

Optimasi Ekstraksi Alginat dari *Sargassum polycystum* Menggunakan Sistem Cairan Dua Fase Berbantuan Gelombang Ultrasonik Berdasarkan *Response Surface Methodology* dan Pemodelan Kinetika Difusi

Optimization of Alginate Extraction from Sargassum polycystum Using an Ultrasound-Assisted Aqueous Two-Phase System Based on Response Surface Methodology and Diffusion Kinetic Modeling

Erica Wijaya, Efendi Utomo, Meta F. Rizkiana, Yukti Nurani, Boy Fachri*

Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Jember, Jl. Kalimantan-Tegal Boto, Jember 68121, Jawa Timur, Indonesia

*Email: fachri.teknik@unej.ac.id

Article history:

Diterima : 2 Juli 2026
Direvisi : 8 Agustus 2026
Disetujui : 3 September 2026
Mulai online : 29 September 2026

E-ISSN : 2337-4888

How to cite:

Erica Wijaya, Efendi Utomo, Meta F. Rizkiana, Yukti Nurani, Boy Fachri. (2026). Optimasi Ekstraksi Alginat dari *Sargassum polycystum* Menggunakan Sistem Cairan Dua Fase Berbantuan Gelombang Ultrasonik Berdasarkan *Response Surface Methodology* dan Pemodelan Kinetika Difusi. Jurnal Teknik Kimia USU, 15(2), 152–163.

ABSTRAK

Sargassum polycystum berpotensi menjadi sumber alginat untuk industri pangan dan farmasi. Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimasi ekstraksi alginat menggunakan sistem cairan dua fase berbantuan gelombang ultrasonik serta memodelkan kinetika reaksi berdasarkan hukum difusi Fick. Ekstraksi dilakukan menggunakan 2-propanol dan K_2HPO_4 dengan variasi waktu, daya ultrasonik, serta rasio bahan-pelarut. Optimasi dilakukan menggunakan *Response Surface Methodology* dengan desain Box-Behnken. Analisis FT-IR dan HPLC mengonfirmasi isolasi alginat. Nilai aktual rendemen alginat sebesar 81,37% tercapai pada rasio bahan-pelarut 0,04 g/mL, waktu 20 menit, dan daya ultrasonik 60% (390 watt). Hasil optimasi memberikan rendemen sebesar 82,244% dengan nilai R^2 sebesar 0,9960. Nilai rendemen hasil validasi model sebesar 81,93%, dengan kesalahan prediksi relatif sebesar 0,38%. Model kinetik berdasarkan hukum difusi Fick menunjukkan D_e 1.619×10^{-11} . Dengan SSE sebesar 0,006673, model menunjukkan kesesuaian dengan data eksperimen.

Kata kunci: *Sargassum polycystum*, alginat, ultrasonik, sistem cairan dua fase

ABSTRACT

Sargassum polycystum has the potential to be a source of alginate for the food and pharmaceutical industries. This study aimed to optimise alginate extraction using an ultrasound-assisted aqueous two-phase system and model the extraction kinetics based on Fick's diffusion law. Extraction was conducted using 2-propanol and K_2HPO_4 , with variations in extraction time, ultrasonic power, and solid-to-solvent ratio. Optimisation was performed using response surface methodology with Box-Behnken design. FT-IR and HPLC analyses confirmed the isolation of alginate. The actual alginate yield of 81.37% was achieved at a solid-to-solvent ratio of 0.04 g/mL, an extraction time of 20 min, and an ultrasonic power of 60% (390 Watts). The optimisation results predicted an alginate yield of 82.244%, with an R^2 value of 0.9960 for the RSM–Box–Behnken model. The experimental yield obtained from model validation was 81.93%, with a relative prediction error of 0.38%. The kinetic model based on Fick's diffusion law yielded a D_e of 1.619×10^{-11} and an SSE of 0.006673, indicating excellent agreement between the model predictions and the experimental data.

Keyword: *Sargassum polycystum*, alginate, ultrasound, liquid biphasic system



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International.
<https://doi.org/10.32734/jtk.v15i2.26295>

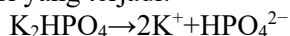
1. Pendahuluan

Sargassum polycystum merupakan jenis alga cokelat yang termasuk dalam kelas *Phaeophyceae*, ordo *Fucales*, dan famili *Sargassaceae*. Spesies ini merupakan salah satu *Sargassum* yang paling melimpah di kawasan tropis Asia Tenggara, khususnya di wilayah pesisir Indonesia. Rumput laut ini mengandung beragam polisakarida struktural, termasuk alginat. Alginat merupakan komponen utama yang banyak dimanfaatkan dalam industri, sedangkan fukoidan diketahui memiliki sifat biologis penting, seperti aktivitas antioksidan dan antikoagulan. Kandungan alginat yang tinggi pada *Sargassum polycystum* menjadikannya sumber yang sangat potensial untuk produksi alginat [1].

Salah satu komponen utama yang ditemukan dalam *Sargassum polycystum* adalah alginat, yaitu kopolimer linier yang tersusun atas unit asam manuronat dan asam guluronat. Struktur ini memberikan sifat reologi yang khas, sehingga alginat banyak digunakan dalam berbagai industri, termasuk biomedis, kosmetik, tekstil, farmasi, dan pangan [2]. Alginat merupakan polisakarida utama yang terdapat pada dinding sel alga cokelat, dengan kandungan sekitar 40% dari berat kering rumput laut [3].

Pada umumnya, proses ekstraksi dilakukan untuk memperoleh alginat. Metode ekstraksi konvensional berlangsung lama dan membutuhkan suhu tinggi, sehingga menghasilkan rendemen ekstrak yang terbatas serta konsumsi energi yang besar [4]. Sementara itu, alginat sangat sensitif terhadap suhu sehingga pemilihan metode ekstraksi menjadi faktor krusial untuk memperoleh alginat dengan kemurnian serta rendemen yang optimal [5].

Sistem cairan dua fase (*Liquid Biphasic System/LBS*) lebih unggul dibandingkan dengan ekstraksi pelarut organik konvensional karena memiliki biokompatibilitas tinggi serta kandungan air yang besar, sehingga mendukung pendekatan ramah lingkungan. Lapisan antarmuka tipis antara kedua fase meningkatkan efisiensi pemisahan dan pemurnian, terutama bila dipadukan dengan teknik inovatif seperti ultrasonikasi [6], [7]. Untuk meningkatkan efisiensi proses, gelombang ultrasonik diterapkan dalam metode LBS. Metode ini dipilih karena memberikan sejumlah keunggulan dibandingkan dengan teknik ekstraksi konvensional [8]. Metode ekstraksi nontermal ini mampu membentuk sistem dua fasa secara spontan. K_2HPO_4 memiliki efek salting-out yang kuat, ketika dicampurkan ke dalam 2-propanol. Hal ini, dikarenakan ion K^+ dan HPO_4^{2-} memiliki afinitas yang tinggi terhadap molekul air sehingga mengurangi jumlah air bebas yang dapat melarutkan alkohol. Sementara itu, 2-propanol lebih hidrofobik sehingga mempercepat pemisahan, membantu mengurangi kelarutan beberapa pengotor, sekaligus meningkatkan distribusi senyawa target, sehingga dapat menghasilkan rendemen yang lebih tinggi. Pada awal pencampuran, air, 2-propanol, dan K_2HPO_4 membentuk satu fase homogen. Hal ini karena molekul air masih mampu membentuk ikatan hidrogen dengan molekul 2-propanol, ion K^+ , dan ion HPO_4^{2-} . Akibatnya, seluruh komponen masih bercampur sempurna (homogen). Ketika, konsentrasi garam (K_2HPO_4) meningkat, ion-ion garam mulai mengikat molekul air lebih banyak dibandingkan dengan 2-propanol. Reaksi yang terjadi:



Kemudian $HPO_4^{2-} + H_2O \rightarrow HPO_4^{2-} \cdot nH_2O$

Pada fase ini, sebagian besar molekul air terikat pada ion fosfat. Akibatnya, jumlah air bebas menurun; kelarutan 2-propanol dalam air berkurang, sehingga sistem menjadi dua fase [9], [10].

Penelitian mengenai ekstraksi alginat dari *Sargassum* menggunakan metode konvensional maupun teknologi ultrasonik telah dilaporkan. Namun demikian, sebagian besar penelitian tersebut masih berfokus pada peningkatan rendemen ekstraksi tanpa mengintegrasikan pendekatan pemisahan berbasis LBS dengan intensifikasi proses menggunakan gelombang ultrasonik, serta belum mengembangkan model kinetika yang mampu menjelaskan mekanisme perpindahan massa selama proses ekstraksi. Akibatnya, pemahaman mengenai fenomena difusi alginat selama ekstraksi masih terbatas sehingga menyulitkan pengembangan model prediktif untuk optimasi maupun skala industri.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini mengusulkan pendekatan terintegrasi berupa ekstraksi alginat dari *Sargassum polycystum* dengan menggunakan sistem cair dua fase berbantuan gelombang ultrasonik. Variabel utama, seperti waktu ekstraksi, daya ultrasonik, serta rasio bahan baku terhadap pelarut, akan diamati pengaruhnya terhadap rendemen alginat. Penelitian ini juga mengembangkan model kinetika berbasis hukum difusi Fick untuk menentukan koefisien difusi efektif, serta menyusun model prediktif yang dapat digunakan untuk mengoptimalkan proses. Berdasarkan penelusuran pustaka yang dilakukan, belum ditemukan laporan yang mengintegrasikan LBS–UAE dengan pemodelan kinetika berbasis difusi Fick untuk ekstraksi alginat dari *Sargassum polycystum*. Oleh karena itu, penelitian ini diharapkan tidak hanya menghasilkan proses ekstraksi yang lebih efisien dan ramah lingkungan, tetapi juga memberikan kontribusi ilmiah berupa model kinetika yang dapat digunakan sebagai dasar untuk optimasi dan pengembangan skala proses.

2. Metode

Alat dan Bahan

Bahan baku utama yang digunakan adalah alga cokelat *Sargassum polycystum* yang diperoleh dari pesisir selatan Jember. 2-propanol (ROFA, Indonesia) dan K_2HPO_4 (> 98 wt%) (ROFA, Indonesia) digunakan sebagai pelarut dan pembentuk sistem dua fase. Kalsium klorida ($CaCl_2$) (Haizhiyuab, China) untuk presipitasi alginat; etanol 96% (PT. Fuku Sejahtera, Indonesia); serta kalsium alginat untuk analisis FTIR. Akuades digunakan sebagai pelarut untuk K_2HPO_4 . Penelitian ini juga menggunakan amonium format (Sigma-Aldrich) untuk analisis FT-IR, asetonitril pro-HPLC grade (Mallinckrodt), dan air pro-HPLC (Merck, US/Canada).

Peralatan yang digunakan meliputi sentrifus (Oregon LC-04S, Indonesia), probe ultrasonik (LUHS-A12, Inggris), spektrofotometer FT-IR (Shimadzu IRTracer-100, Jepang), serta sistem HPLC Agilent seri 1100 yang dilengkapi dengan detektor Agilent 380 ELSD dan kolom Zorbax HILIC Plus berukuran $100 \times 4,6$ mm dengan ukuran partikel $3,5 \mu m$.

Proses Ekstraksi

Serbuk *Sargassum polycystum* berukuran 80 mesh dimasukkan ke dalam kolom ekstraktor yang berisi 2-propanol. Gelombang ultrasonik kemudian diaplikasikan dengan daya tertentu selama proses ekstraksi. Filtrat dipisahkan dari residu padat melalui sentrifugasi pada 2500 rpm. Selanjutnya, larutan K_2HPO_4 ditambahkan dengan cara ditetesi untuk membentuk sistem dua fase. Fase bawah dipisahkan secara perlahan dan dimasukkan ke dalam corong pemisah polytetrafluoroethylene (PTFE) berkapasitas 250 mL. Larutan $CaCl_2$ 1 M dengan rasio 1:1 ditambahkan secara bertahap, kemudian campuran diinkubasi selama 30 menit untuk menghasilkan presipitasi alginat pada fase bawah. Setelah itu, alginat dipisahkan dari filtrat, dan dikeringkan dalam oven pada suhu $70^\circ C$ sampai mencapai berat konstan, lalu ditimbang untuk mengetahui berat rendemen yang dihasilkan.

Variabel Ekstraksi

Variabel ekstraksi meliputi waktu ekstraksi ultrasonik selama 10, 15, dan 20 menit; daya ultrasonik sebesar 60% (390 W), 65% (422,5 W), dan 70% (455 W) dari daya maksimum (650 W); serta rasio bahan baku terhadap pelarut sebesar 1:33, 1:25, dan 1:20 g/mL. Rasio tersebut diperoleh dengan menggunakan volume pelarut tetap, yaitu 20 mL, dengan variasi massa bahan baku *Sargassum* sebesar 0,6 g, 0,8 g, dan 1 g. Penggunaan 0,6 g *Sargassum* dalam 20 mL pelarut menghasilkan rasio 0,03 g/mL atau setara dengan 1:33 g/mL, penggunaan 0,8 g dalam 20 mL menghasilkan rasio 0,04 g/mL atau 1:25 g/mL, sedangkan penggunaan 1 g dalam 20 mL menghasilkan rasio 0,05 g/mL atau 1:20 g/mL. Variabel tersebut ditetapkan untuk memaksimalkan pelepasan alginat tanpa merusak struktur senyawa akibat proses yang berlebihan. Ekstraksi dilakukan menggunakan *ultrasonic processor* dengan frekuensi tetap 20 kHz pada suhu ruang, dilengkapi dengan probe berdiameter 12 mm yang dicelupkan pada kedalaman 2 cm dari permukaan larutan. Proses ultrasonikasi dijalankan dalam mode pulsed kontinu.

Menghitung Rendemen

Rendemen didefinisikan sebagai rasio antara massa alginat yang berhasil diekstraksi dan massa bahan baku kering (*Sargassum polycystum*). Nilai rendemen ditentukan berdasarkan Persamaan (1).

$$\text{Rendemen} = \frac{\text{Berat Alginat}}{\text{Berat Alginat Kering}} \times 100\% \quad (1)$$

Analisis Gugus Fungsi FTIR (Spektroskopi Inframerah Transformasi Fourier)

Spektroskopi *Fourier Transform Infrared* (FT-IR) merupakan teknik yang digunakan untuk mengkarakterisasi fukoidan [11]. Sampel kalsium alginat hasil ekstraksi dikeringkan dan digerus menjadi serbuk halus menggunakan mortar dan pestle. Serbuk ini kemudian dianalisis secara langsung menggunakan spektrofotometer FT-IR. Prosedur standar seperti *smoothing*, koreksi garis dasar (*baseline correction*), penentuan puncak serapan (*peak picking*), serta kompensasi gangguan atmosfer dilakukan untuk memastikan akurasi data. Puncak serapan yang diperoleh kemudian dibandingkan dengan data standar kalsium alginat [12].

Analisis Komposisi

Analisis komposisi ekstrak dilakukan menggunakan kromatografi cair kinerja tinggi (HPLC). Teknik HPLC berfungsi untuk memisahkan, mengidentifikasi, dan mengukur kuantitas senyawa terlarut dalam suatu larutan [13]. Sebanyak 10 mg ekstrak *Sargassum polycystum* yang mengandung alginat dilarutkan dalam 10 mL air pro-HPLC menggunakan labu ukur. Campuran tersebut disonikasi selama 20 menit, kemudian disaring

menggunakan membran filter berukuran 0,45 μm , dan selanjutnya diinjeksikan ke dalam sistem HPLC. Pemisahan alginat dilakukan pada kolom berbasis silika (Zorbax HILIC Plus 100 mm $\times$ 4,6 mm $\times$ 3,5 μm , Agilent) pada suhu 30 $^{\circ}\text{C}$, dengan laju alir 1 mL/menit dan volume injeksi 5 μL . Detektor ELSD digunakan pada suhu nebulisasi dan evaporasi masing-masing 50 $^{\circ}\text{C}$ dan 80 $^{\circ}\text{C}$, serta laju alir nitrogen sebesar 1,10 SLM. Fase gerak terdiri atas 10 mM amonium format dengan pH 4,5 dan 70% asetonitril. Amonium format digunakan sebagai buffer untuk meningkatkan retensi dan selektivitas. Fase gerak dipersiapkan menggunakan unit filtrasi vakum Millipore dengan filter 0,45 μm , kemudian didegassing dalam bak ultrasonik selama 15 menit sebelum digunakan [14], [15].

Optimasi dan Analisis Statistik

Optimasi variabel ultrasonik untuk ekstraksi alginat dilakukan menggunakan metode *Response Surface Methodology* (RSM). RSM merupakan metode statistik yang efektif untuk mengoptimalkan respons yang dipengaruhi oleh berbagai variabel independen, sekaligus mempertimbangkan interaksi antarvariabel tersebut. Penelitian ini menerapkan RSM dengan rancangan Box–Behnken Design (BBD) dengan 17 percobaan. Sebanyak 12 percobaan dilakukan secara tunggal. Sementara itu, titik pusat (*center point*) pada kondisi waktu ekstraksi 15 menit, rasio bahan baku:pelarut 0,04 g/mL, dan daya ultrasonik 65%, direplikasi sebanyak lima kali. Replikasi pada titik pusat digunakan untuk mengevaluasi ketidaksesuaian model (*lack of fit*). Analisis varians digunakan untuk memodelkan rendemen berdasarkan regresi kuadratik (orde kedua), sebagaimana dinyatakan dalam Persamaan (2).

$$y_{alg} = b_0 + \sum_{i=1}^3 b_{ii}x_i + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 b_{ij}x_i x_j \quad (2)$$

y_{alg} = rendemen alginat; b_0 = intersep; b_i = koefisien linier dari variabel proses; b_{ii} = koefisien kuadratik; b_{ij} = koefisien interaksi antarvariabel; serta x_i dan x_j = variabel independen.

Model Kinetika

Model kinetika ekstraksi alginat diturunkan dari hukum Fick untuk koordinat bola dan dapat dituliskan seperti dalam Persamaan (3), sebagai berikut [16].

$$\frac{1}{De} \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial C}{\partial r} \quad (3)$$

C menyatakan konsentrasi alginat pada posisi r pada waktu t . Sementara itu, konsentrasi alginat pada permukaan partikel diasumsikan nol, sehingga kondisi batas dapat ditetapkan seperti pada Persamaan (4) dan (5).

$$C_{(r,0)} = C_0 \quad (4)$$

$$C_{(R,t)} = 0 \quad (5)$$

Persamaan (3) diselesaikan menggunakan metode pemisahan variabel dengan kondisi batas dan menghasilkan solusi analitik seperti pada Persamaan (6), yang selanjutnya diintegrasikan menjadi Persamaan (7). Nilai β dihitung menggunakan Persamaan (8), dengan n sebagai jumlah data kinetika, De sebagai koefisien difusi (m^2/menit), R sebagai jari-jari partikel, dan t sebagai waktu difusi (menit).

$$C_{r,t} = \frac{2C_0R}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n \sin\left(\frac{n\pi r}{R}\right)}{n} e^{-\left(\frac{n\pi}{R}\right)^2 De t} \quad (6)$$

$$y_{cal} = 1 - \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} e^{-\beta n^2 t} \quad (7)$$

$$\beta = \frac{\pi^2 De}{R^2} \quad (8)$$

Nilai β dievaluasi menggunakan metode minimisasi *sum of squared errors* (SSE). Secara matematis, SSE didefinisikan sebagaimana pada Persamaan (9).

$$SSE = \sum_{i=1}^n (y_{data} - y_{cal})^2 \quad (9)$$

3. Hasil

Ekstraksi alginat dari serbuk *Sargassum polycystum* berukuran 80 mesh dilakukan dengan menggunakan sistem cairan dua fase berbantuan gelombang ultrasonik. Sistem ini menggunakan pelarut 2-propanol dan larutan K_2HPO_4 untuk membentuk sistem dua fase. Pada akhir ekstraksi, alginat dipisahkan melalui presipitasi, dimurnikan dengan sentrifugasi dan filtrasi, lalu dikeringkan untuk menentukan berat rendemen yang dihasilkan.

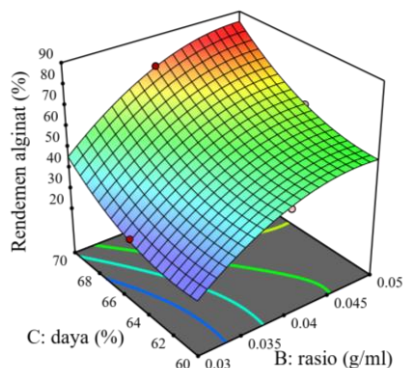
Pengaruh Variabel Ekstraksi terhadap Rendemen

Pengaruh variabel ekstraksi seperti waktu ekstraksi ultrasonik, daya ultrasonik dan rasio bahan baku-pelarut terhadap jumlah rendemen, disajikan dalam Tabel 1, yang menunjukkan rendemen sebagai fungsi dari variabel proses. Rendemen tertinggi diperoleh pada percobaan kelima, dengan nilai sebesar 81,37% yang dicapai pada rasio bahan baku-pelarut sebesar 0,04 g/mL, waktu ekstraksi 20 menit, dan daya ultrasonik sebesar 60% dari daya maksimum.

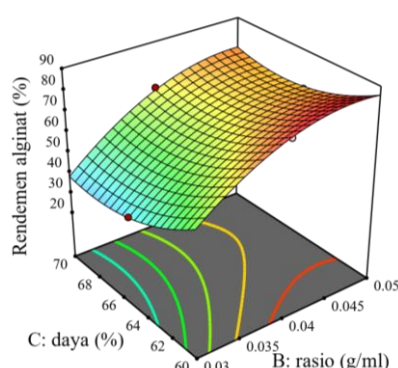
Tabel 1. Ekstraksi alginat dari *Sargassum polycystum* pada berbagai kondisi ekstraksi

Percobaan	Waktu Ekstraksi (menit)	Rasio Bahan Baku: Pelarut (g/mL)	Daya (%)	Rendemen (%)
1	10	0,03	65	27,66
2	15	0,03	60	34,66
3	15	0,03	70	34,83
4	20	0,03	65	40,16
5	10	0,04	60	47,50
6	10	0,04	70	75,62
7	15	0,04	65	55,62
8	15	0,04	65	52,50
9	15	0,04	65	54,25
10	15	0,04	65	53,75
11	15	0,04	65	55,03
12	20	0,04	60	81,37
13	20	0,04	70	67,87
14	10	0,05	65	61,21
15	15	0,05	60	65,82
16	15	0,05	70	74,53
17	20	0,05	65	71,50

A.



B.



Gambar 1. Interaksi rasio dan daya terhadap rendemen alginat pada (a) waktu 10 menit dan (b) 20 menit

Pengaruh variabel ekstraksi terhadap rendemen alginat juga dapat disajikan secara grafis, seperti pada Gambar 1. Hasil ekstraksi meningkat seiring dengan rasio, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1, dengan hasil tertinggi (81,37%) pada rasio 0,04, daya ultrasonik 60%, dan waktu ekstraksi 20 menit. Sementara itu,

pada rasio dan daya yang sama, dengan durasi 10 menit, rendemen yang dihasilkan sebesar 47,50%. (0,05) Akan tetapi, pada kondisi yang sama, dengan daya yang lebih tinggi, yaitu 70%, rendemen meningkat sebesar 59,20%, setara dengan rendemen sebesar 75,62%. Pada daya ultrasonik yang tinggi, persentase hasil alginat meningkat, diduga akibat terbentuknya gelembung kavitasi oleh gelombang ultrasonik. Runtuhnya gelembung kavitasi menghasilkan turbulensi kuat, tumbukan partikel, serta gangguan di dalam pori-pori. Kavitasi di dekat antarmuka padat–cair juga menghasilkan semburan cairan (*liquid jets*) yang merusak matriks *Sargassum* dan menembus rongga permukaan, sehingga meningkatkan perpindahan massa [17].

Tabel 2 menunjukkan bahwa berat rendemen yang dihasilkan dalam penelitian ini lebih tinggi dibandingkan dengan beberapa penelitian sebelumnya. Hal ini juga memberikan konfirmasi bahwa penerapan sistem cairan dua fase berbantuan dengan gelombang ultrasonik memberikan rendemen yang lebih tinggi dibandingkan dengan beberapa nilai yang dilaporkan dalam penelitian terdahulu. Selain itu, 2-propanol menunjukkan potensi yang sangat baik untuk meningkatkan hasil ekstraksi. Temuan ini memberikan wawasan baru mengenai pentingnya penerapan metode ekstraksi yang selektif serta pemilihan pelarut yang tepat untuk mengekstraksi senyawa bioaktif dari bahan alam.

Tabel 2. Perbandingan hasil ekstraksi alginat dari *Sargassum polycystum* menggunakan berbagai metode

No.	Metode ekstraksi	Variabel	Pelarut	Rendemen, wt%	Referensi
1	Terbantuan gelombang ultrasonik	Waktu ekstraksi, rasio bahan terhadap pelarut	H ₂ O	15%	[18]
2	Kondisi alkali	Suhu, waktu ekstraksi, rasio bahan terhadap pelarut	Etanol	19%	[19]
3	Terbantuan gelombang mikro	Suhu, waktu ekstraksi	H ₂ O	36%	[20]
4	Terbantuan gelombang ultrasonik	Suhu, daya UEA	HCl	54%	[21]
5	Sistem cairan dua fase berbantuan gelombang ultrasonik	Waktu ekstraksi, daya UAE, rasio bahan terhadap pelarut	2 propanol, K ₂ HPO ₄	81%	Penelitian ini

Sementara itu, jika dibandingkan dengan jenis alga lainnya, *Sargassum polycystum* memberikan rendemen alginat yang lebih tinggi, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 3. Hal ini menunjukkan bahwa *Sargassum polycystum* mengandung jumlah alginat yang relatif lebih tinggi. Selain itu, struktur seluler *Sargassum polycystum*, yang lebih mudah terdegradasi dibandingkan alga lain, memungkinkan pelarut menembus dinding sel lebih cepat dan efisien, sehingga menghasilkan alginat yang lebih optimal. Temuan ini memberikan wawasan tambahan mengenai pentingnya pemilihan bahan baku yang sesuai untuk mencapai hasil ekstraksi alginat yang optimal.

Tabel 3. Ekstraksi alginat dari berbagai bahan baku alga

No.	Bahan	Metode	Rendemen, wt%	Referensi
1	<i>Nizamuddinina zanardini</i>	Metode dengan bantuan gelombang mikro	14%	[22]
	<i>Ascophyllum nodosum</i>	Ekstraksi dengan bantuan ultrasonik	23.7%	[5]
	<i>Ascophyllum nodosum</i>	Ekstraksi dengan bantuan ultrasonik	70%	[23]
	<i>Sargassum polycystum</i>	Ekstraksi dengan bantuan ultrasonik – Sistem Bifasik Cair	81%	Penelitian ini

Model Statistik

Analisis varians dilakukan untuk menilai pengaruh variabel proses terhadap rendemen ekstraksi serta untuk mengembangkan model statistik menggunakan *Response Surface Method* (RSM) dengan rancangan Box-Behnken (BBD). Variabel proses yang meliputi waktu ekstraksi, daya, dan rasio bahan baku terhadap pelarut dianalisis secara bersamaan untuk menentukan efek masing-masing dan gabungannya terhadap rendemen, serta menghasilkan model prediktif yang dapat menjelaskan hubungan antara variabel ekstraksi dan rendemen

yang dihasilkan. Hasil analisis disajikan dalam Tabel 4. Berdasarkan Tabel 4, waktu ekstraksi dan rasio merupakan faktor utama yang memengaruhi rendemen alginat secara signifikan dibandingkan dengan daya ultrasonik. Hal ini ditunjukkan oleh nilai $p < 0,0001$, yang menunjukkan bahwa hasil tersebut lebih kecil daripada probabilitas yang ditentukan ($\alpha = 0,05$). Waktu ekstraksi dan daya berperan penting dalam meningkatkan rendemen. Paparan gelombang ultrasonik dalam waktu lama dan pada daya tinggi akan mempercepat difusi pelarut, sehingga mengakibatkan perpindahan massa alginat dari matriks sel ke dalam pelarut.

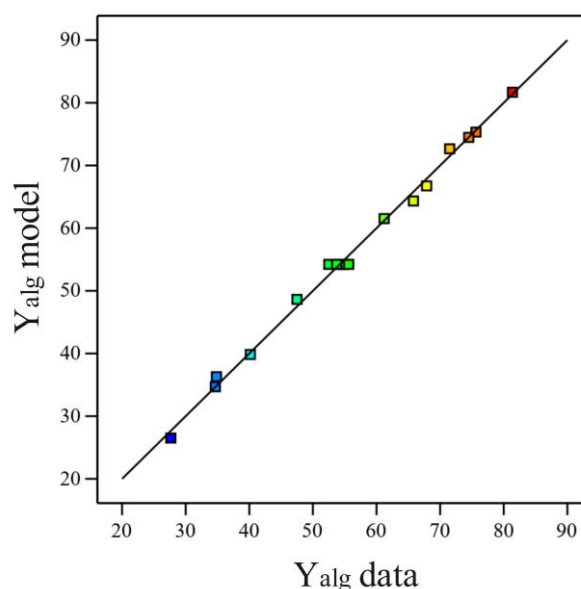
Tabel 4. Analisis varians pada ekstraksi alginat

Sumber	Jumlah kuadrat	Derajat kebebasan	Rata-rata kuadrat	F-nilai	p-nilai	
Model	3910,12	9	434,46	193,83	< 0,0001	Signifikan
A-waktu	299,21	1	299,21	133,49	< 0,0001	
B-rasio	2300,68	1	2300,68	1026,45	< 0,0001	
C-daya	68,98	1	68,98	30,78	0,0009	
AB	1,21	1	1,21	0,5398	0,4864	
AC	433,16	1	433,16	193,25	< 0,0001	
BC	18,20	1	18,20	8,12	0,0247	
A ²	140,47	1	140,47	62,67	< 0,0001	
B ²	409,99	1	409,99	182,92	< 0,0001	
C ²	275,76	1	275,76	123,03	< 0,0001	
Sisa	15,69	7	2,24			
Ketidaksesuaian	9,93	3	3,31	2,30	0,2914	Tidak signifikan
Kesalahan murni	5,76	4	1,44			
Cor Total	3925,81	16				

Hasil analisis varians memberikan model kuadratik pada Persamaan (10), yang valid dan signifikan ($p < 0,0001$) dalam memprediksi rendemen ekstraksi. Model kuadratik yang dihasilkan merupakan fungsi dari variabel independen, yaitu waktu ekstraksi ultrasonik (A), rasio (B), dan daya UAE (C). Rasio bahan terhadap pelarut memberikan pengaruh paling dominan berdasarkan nilai F tertinggi (1026,45), diikuti oleh waktu ekstraksi (133,49) dan daya ultrasonik (30,78). Selain pengaruh utama, interaksi waktu ekstraksi dengan daya ultrasonik (AC) dan rasio bahan terhadap pelarut dengan daya ultrasonik (BC) juga signifikan, masing-masing dengan $p < 0,0001$ dan $p = 0,0247$. Hal ini menunjukkan bahwa pengaruh daya ultrasonik terhadap rendemen bergantung pada waktu ekstraksi dan rasio bahan terhadap pelarut. Sebaliknya, interaksi AB tidak signifikan ($p = 0,4864$). Signifikansi A², B², dan C² ($p < 0,0001$) menunjukkan adanya hubungan nonlinier antara variabel proses dan rendemen, sehingga optimasi perlu mempertimbangkan pengaruh utama, interaksi AC dan BC, serta efek kuadratik.

Uji ketidaksesuaian model (*lack of fit*) menghasilkan nilai 0,2914 ($> 0,05$), yang menunjukkan tidak adanya deviasi yang signifikan sehingga model layak digunakan untuk memprediksi kandungan rendemen dalam proses ekstraksi. Kelayakan model juga dinyatakan oleh nilai R² 0,9960, R² prediksi 0,9572 dan R² terlaras 0,9909. Nilai R² terlaras ini menegaskan adanya hubungan yang signifikan antara waktu ekstraksi, daya, dan rasio bahan terhadap pelarut. Sementara itu, nilai *adequate precision* yang diperoleh sebesar 48,0470 lebih besar dari 4, juga menunjukkan bahwa model penelitian ini sangat sesuai untuk digunakan. Tingkat kesesuaian model juga ditunjukkan oleh Gambar 2, yang menyatakan adanya akurasi yang baik, antara data eksperimen dan data model.

$$y_{alg}(\text{rendemen}) = 890,12917 + 21,78813A + 6981,66667B - 36,95771C - 11,00000AB - 0,416250AC + 42,66667BC + 0,231042A^2 - 98677,08333B^2 + 0,323708C^2 \quad (10)$$

Gambar 2. Kesesuaian antara data y_{alg} data eksperimen dan model

Optimasi dan Validasi

Proses optimasi dilakukan menggunakan metode *Response Surface* Box-Behnken dan menghasilkan model matematis seperti pada Persamaan (10), yang menunjukkan hubungan antara waktu ekstraksi ultrasonik, rasio bahan baku terhadap pelarut, dan daya ultrasonik terhadap respons *yield* (rendemen). Model kemudian digunakan untuk menentukan kombinasi kondisi operasi yang menghasilkan respons optimal. Berdasarkan hasil analisis nilai *desirability*, *yield* (rendemen) ekstrak optimal yang diperoleh adalah 82,244%, yang dicapai pada waktu ekstraksi ultrasonik 19,900 menit, daya ultrasonik 60,835%, dan rasio bahan baku terhadap pelarut 0,045 g/ml.

Tabel 5. Hasil optimasi berdasarkan nilai *desirability*

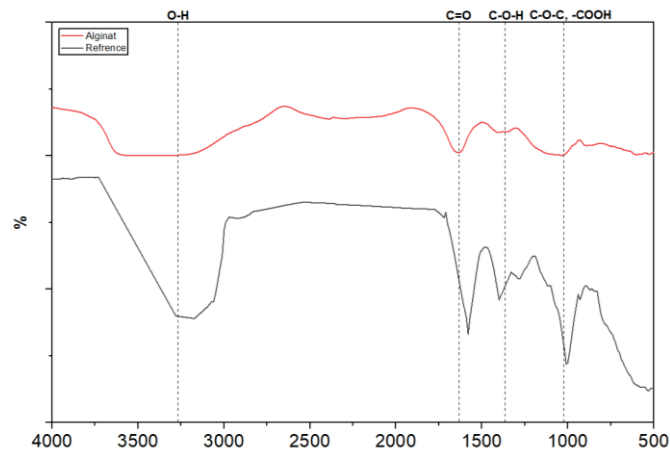
No.	Waktu	Rasio bahan: pelarut	Daya	<i>yield</i> alginat, %	<i>Desirability</i>
1	19.900	1:22,22 (0.045)	60.835	82.244	1.000

Kondisi optimum yang diprediksi oleh model kemudian dikonfirmasi melalui eksperimen tunggal dan menghasilkan *yield* alginat sebesar 81,93 %. Eksperimen validasi menunjukkan nilai kesalahan prediksi relatif (*relative prediction error*) yang sangat rendah, yaitu sebesar 0,38%, yang menunjukkan tingkat kesesuaian yang tinggi antara nilai yang diprediksi oleh RSM (82,244 %) dan nilai eksperimen (81,93%), sehingga mengonfirmasi kecukupan dan keandalan model yang dikembangkan.

$$\text{Kesalahan prediksi relatif} = \left[\frac{\text{Nilai prediksi model} - \text{nilai eksperimen}}{\text{nilai prediksi model}} \right] \times 100 \% \quad (11)$$

Analisis FTIR

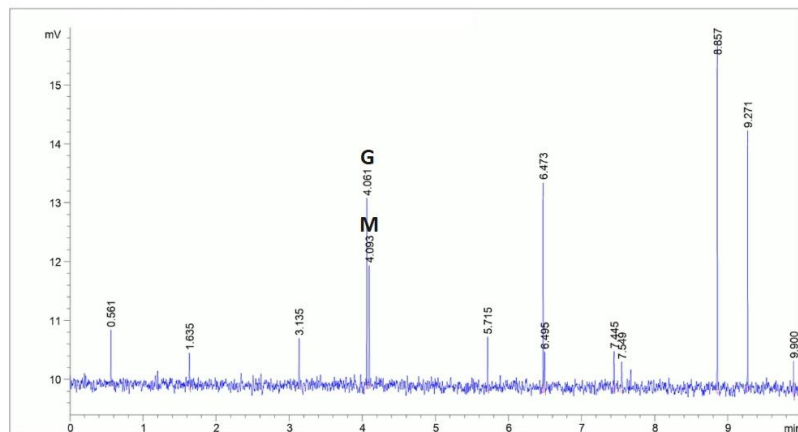
Spektrum inframerah digunakan untuk menentukan keberadaan berbagai ikatan kimia dalam senyawa organik. Metode KBr, atau teknik pelet KBr, merupakan prosedur analisis yang meliputi penggerusan sampel dan pencampuran sampel yang telah halus dengan serbuk KBr, kemudian pembentukan pelet untuk pengukuran transmisi menggunakan FTIR. Teknik ini banyak digunakan untuk memperoleh spektrum transmisi inframerah, dan reproduktibilitas pelet dilaporkan cukup memadai untuk identifikasi spesies anorganik [24]. Spektrum kalsium alginat pada Gambar 3 menunjukkan serapan pada daerah 3457 cm^{-1} untuk gugus hidroksil, serapan pada 1617 cm^{-1} untuk gugus karbonil, serta serapan pada 1418 cm^{-1} yang mengindikasikan ikatan C–O–H. Kehadiran ikatan C–O–C dan –COOH terlihat pada daerah sekitar 1030 cm^{-1} . Dengan demikian, keberadaan alginat ditunjukkan oleh vibrasi gugus hidroksil, karboksil, karbonil, serta ikatan antarkarbon –COOH dan C–O–C. Spektrum alginat yang dihasilkan dari delapan jenis alga cokelat menunjukkan pola serapan yang sama dengan spektrum standar alginat pada kalsium alginat, yaitu adanya gugus hidroksil pada $3368\text{--}3451 \text{ cm}^{-1}$, karbonil pada $1616\text{--}1734 \text{ cm}^{-1}$, ikatan C–O–H pada $1416\text{--}1420 \text{ cm}^{-1}$, dan ikatan C–O–C pada $1028\text{--}1034 \text{ cm}^{-1}$ [25], [27], [28].



Gambar 3. Profil FT-IR alginat hasil ekstraksi

Analisis HPLC

Sistem cairan dua fase memungkinkan terbentuknya dua fase cair yang memfasilitasi perpindahan massa di antara keduanya. Tegangan antarmuka yang lebih rendah antara kedua fase tersebut menghasilkan ekstraksi yang lebih efektif. Penelitian ini melakukan uji alginat untuk mengonfirmasi keberadaan alginat dalam sampel. Gambar 4 menunjukkan kromatogram HPLC sampel hasil ekstraksi dengan dua puncak yang berdekatan pada waktu retensi sekitar 4–5 menit. Berdasarkan karakteristik kromatogram dan kesesuaian dengan literatur terkait, kedua sinyal tersebut secara tentatif diasosiasikan dengan komponen mannuronat (M) dan guluronat (G), yang merupakan unit penyusun utama alginat. Hal ini juga menandakan adanya kopolimer linier dari struktur alginat pada menit 4-5 [26].



Gambar 4. Profil kromatogram hasil ekstraksi

Analisis Kinetika

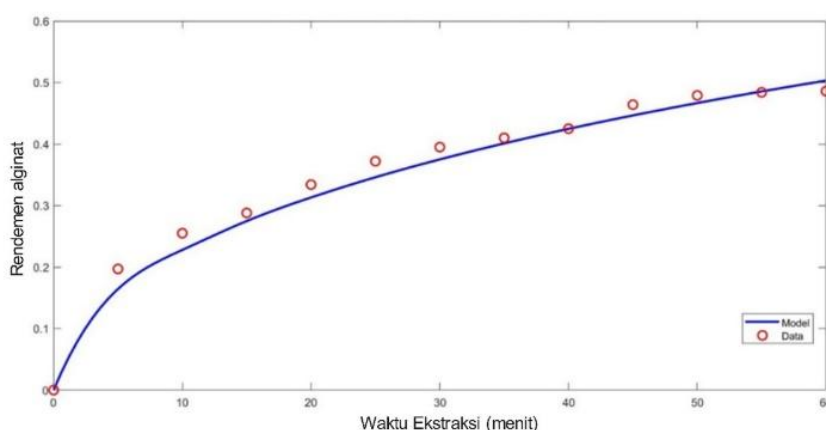
Kinetika ekstraksi alginat dianalisis menggunakan model difusi Fick untuk menggambarkan perpindahan alginat dari matriks *Sargassum polycystum* ke fase pelarut selama proses ekstraksi. Model diterapkan dengan asumsi partikel berbentuk bola, distribusi konsentrasi alginat di dalam partikel pada kondisi awal seragam, koefisien difusi efektif (D_e) konstan selama proses, dan perpindahan massa terutama dikendalikan oleh difusi internal dengan hambatan perpindahan massa eksternal yang relatif kecil. Asumsi tersebut digunakan untuk menyederhanakan karakteristik partikel biomassa yang tidak beraturan sehingga dapat direpresentasikan menggunakan model difusi berbasis radius efektif. Model ini memprediksi hubungan antara waktu ekstraksi dan konsentrasi alginat dalam pelarut. Model kontrol difusi diterapkan untuk memprediksi laju dan kinerja ekstraksi seiring waktu.

Analisis kinetika dilakukan menggunakan MATLAB R2023a. Adapun data yang digunakan untuk analisis kinetika adalah data rendemen (C_t), waktu reaksi, jumlah data ($N=12$), dan ukuran partikel yang ditentukan berdasarkan fraksi ayakan 80 mesh. Ukuran mesh menunjukkan ukuran bukaan ayakan dan tidak secara langsung menunjukkan radius partikel. Bukaan ayakan 80 mesh, setara dengan 0,000177 m, digunakan sebagai diameter karakteristik atau diameter ekuivalen partikel. Diameter partikel merupakan *effective particle radius*

atau equivalent radius yang diturunkan dari ukuran fraksi ayakan. Oleh karena itu, nilainya merupakan radius ekuivalen atau pendekatan. Waktu reaksi digunakan sebagai input dalam perhitungan model kinetika.

Pemodelan kinetika dilakukan menggunakan 12 data waktu ekstraksi dan rendemen alginat. Parameter model diperoleh melalui proses fitting dengan meminimalkan selisih antara nilai rendemen eksperimen dan prediksi model. Hasil fitting menghasilkan nilai β sebesar 0,0051, SSE sebesar 0,006673, RMSE sebesar 0,02358, R^2 sebesar 0,977 dan koefisien difusi efektif (D_e) sebesar $1,619 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$, sehingga menghasilkan model seperti pada Persamaan (12).

Profil kinetika berbasis difusi, yang diturunkan dari Persamaan (11) dapat dinyatakan dalam bentuk grafik, seperti Gambar 5, yang menunjukkan bahwa rendemen meningkat seiring bertambahnya waktu ekstraksi dan kemudian cenderung mencapai kondisi *plateau*. Hal ini menunjukkan bahwa laju perpindahan alginat relatif tinggi pada tahap awal akibat adanya gradien konsentrasi yang besar, kemudian menurun ketika gradien konsentrasi semakin kecil, sehingga perilaku ekstraksi dapat dijelaskan melalui mekanisme difusi internal. Gambar 5 juga menunjukkan kesesuaian nilai prediksi dengan data eksperimen, sehingga model difusi Fick dapat digunakan sebagai pendekatan untuk menggambarkan kinetika dan karakteristik perpindahan massa alginat selama proses ekstraksi.



Gambar 5. Hubungan antara rendemen alginat dan waktu ekstraksi menggunakan model difusi Fick.

$$C_{r,t} = \frac{2C_0R}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n \sin\left(\frac{n\pi r}{R}\right)}{n} e^{-\left(\frac{n\pi}{R}\right)^2 1,619 \times 10^{-11} t} \quad (12)$$

$$SSE = \sum_{i=1}^{12} (y_{data} - y_{cal})^2 \quad (13)$$

4. Kesimpulan

Penggunaan *Ultrasound-Assisted Extraction Liquid Biphasic System* (UAE-LBS) menghasilkan rendemen yang lebih tinggi dibandingkan dengan beberapa nilai yang dilaporkan dalam literatur. Rendemen sebesar 81,37% diperoleh pada kondisi ekstraksi selama 20 menit, dengan rasio bahan terhadap pelarut 0,04 g/mL dan daya ultrasonik 60%. Faktor proses utama, termasuk waktu ekstraksi, rasio bahan terhadap pelarut, dan daya ultrasonik, memiliki pengaruh yang substansial terhadap hasil. Analisis ANOVA mengonfirmasi bahwa model kuadrat yang diterapkan valid untuk memprediksi rendemen, ditunjukkan oleh nilai R^2 sebesar 0,9960. Berdasarkan analisis tersebut, rendemen optimum ditentukan sebesar 82,244% dengan nilai kesalahan prediksi relatif sebesar 0,38%, yang menunjukkan tingkat kesesuaian yang tinggi antara model dan data eksperimen. Analisis FTIR menunjukkan adanya gugus fungsional khas alginat, seperti hidroksil, karbonil, karboksilat, dan ikatan C–O–C, yang konsisten dengan standar kalsium alginat. Analisis HPLC secara kualitatif menunjukkan karakteristik kromatogram dan kesesuaian dengan literatur, dengan komponen kimia pada retensi 4–5 menit yang diasosiasikan dengan komponen mannuronat (M) dan guluronat (G), yang merupakan unit penyusun utama alginat. Model kinetika yang dikembangkan berdasarkan hukum difusi Fick menghasilkan koefisien difusi efektif (D_e) sebesar $1,619 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$, SSE sebesar 0,006673, RMSE sebesar 0,02358, dan R^2 sebesar 0,977. Model juga menunjukkan bahwa difusi berperan penting dalam proses ekstraksi.

Model kinetika berbasis hukum difusi Fick yang dikembangkan dalam penelitian ini dapat menjadi landasan untuk perancangan (*process design*), optimasi, dan *scale-up* proses ekstraksi alginat berbasis UAE–LBS. Oleh karena itu, penelitian lanjutan perlu difokuskan pada validasi model pada skala pilot dan industri serta integrasi pemodelan kinetika dengan optimasi berbasis kecerdasan buatan (*machine learning*) atau

computational fluid dynamics (CFD) guna meningkatkan akurasi prediksi dan efisiensi proses. Sementara itu, perlu dilakukan eksplorasi terhadap pengaruh variabel lain, seperti frekuensi ultrasonik, komposisi sistem cairan dua fase, dan karakteristik ukuran partikel bahan baku, terhadap kinetika difusi serta kualitas alginat yang dihasilkan.

5. Referensi

- [1] A. Mohammed, A. Rivers, David. C. Stuckey, and K. Ward, “Alginate extraction from *Sargassum* seaweed in the Caribbean region: Optimization using response surface methodology,” *Carbohydr. Polym.*, vol. 245, p. 116419, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.carbpol.2020.116419.
- [2] A. Kanimozhi, Johnson, and R. J. J. Malar, “Phytochemical composition of *Sargassum polycystum* C. Agardh and *Sargassum duplicatum* J. Agardh,” *International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, vol. 7, no. 8, 2015.
- [3] H. Bojorges, A. López-Rubio, A. Martínez-Abad, and M. J. Fabra, “Overview of alginate extraction processes: Impact on alginate molecular structure and techno-functional properties,” *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 140, p. 104142, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.tifs.2023.104142.
- [4] S. Noore, N. K. Rastogi, C. O'Donnell, and B. Tiwari, “Novel Bioactive Extraction and Nano-Encapsulation,” *Encyclopedia*, vol. 1, no. 3, pp. 632–664, Jul. 2021, doi: 10.3390/encyclopedia1030052.
- [5] L. Montes, M. Gisbert, I. Hinojosa, J. Sineiro, and R. Moreira, “Impact of drying on the sodium alginate obtained after polyphenols ultrasound-assisted extraction from *Ascophyllum nodosum* seaweeds,” *Carbohydr. Polym.*, vol. 272, p. 118455, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.carbpol.2021.118455.
- [6] N. M. Duc, S. R. Chia, S. Nomanbhay, and V. V. Devadas, “Advancement in system designs for multiphase liquid separation,” in *Principles of Multiple-Liquid Separation Systems*, Elsevier, 2023, pp. 187–210. doi: 10.1016/B978-0-323-91728-5.00017-2.
- [7] C. Ruan, W. Jiang, J. Liao, Z. Liu, Y. Song, and J. Qi, “Ethanol/salt aqueous two-phase systems (ATPS) for enrichment and identification of bioactive constituents escaping during pectin extraction,” *Int. J. Food Sci. Technol.*, vol. 58, no. 9, pp. 4726–4737, Sep. 2023, doi: 10.1111/ijfs.16578.
- [8] L. Shen et al., “A comprehensive review of ultrasonic assisted extraction (UAE) for bioactive components: Principles, advantages, equipment, and combined technologies,” *Ultrason. Sonochem.*, vol. 101, p. 106646, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.ultsonch.2023.106646.
- [9] H. Zhang et al., “Sustainable ultrasound-assisted extraction of *Polygonatum sibiricum* saponins using ionic strength-responsive natural deep eutectic solvents,” *Ultrason. Sonochem.*, vol. 100, p. 106640, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.ultsonch.2023.106640.
- [10] R. Biswas, A. Sarkar, M. Alam, M. Roy, and M. M. Mahdi Hasan, “Microwave and ultrasound-assisted extraction of bioactive compounds from Papaya: A sustainable green process,” *Ultrason. Sonochem.*, vol. 101, p. 106677, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.ultsonch.2023.106677.
- [11] Herdini, L. K. Darusman, and P. Sugita, “Disolusi Mikroenkapsulasi Kurkumin Tersalut Gel Kitosan-Alginat-Glutaraldehida,” *MAKARA of Science Series*, vol. 14, no. 1, May 2011, doi: 10.7454/mss.v14i1.468.
- [12] V. Manzulli et al., “Application of Fourier Transform Infrared Spectroscopy to Discriminate Two Closely Related Bacterial Species: *Bacillus anthracis* and *Bacillus cereus* Sensu Stricto,” *Microorganisms*, vol. 12, no. 1, p. 183, Jan. 2024, doi: 10.3390/microorganisms12010183.
- [13] J. P. K. John Kennedy et al., “The Production and characterization of alginate from *Sargassum wightii* Greville ex J. Agardh.: Exploring diverse acid treatments and analytical techniques,” *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 185, pp. 557–565, May 2024, doi: 10.1016/j.psep.2024.03.025.
- [14] R. Ahmed, “High-Performance Liquid Chromatography (HPLC): Principles, Applications, Versatility, Efficiency, Innovation and Comparative Analysis in Modern Analytical Chemistry and In Pharmaceutical Sciences,” Sep. 2024, doi: 10.20944/preprints202409.0057.v1.
- [15] E. Wahyuningsih, R. Primaharinastiti, and M. Yuwono, “Development and validation of a HILIC-HPLC-ELSD method for simultaneous determination of glucosamine hydrochloride and chondroitin sulfate in dietary supplements,” *Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences*, vol. 58, 2022, doi: 10.1590/s2175-97902022e20686.
- [16] Megawati, D. S. Fardhyanti, W. B. Sediawan, and A. Hisyam, “Kinetics of mace (*Myristicae arillus*) essential oil extraction using microwave assisted hydrodistillation: Effect of microwave power,” *Ind. Crops Prod.*, vol. 131, pp. 315–322, May 2019, doi: 10.1016/j.indcrop.2019.01.067.
- [17] A. Dobrinčić et al., “Advanced Technologies for the Extraction of Marine Brown Algal Polysaccharides,” *Mar. Drugs*, vol. 18, no. 3, p. 168, Mar. 2020, doi: 10.3390/md18030168.

- [18] N. Flórez-Fernández, H. Domínguez, and M. D. Torres, “A green approach for alginate extraction from *Sargassum muticum* brown seaweed using ultrasound-assisted technique,” *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 124, pp. 451–459, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2018.11.232.
- [19] A. Mohammed et al., “Multistage extraction and purification of waste *Sargassum natans* to produce sodium alginate: An optimization approach,” *Carbohydr. Polym.*, vol. 198, pp. 109–118, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.carbpol.2018.06.067.
- [20] A. Nesic, M. V. De Bonis, G. Dal Poggetto, G. Ruocco, and G. Santagata, “Microwave Assisted Extraction of Raw Alginate as a Sustainable and Cost-Effective Method to Treat Beach-Accumulated *Sargassum* Algae,” *Polymers (Basel)*, vol. 15, no. 14, p. 2979, Jul. 2023, doi: 10.3390/polym15142979.
- [21] L. Youssouf et al., “Ultrasound-assisted extraction and structural characterization by NMR of alginates and carrageenans from seaweeds,” *Carbohydr. Polym.*, vol. 166, pp. 55–63, Jun. 2017, doi: 10.1016/j.carbpol.2017.01.041.
- [22] M. Alboofetileh, S. Jeddi, and M. Abdollahi, “Sequential recovery of alginate from fucoidan extraction by-products of *Nizamuddinina zanardinii* seaweed using green extraction methods,” *Ultrason. Sonochem.*, vol. 117, p. 107343, Jun. 2025, doi: 10.1016/j.ultsonch.2025.107343.
- [23] C. L. Okolie, B. Mason, A. Mohan, N. Pitts, and C. C. Udenigwe, “Extraction technology impacts on the structure-function relationship between sodium alginate extracts and their in vitro prebiotic activity,” *Food Biosci.*, vol. 37, p. 100672, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.fbio.2020.100672.
- [24] P. Ruano et al., “Extraction and Characterization of Pectins From Peels of Criolla Oranges (*Citrus sinensis*): Experimental Reviews,” in *Pectins - Extraction, Purification, Characterization and Applications*, IntechOpen, 2020. doi: 10.5772/intechopen.88944.
- [25] W. Mushollaeni, “Karakterisasi Natrium Alginat Dari *Sargassum* sp., *Turbinaria* sp. Dan *Padina* sp. [Characterization of Sodium Alginate from *Sargassum* sp., *Turbinaria* sp. and *Padina* sp.],” *Jurnal Teknologi dan Industri Pangan*, vol. 22, no. 1, 2011, Accessed: Dec. 06, 2025. [Online]. Available: <https://journal.ipb.ac.id/index.php/jtip/article/view/3392>
- [26] W. Wang, Y. Fu, J. Xu, X. Gao, X. Fu, and L. Wang, “Optimization of hydrolysis conditions of alginate based on high performance liquid chromatography,” *Heliyon*, vol. 10, no. 9, p. e29738, May 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e29738.
- [27] A. S. Marriott, E. Bergström, A. J. Hunt, J. Thomas-Oates, and J. H. Clark, “A natural template approach to mesoporous carbon spheres for use as green chromatographic stationary phases,” *RSC Adv.*, vol. 4, pp. 222–228, 2014, doi: 10.1039/C3RA44428G.
- [28] E. Yudiati and A. Isnansetyo, “Characterizing the Three Different Alginate Type of *Sargassum siliquosum*,” *Ilmu Kelautan: Indonesian Journal of Marine Sciences*, vol. 22, no. 1, pp. 7–14, 2017, doi: 10.14710/ik.ijms.22.1.7-14.