi, 2015).

Meski demikian, beberapa studi menunjukkan bahwa investasi awal MAE dapat tertutupi dalam jangka menengah jika digunakan untuk ekstraksi senyawa bernilai tinggi. Penggunaan MAE memungkinkan pendekatan bio-refinery, di mana satu unit alat dapat digunakan untuk mengekstrak minyak, protein, pigmen, dan senyawa bioaktif lainnya secara simultan. Hal ini akan meningkatkan margin keuntungan serta menurunkan jejak karbon proses produksi (Wildan Syaeful Barqi, 2015).

Jika pengembangan MAE difokuskan pada efisiensi energi dan integrasi sistem ekstraksi multiproduk, maka teknologi ini akan sangat strategis untuk diterapkan dalam industri masa depan yang mengutamakan keberlanjutan. Dukungan riset dan transfer teknologi kepada pelaku industri menjadi kunci agar MAE tidak hanya menjadi metode laboratorium, tetapi juga alat produksi utama di sektor agroindustri berbasis mikroalga (Wildan Syaeful Barqi, 2015).

Oleh karena itu, keberhasilan integrasi MAE dalam skala industri memerlukan sinergi antara teknologi, regulasi, dan ekonomi. Dengan semakin meningkatnya kebutuhan pasar terhadap protein nabati, bioenergi, dan antioksidan alami, serta tekanan global terhadap keberlanjutan, MAE memiliki posisi strategis sebagai solusi modern untuk ekstraksi biomassa mikroalga secara efisien dan holistik (Wildan Syaeful Barqi, 2015).

Optimalisasi Parameter MAE untuk Efisiensi Ekstraksi

Efisiensi dari metode MAE sangat dipengaruhi oleh parameter operasional. seperti daya gelombang mikro dan durasi pemanasan. Dalam studi oleh Barqi (2015), variasi daya pada 300 W dan 450 W serta waktu ekstraksi selama 10 dan 20 menit menunjukkan hasil bahwa daya 450 W selama 20 menit menghasilkan rendemen minyak tertinggi, yaitu 0,547%. Hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi daya dan durasi waktu, semakin besar energi yang diberikan untuk merusak dinding sel mikroalga, sehingga meningkatkan pelepasan senyawa intraseluler seperti minyak atau protein. Mekanisme ini juga berlaku secara analog terhadap protein dalam *Chlorella pyrenoidosa*, mengingat bahwa struktur dinding selnya serupa dan kompleksitas ekstraksinya tinggi.

Kandungan Senyawa Bioaktif dalam Mikroalga

Ekstrak mikroalga tidak hanya mengandung minyak atau protein tetapi juga komponen bioaktif lain seperti asam oleat dan tanin. Dalam studi Barqi (2015), senyawa utama hasil ekstraksi minyak adalah asam oleat, asam lemak tak jenuh rantai panjang yang memiliki peran penting dalam nutrisi dan kesehatan. Kandungan asam oleat ini dapat menjadi indikator efektivitas metode MAE dalam mempertahankan senyawa fungsional yang mudah terdegradasi oleh panas. Senyawa ini juga ditemukan dalam protein kompleks mikroalga yang dapat ikut terekstraksi apabila dinding sel berhasil dihancurkan secara efisien. Hal ini menjadi relevan untuk proses ekstraksi protein dari *Chlorella pyrenoidosa* menggunakan MAE, yang bertujuan untuk mempertahankan kualitas senyawa aktifnya.

Perbandingan MAE dengan Metode Konvensional

MAE menawarkan efisiensi lebih baik dibandingkan metode konvensional seperti soxhletasi atau sonikasi. Barqi

(2015) menyebutkan bahwa metode berbasis pelarut organik seperti soxhletasi membutuhkan waktu lebih lama dan tidak efektif dalam merusak dinding sel mikroalga, sehingga hasil rendemen minyak lebih rendah. Sebaliknya, MAE memungkinkan pemanasan volumetrik secara cepat dan merata, yang mempercepat perusakan dinding sel. Perbandingan ini memperkuat alasan penggunaan MAE dalam konteks ekstraksi protein, karena selain meningkatkan hasil, metode ini juga lebih ramah lingkungan dan hemat energi.

Implikasi Hasil MAE terhadap Skala Industri

Temuan dari studi ekstraksi minyak mikroalga menggunakan MAE oleh Barqi (2015) memberikan dasar penting dalam perancangan sistem ekstraksi skala industri. Efektivitas MAE dalam menghasilkan senyawa bioaktif dengan efisiensi tinggi membuka peluang pengembangan bioproses untuk industri pangan, farmasi, dan bioenergi. Untuk ekstraksi protein dari *Chlorella pyrenoidosa*, teknologi MAE dapat diintegrasikan dalam skema produksi berkelanjutan dengan sistem pemrosesan cepat dan minim limbah. Oleh karena itu, pengembangan lebih lanjut terhadap MAE sangat penting untuk mendukung peningkatan nilai tambah produk berbasis mikroalga secara komersial.

Potensi Mikroalga sebagai Sumber Alternatif Senyawa Bernilai Tinggi

Mikroalga seperti *Chlorella* memiliki kandungan senyawa bioaktif yang tinggi, menjadikannya sebagai kandidat potensial bahan baku dalam industri bioproduk, termasuk pangan, farmasi, dan energi terbarukan. Barqi (2015) mencatat bahwa kandungan minyak dalam mikroalga bisa mencapai hingga 70% dari berat kering, bergantung pada kondisi pertumbuhan dan tekanan lingkungan. Sifat autotrofik mikroalga yang mampu melakukan fotosintesis secara efisien serta kemampuannya tumbuh cepat menjadikannya lebih unggul dibandingkan tanaman darat. Dalam konteks protein, potensi ini dapat diterjemahkan ke dalam pemanfaatan mikroalga sebagai sumber protein nabati berkualitas tinggi dengan efisiensi produksi yang lebih baik.

MAE Sebagai Solusi terhadap Struktur Dinding Sel Mikroalga yang Kompleks

Salah satu tantangan dalam ekstraksi senyawa dari mikroalga adalah kekuatan dinding sel yang tinggi, terutama pada spesies seperti *Chlorella*. Barqi (2015) menjelaskan bahwa akumulasi senyawa seperti lipid dan protein di dalam mikroalga tidak mudah dilepaskan tanpa perlakuan fisik atau kimia yang efektif. MAE menjadi solusi karena gelombang mikro dapat merusak struktur sel secara cepat melalui pemanasan internal, memungkinkan pelepasan senyawa tanpa perlu perlakuan kimia keras. Proses ini bukan hanya efisien, tetapi juga dapat mempertahankan stabilitas senyawa seperti protein yang sensitif terhadap suhu tinggi dalam waktu lama.

Efisiensi Energi dan Waktu dalam Penggunaan MAE

Salah satu keunggulan utama dari MAE adalah efisiensi waktu dan energi. Berdasarkan penelitian Barqi (2015), MAE hanya memerlukan waktu 10–20 menit untuk menghasilkan rendemen minyak yang optimal, sementara metode konvensional seperti soxhletasi membutuhkan waktu lebih lama dan konsumsi pelarut lebih banyak. Keunggulan ini menjadikan MAE sangat cocok untuk aplikasi industri yang menuntut produktivitas tinggi dalam waktu singkat. Dalam konteks protein, waktu ekstraksi yang singkat penting untuk mencegah denaturasi protein, sehingga fungsionalitas biologisnya tetap terjaga.

Selektivitas Pelarut dalam MAE

Proses MAE tidak hanya bergantung pada suhu dan waktu, tetapi juga sangat dipengaruhi oleh jenis pelarut yang digunakan. Barqi (2015) menggunakan heksana sebagai pelarut non-polar untuk mengekstraksi lipid dari *Chlorella* sp., karena pelarut ini tidak bercampur dengan air dan secara selektif melarutkan senyawa non-polar. Dalam konteks ekstraksi protein, pelarut yang digunakan perlu disesuaikan dengan polaritas senyawa target agar efisiensinya meningkat. Penggunaan pelarut berbasis air atau buffer dapat dikombinasikan dengan MAE untuk meningkatkan pelepasan protein polar, sesuai dengan sifat kimianya.

Korelasi Antara Kerusakan Sel dan Rendemen Ekstrak

Kerusakan dinding sel mikroalga akibat paparan gelombang mikro memiliki hubungan langsung dengan peningkatan rendemen ekstrak. Barqi (2015) menunjukkan bahwa perlakuan dengan daya 450 W selama 20 menit memberikan kerusakan sel maksimal dan menghasilkan

rendemen tertinggi. Prinsip ini dapat diterapkan pula dalam konteks pengambilan protein dari *Chlorella pyrenoidosa*, karena semakin rusaknya struktur sel, semakin besar peluang protein untuk dilepaskan ke medium ekstraksi. Oleh karena itu, kontrol terhadap daya dan waktu menjadi kunci dalam desain proses MAE yang optimal untuk menghasilkan protein dalam jumlah dan kualitas yang tinggi.

Microwave-Assisted Extraction (MAE) menunjukkan potensi yang signifikan dalam ekstraksi protein dari *Chlorella pyrenoidosa*, mikroalga yang kaya akan protein dan nutrisi. Metode ini menawarkan berbagai keuntungan, termasuk peningkatan efisiensi ekstraksi, pengurangan waktu pemrosesan, dan kemampuan untuk mempertahankan integritas serta aktivitas biologis senyawa yang diekstraksi. Meskipun terdapat tantangan dalam pengaturan parameter proses dan biaya investasi awal untuk peralatan *Microwave-Assisted Extraction* (MAE), prospek penggunaannya sangat menjanjikan, terutama dalam konteks meningkatnya permintaan akan sumber protein nabati yang berkelanjutan.

Dengan kemampuan *Microwave-Assisted Extraction* (MAE) untuk meningkatkan hasil dan kualitas protein, serta kontribusinya terhadap keberlanjutan lingkungan, metode ini dapat menjadi solusi yang efektif untuk tantangan global dalam ketahanan pangan dan perubahan iklim. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengoptimalkan kondisi ekstraksi dan mengeksplorasi aplikasi *Microwave-Assisted Extraction* (MAE) dalam berbagai industri, termasuk pangan, nutrisi, dan biofuel. Dengan demikian, *Microwave-Assisted Extraction* (MAE) berpotensi menjadi metode utama dalam ekstraksi protein dari *Chlorella pyrenoidosa*, membuka peluang baru dalam pengembangan industri mikroalga yang lebih berkelanjutan.

Microwave-Assisted Extraction (MAE) terbukti menjadi metode yang efisien dan ramah lingkungan dalam mengekstraksi protein maupun senyawa bioaktif dari mikroalga *Chlorella pyrenoidosa*. Dibandingkan dengan metode konvensional, MAE mampu meningkatkan hasil ekstraksi, mengurangi waktu proses, serta mempertahankan kualitas senyawa yang diekstraksi. Keunggulan MAE terlihat pada kemampuannya dalam mengatasi kekakuan dinding sel mikroalga serta menjaga stabilitas senyawa

termolabil seperti asam oleat dan tanin. Kandungan nutrisi dan bioaktif yang dihasilkan, termasuk senyawa heptacosane dan tanin, menunjukkan bahwa proses ini tidak hanya menghasilkan protein atau lipid, tetapi juga senyawa fungsional yang bermanfaat dalam bidang pangan, farmasi, dan energi.

Namun demikian, penerapan MAE pada skala industri masih menghadapi beberapa tantangan. Kebutuhan akan parameter proses yang sangat presisi, serta investasi awal untuk peralatan, menjadi kendala yang perlu dikaji lebih dalam. Selain itu, pentingnya optimasi kondisi ekstraksi, seperti daya gelombang mikro dan waktu pemanasan, sangat menentukan rendemen dan komposisi senyawa yang dihasilkan. Meskipun MAE sangat menjanjikan, keberhasilan penggunaannya di industri bergantung pada studi kelayakan teknis dan ekonomis, serta dukungan teknologi yang berkelanjutan.

Secara keseluruhan, mikroalga seperti *Chlorella pyrenoidosa* memiliki potensi besar sebagai sumber bahan baku alternatif yang berkelanjutan. Adanya pemanfaatan teknologi seperti MAE, ekstraksi senyawa bernilai tinggi dari mikroalga menjadi lebih efisien, selektif, dan ramah lingkungan. Pengembangan lebih lanjut terhadap metode MAE, termasuk kombinasi dengan teknik lain seperti hidrolisis enzimatis atau pemisahan multiphase, dapat membuka peluang untuk produksi komersial yang lebih luas dalam industri nutrisi, kesehatan, hingga bioenergi.

Microwave-Assisted Extraction (MAE) terbukti menjadi metode yang efisien dan inovatif untuk mengekstraksi protein dan senyawa bioaktif dari mikroalga, khususnya *Chlorella pyrenoidosa*. Keunggulan utama dari metode ini adalah efisiensi waktu, penghematan pelarut, dan kemampuannya untuk merusak dinding sel mikroalga secara efektif melalui energi gelombang mikro. Dalam konteks ekstraksi minyak, studi Barqi (2015) menunjukkan bahwa penggunaan daya 450 W selama 20 menit menghasilkan rendemen tertinggi sebesar 0,547%, yang menegaskan potensi optimalisasi parameter dalam proses MAE.

Efektivitas MAE juga didukung oleh kemampuan teknologi ini dalam mempertahankan integritas senyawa yang diekstraksi, seperti asam oleat dan senyawa bioaktif lain. Dalam proses ekstraksi protein, hal ini sangat penting

untuk menjaga kualitas fungsional protein yang sensitif terhadap panas. MAE memfasilitasi pelepasan senyawa intraseluler tanpa menyebabkan degradasi berlebih, menjadikannya metode yang unggul dibandingkan metode konvensional yang memerlukan waktu lebih lama dan konsumsi energi lebih besar.

Selain efisiensinya, MAE juga menunjukkan nilai strategis dalam konteks keberlanjutan industri ekstraksi berbasis mikroalga. Metode ini mendukung pendekatan produksi yang ramah lingkungan dan memiliki potensi untuk diimplementasikan dalam skala industri. Penyesuaian parameter seperti daya, durasi, dan jenis pelarut memungkinkan MAE dikembangkan secara fleksibel sesuai kebutuhan produksi, baik untuk industri pangan, kesehatan, maupun bioenergi.

Dengan meningkatnya permintaan akan sumber protein nabati dan senyawa bioaktif yang berkelanjutan, pemanfaatan *Chlorella pyrenoidosa* melalui teknologi MAE menjadi solusi yang menjanjikan. Namun, untuk meningkatkan aplikasinya secara luas, diperlukan penelitian lanjutan terkait optimasi kondisi ekstraksi serta analisis kelayakan ekonominya. MAE memiliki peluang besar untuk menjadi metode utama dalam industri pengolahan mikroalga yang efisien, berkelanjutan, dan bernilai tinggi secara komersial.

Kesimpulan

Microwave-Assisted Extraction (MAE) merupakan metode yang efisien, cepat, dan ramah lingkungan untuk mengekstraksi protein dan senyawa bioaktif dari *Chlorella pyrenoidosa*. Teknologi ini mampu meningkatkan rendemen, mengurangi waktu proses, serta mempertahankan stabilitas senyawa sensitif panas melalui kemampuan gelombang mikro dalam merusak dinding sel secara efektif. Keunggulan MAE juga terlihat pada efisiensi energi dan pelarut, serta potensi penerapannya untuk menghasilkan berbagai komponen bernilai tinggi seperti protein, lipid, asam oleat, heptacosane, dan tanin. Meskipun masih terdapat keterbatasan seperti kebutuhan kontrol parameter yang presisi dan biaya investasi peralatan, potensi MAE untuk dikembangkan pada skala industri tetap sangat besar, terutama dalam memenuhi meningkatnya kebutuhan sumber protein nabati dan bioaktif berkelanjutan. Dengan optimasi

lanjutan dan kajian teknis–ekonomis yang memadai, MAE berpeluang menjadi metode unggulan dalam pengolahan mikroalga modern.

Daftar Pustaka

- Ahmad, F. G., Dinasti, R. A., Syofiyah, M., Ahmawati, M. L., Millati, N., Safitri, D. A., Handoko, S., Hanapi, A., & Ningsih, R. (2016). Ekstraksi, hidrolisis dan partisi metabolit sekunder dari mikroalga *Chlorella* sp. *Alchemy: Journal of Chemistry*, 5, 2460–6871.
- Becker, E. W. (2007). *Microalgae: Biotechnology and microbiology*. Cambridge University Press.
- Borowitzka, M. A. (2013). Microalgae for the production of biofuels and other products. *Journal of Applied Phycology*, 25(3), 743–750. <https://doi.org/10.1007/s10811-012-9861-9>
- Chemat, F., Rombaut, N., Sicaire, A.-G., Meullemiestre, A., Fabiano-Tixier, A.-S., & Abert-Vian, M. (2017). Microwave-Assisted Extraction of food and natural products. *Food Chemistry*, 215, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.07.045>
- Chemat, F., Vian, M. A., & Cravotto, G. (2019). Microwave-assisted extraction: A review of the principles and applications. *Molecules*, 24(3), 1–20. <https://doi.org/10.3390/molecules24030483>
- Cheng, J., et al. (2019). Microwave-assisted three-phase partitioning for efficient protein extraction from *Chlorella pyrenoidosa*. *Chemical Engineering Journal*, 367, 1–9. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019ChEnJ.367....1C>
- Kato, T., et al. (2008). Effects of *Chlorella* supplementation on the excretion of heavy metals in humans. *Journal of Nutritional Science and Vitaminology*, 54(2), 139–144. <https://doi.org/10.3177/jnsv.54.139>
- Miyashita, K., et al. (2015). Health benefits of *Chlorella* : A review. *Journal of Functional Foods*, 18, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2015.04.015>
- Motlagh, M. G., Tahmourespour, A., & Hoodaji, M. (2021). Enhancing cultivation of biodiesel-promising microalgae *Chlorella pyrenoidosa* using plant hormones in municipal wastewater. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 12(3), 565–575. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01755-9>
- Pratt, R., & Johnson, E. (1963). Production of protein and lipid by *Chlorella vulgaris* and *Chlorella pyrenoidosa*. *Proceedings of the Society for Experimental Biology and Medicine*, 114(4), 979–984.
- Putri, P. R., Choirun, A., Al Indis, N., Rusdiarti, & Rakhmadevi, A. G. (2024). Pengaruh waktu ekstraksi terhadap efisiensi ekstraksi protein dengan metode microwave assisted extraction (MAE): A review. *Nacia*, 2(1), 123–130. <https://doi.org/10.25047/nacia.v2i1.111>
- Purwanti, A. (2015). Pengaruh proses ekstraksi bertekanan dalam pengambilan lipid dari mikroalga jenis *Nannochloropsis* sp. dengan pelarut metanol. *Jurnal Teknologi Technoscientia*, 7(2), 112–117.
- Safi, C., Charton, M., Pignolet, O., Silvestre, F., & Vaca-Garcia, C. (2013). Influence of microalgae cell wall characteristics on protein extractability and determination of nitrogen-to-protein conversion factors. *Journal of Applied Phycology*, 25(2), 523–529. <https://doi.org/10.1007/s10811>
- Safi, C., Ursu, A. V., Laroche, C., Zebib, B., & Merah, O. (2014). Aqueous extraction of proteins from microalgae: Effect of different cell disruption methods. *Algal Research*, 3, 61–65. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2013.12.004>
- Safi, C., et al. (2017). Morphology, composition, production, processing and applications of *Chlorella vulgaris*: A review. *Process Biochemistry*, 64, 204–212. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28950135/>
- Souza, A. T. V. D., Souza, K. M. S. D., Amorim, A. P. D., Bezerra, R. P., & Porto, A. L. F. (2024). Methods to protein and peptide extraction from microalgae: A systematic review. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 96(4), e20240113. <https://doi.org/10.1590/0001-3765202420240113>
- Zhang, Y., et al. (2019). Microwave-Assisted Extraction of protein from *Chlorella vulgaris*: Optimization and characterization. *Journal of Applied Phycology*, 31(3), 1751–1760. <https://doi.org/10.1007/s10811-018-1665-5>
- Zhang, L., et al. (2023). Optimization of microwave-assisted enzymatic extraction of polysaccharides from *Chlorella* sp. *International Journal of Food Science & Technology*. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37635998/>
- Zheng, L., et al. (2019). Recovery of protein from lipid-extracted *Chlorella* residue by alkaline extraction: Characterization and nutritive evaluation. *Marine Drugs*, 17(8), 454. <https://www.mdpi.com/1660-3397/17/8/454>
- Zhou, D., et al. (2024). Optimization of microwave-assisted enzymatic hydrolysis to improve the antioxidant activity and essential amino acid content of *Chlorella pyrenoidosa* proteins. *Foods*, 13(3), 366. <https://www.mdpi.com/2304-8158/13/3/366>
- Zhang, Y., Tang, H., Wang, X., & Zhao, J. (2024). Optimization of protease treatment conditions for *Chlorella pyrenoidosa* protein extraction and investigation of its potential as an alternative protein source. *Foods*, 13(3), 366. <https://doi.org/10.3390/foods13030366>
- Chen, Z., et al. (2019). Enhanced microalgal protein extraction and purification using sustainable microwave-assisted multiphase partitioning technique. *Chemical Engineering Journal*, 367, 1–10. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019ChEnJ.367....1C/abstract>
- Duan, Y., Zhang, Y., Liu, Y., & Wang, D. (2017). Extraction of intracellular protein from *Chlorella pyrenoidosa* using a combination of ethanol soaking, enzyme digest, ultrasonication and homogenization techniques. *Bioresource Technology*, 238, 141–147. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28950135/>
- Hu, X., Zhang, Y., Liu, D., & Wang, L. (2019). Biorefining and the functional properties of proteins from lipid and pigment extract residue of *Chlorella pyrenoidosa*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 67(32), 8970–8978. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31374944/>

Zhou, Q., Zhang, J., Zhang, Y., & Wang, L. (2023). Physicochemical characterization and antioxidant activity of polysaccharides from *Chlorella* sp. by microwave-assisted enzymatic extraction. *International Journal of Biological Macromolecules*, 240, 124338. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37635998/>