

## Pembuatan Serbuk Fikobiliprotein dari *Spirulina platensis* melalui Proses *Freezing-Thawing* dan *Freeze-Drying*

### Production of Phycobiliprotein Powder from *Spirulina platensis* through *Freezing-Thawing* and *Freeze-Drying* Processes

Selva Mazareta<sup>1</sup>, Endah Sulistiawati<sup>1,2\*</sup>, Rachma Tia Evitasari<sup>2</sup>, Martomo Setyawan<sup>1</sup>, Dhias Cahya Hakika<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Magister Teknik Kimia Fakultas Teknologi Industri Universitas Ahmad Dahlan, Kab. Bantul, Yogyakarta, 55191, Indonesia

<sup>2</sup>Program Studi Teknik Kimia Fakultas Teknologi Industri Universitas Ahmad Dahlan., Yogyakarta, 55191, Indonesia

#### Artikel histori :

Diterima 3 Juni 2024  
Diterima dalam revisi 17 Agustus 2024  
Diterima 17 Agustus 2024  
Online 17 September 2024

**ABSTRAK:** Mikroalga golongan *Cyanophyta* seperti *Spirulina Platensis* (SP) merupakan salah satu sumber makanan fungsional yang bergizi. SP mengandung senyawa fikobiliprotein (PBP) yang merupakan komponen terbesar dari protein dan berfungsi sebagai antioksidan dan antikanker. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh perbandingan solven-biomassa (S/B), waktu pengeringan beku, dan luas permukaan wadah sampel pada pengeringan beku terhadap serbuk PBP yang dihasilkan. Eksperimen diawali dengan proses perendaman SP kering (1,5 dan 3 g) selama 1 jam, pembekuan selama 24 jam, *thawing*, penyaringan vakum (30-90 menit) dan pengeringan beku (*freeze-drying*) pada filtrat yang diperoleh. Analisis konsentrasi PBP dalam filtrat dilakukan dengan mengukur absorbansinya menggunakan UV-Vis Spektrofotometer diuji pada panjang gelombang 562, 615, dan 652 nm. Kadar air pada serbuk PBP setelah dilakukan proses *freeze-drying* diukur secara gravimetri. Variasi yang dilakukan meliputi perbandingan S/B (6,67-133,33) mL air suling/g SP kering. Variasi waktu *freeze drying* selama 24 dan 32 jam. Waktu optimum untuk penyaringan vakum 30,55 menit dan menghasilkan konsentrasi PBP tertinggi (7,639 g/L). Nilai S/B optimum didapatkan sebesar 20 mL/g dengan rendemen 112,32 mg/g (SP kering). Luas permukaan wadah sampel pada pengeringan beku yang terbaik adalah 427,5 cm<sup>2</sup> dan banyaknya air yang teruapkan sebesar 99,71% dari berat filtrat.

**Kata Kunci:** antioksidan; *cyanophyta*; ekstraksi; mikroalga; pangan fungsional

**ABSTRACT:** Cyanophyta group microalgae such as *Spirulina platensis* (SP) are a source of nutritious functional food. SP contains phycobiliprotein (PBP) compounds which are the largest component of protein and function as antioxidants and anti-cancers. The research aims to determine the effect of the solvent-biomass ratio (S/B), freeze-drying time, and surface area of the freeze-drying container on the resulting PBP. The experiment began with soaking the dry SP (1.5 and 3 g) for 1 hour, freezing for 24 hours, thawing, vacuum filtering (30-90 minutes), and freeze-drying the filtrate obtained. Analysis of PBP concentration in the filtrate was performed by measuring its absorbance using a UV-Vis spectrophotometer tested at 562, 615, and 652 nm wavelengths. The water content of PBP powder after the freeze-drying process was measured gravimetrically. Variations made included the S/B ratio (6.67-133.33) mL distilled water/g dry SP. Variations in freeze drying time of 24 and 32 hours. The optimum time for vacuum filtration was 30.55 minutes, and it produced the highest PBP concentration (7.639 g/L). The optimum S/B value was 20 mL/g with a yield of PBP 112.32 mg/g (dry SP). The surface area of the best sample drying container was 427.5 cm<sup>2</sup> and the amount of water evaporated was 99.71%.

**Keywords:** antioxidants; *cyanophyta*; extraction; functional food; microalgae.

#### 1. Pendahuluan

Kebutuhan akan pangan fungsional yang mendukung kesehatan semakin meningkat seiring dengan perubahan pola hidup dan kesadaran akan pentingnya nutrisi. Saat ini, kebutuhan masyarakat akan pangan fungsional semakin

meningkat seiring dengan meningkatnya kesadaran akan pentingnya kesehatan. Makanan kini tidak hanya berfungsi sebagai sumber energi dan nutrisi, tetapi juga dapat memperkuat sistem imun dan meningkatkan sistem antibodi. Konsumsi makanan yang mengandung bahan aktif, seperti antioksidan, menjadi salah satu cara untuk menjaga

\* Corresponding Author: +6285867212272

Email: endahsulistiawati@che.uad.ac.id

kesehatan dan mencegah berbagai penyakit (Kamaludin & Holik, 2022).

Di antara berbagai sumber pangan fungsional, mikroalga *Spirulina platensis* merupakan salah satu yang paling menjanjikan karena kaya akan protein (Syaichurrozi et al., 2023). Mikroalga ini termasuk dalam golongan *Cyanophyta* dan dikenal karena kandungan nutrisinya yang tinggi, termasuk protein, vitamin, mineral, dan senyawa bioaktif seperti fikobiliprotein (PBP) (Rodrigues et al., 2020). Kandungan protein *Spirulina platensis* mencapai lebih dari 70% w/w dan mengandung seluruh asam amino esensial, asam lemak, mineral serta vitamin (Wu et al., 2016). *Spirulina platensis* memiliki banyak manfaat kesehatan, termasuk aktivitas antioksidan, antibakteri, dan antikanker, berkat kandungan fikobiliproteinnya (Anvar & Nowruzi, 2021; Bortolini et al., 2022). Fikobiliprotein (PBP) merupakan komponen protein terbesar yang terdapat pada *Spirulina Platensis*. Protein ini sangat larut dalam air dan tersusun dari *phycocyanin*, *allophycocyanin*, dan *phycoerythrin* (Hsieh-Lo et al., 2019). Kandungan *phycocyanin* pada *Spirulina platensis* bervariasi antara 5% hingga 20% (García & Mejía, 2021). Metode ekstraksi PBP yang paling efektif adalah *freezing-thawing*, karena dapat secara signifikan meningkatkan efisiensi penyimpanan hasil ekstraksi (Chia et al., 2019). Proses ekstraksi ini bertujuan untuk memperoleh komponen aktif dengan efisiensi tinggi dan menjaga kualitas produk akhir (Daryono & Hutasoit, 2024). Dari penelitian yang telah dilakukan, metode ekstraksi *freezing-thawing* memberikan hasil yang lebih baik. Namun produk hasil ekstraksi yang diperoleh dari penelitian sebelumnya masih dalam fase cair yang memiliki masa simpan terbatas dan memerlukan penyimpanan khusus (Sulistiawati, Setyawan, et al., 2023).

Penelitian ini bertujuan untuk mengatasi masalah masa simpan PBP dengan mengubah fase cair menjadi fase padat (serbuk) menggunakan metode *freeze-drying*. Metode *freeze-drying* lebih unggul dibandingkan pengeringan konvensional karena dapat menjaga keaslian komponen bioaktif dan nilai nutrisi pada suhu rendah (Choque-Quispe et al., 2023). Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh perbandingan solven-biomassa (S/B), waktu pengeringan beku, dan luas permukaan wadah sampel terhadap kualitas serbuk PBP yang dihasilkan. Variasi volume dan rasio solven dapat mempengaruhi efisiensi ekstraksi dan hasil akhir (Putri et al., 2023). Selain itu, waktu pengeringan yang optimal berkontribusi pada pengurangan kadar air secara efektif (Syamsyiah et al., 2023), sementara perbedaan luas permukaan wadah sampel mempengaruhi kecepatan penurunan kadar air dalam sampel (Sugiarto et al., 2023). Penelitian ini merupakan kelanjutan dari studi sebelumnya yang hanya menghasilkan PBP dalam fase cair, dengan tujuan memperpanjang masa simpan serta meningkatkan efisiensi penyimpanan dan penggunaan produk (Sulistiawati, et al., 2023).

## 2. Metode Penelitian

### 2.1. Alat dan Bahan

Alat yang digunakan adalah *freezer*, *freeze-dryer*, seperangkat alat penyaring vakum (corong buchner dan erlenmeyer, pompa vakum), neraca analitik, oven, spektrofotometer dan peralatan gelas lainnya. Wadah sampel cair untuk proses pengeringan pada *freeze-dryer* masing-masing berukuran panjang 15 cm, lebar 9,5 cm, dan tingginya 4 cm. Bahan utama yang digunakan adalah serbuk *Spirulina platensis* kering yang diperoleh dari CV. Toga Nusantara (Bekasi, Jawa Barat), dengan densitas *bulk* 339-389 mg/mL, kadar air 4,23-4,29%. Serbuk sel *Spirulina* memiliki ukuran dengan panjang 25-40  $\mu\text{m}$  dan diameter 6,7-7,5  $\mu\text{m}$ . Pelarut yang digunakan untuk ekstraksi adalah akuades (dengan densitas 1,00 g/mL) yang diperoleh dari Laboratorium Bioproses Teknik Kimia Universitas Ahmad Dahlan Yogyakarta.

### 2.2. Tahap *freezing-thawing* dan ekstraksi

Serbuk SP kering dengan variasi berat 1,5 gr dan 3gr, ditambahkan akuades dengan perbandingan berat 1:4, dimasukkan ke dalam plastik dan dihomogenkan, kemudian didiamkan selama 1 jam pada suhu ruangan. Selanjutnya sampel dimasukkan ke dalam *freezer* selama 24 jam, kemudian dikeluarkan dari *freezer* (proses *thawing*), dan ditambahkan akuades (volumenya bervariasi) mulai dari 20 mL hingga 200 mL untuk dilakukan ekstraksi. Selanjutnya dilakukan penyaringan vakum sehingga diperoleh filtrat dan ampas/residu. Kadar fikobiliprotein pada filtrat diketahui dengan mengukur absorbansi pada panjang gelombang 562, 615 dan 652 nm menggunakan spektrofotometer. Selanjutnya dilakukan tahap *freeze-drying* terhadap filtrat.

### 2.3. Tahap *freeze-drying*

Pengeringan filtrat dilakukan untuk menghilangkan kandungan airnya dengan menggunakan *freeze-dryer* selama waktu dan suhu yang ditentukan (bervariasi). Setelah selesai proses pengeringan, maka diperoleh fikobiliprotein dalam bentuk serbuk dan ditimbang menggunakan neraca analitik. Kadar airnya diukur secara gravimetri.

### 2.4. Analisis data

#### 2.4.1. Kadar fikobiliprotein

Kadar fikobiliprotein dalam filtrat diketahui dengan mengukur absorbansi menggunakan spektrofotometer pada panjang gelombang 562, 615 dan 652 nm. Kadar FBP dihitung dengan persamaan berikut (Rodrigues et al., 2020):

$$\text{CPC} = \frac{(A_{615} - 0,474) \times A_{652}}{5,34} \quad (1)$$

$$\text{APC} = \frac{(A_{652} - 0,208) \times A_{615}}{5,09} \quad (2)$$

$$\text{PE} = \frac{(A_{562} - 0,208) \times (\text{CPC} - 0,849) \times \text{APC}}{9,62} \quad (3)$$

$$\text{PE} = \text{CPC} + \text{APC} \quad (4)$$

$$\text{PBP} = \text{CPC} + \text{APC} + \text{PE} \quad (5)$$

Keterangan :

CPC = konsentrasi *phycocyanin* (g/L).

APC = konsentrasi *allophycocyanin* (g/L).

PE = konsentrasi *phycoerythrin* (g/L).

PCT = Jumlah dari konsentrasi *phycocyanin* dan *allophycocyanin* (g/L).

PBP = Jumlah dari konsentrasi *phycocyanin*, *allophycocyanin* dan *phycoerythrin*.

Hasil *phycocyanin* (mg/g) adalah:

$$CPC = PCT \times \frac{V}{DB} \quad (6)$$

dimana V adalah volume pelarut (mL), dan DB (basis kering) adalah massa bubuk SP (g).

$A_{562}$ ,  $A_{615}$ , dan  $A_{652}$  adalah nilai absorbansi dari filtrat hasil ekstraksi pada panjang gelombang 562, 615, dan 652 nanometer. Alat spektrofotometer yang digunakan adalah *Thermo fisher genesys 150*, *Quartz Cuvette Kuvet 3,5 mL* dan akuades sebagai blanko.

#### 2.4.2. Kadar air serbuk fikobiliprotein

Setelah mendapatkan fikobiliprotein dalam bentuk serbuk kemudian dilakukan penimbangan menggunakan neraca analitik dan mengukur kadar air yang teruapkan oleh *Freeze-Dryer* (FD). Banyaknya air yang teruapkan dihitung dengan persamaan 7.

$$\text{Air teruapkan} = \frac{\text{Berat awal (cair),gr} - \text{Berat akhir keluar FD,gr}}{\text{Berat awal (cair),gr}} \quad (7)$$

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1. Perlakuan awal dengan *freezing thawing*

Proses ekstraksi fikobiliprotein diawali dengan tahap perendaman SP kering dalam akuades dengan perbandingan 1:4 (g/g). Perbandingan ini merupakan hasil optimum yang telah dilakukan dalam penelitian sebelumnya (Sulistiawati, Rochmadi, et al., 2023). Waktu perendaman selama 1 jam sebelum masuk ke dalam *freezer* sudah cukup untuk air berdifusi ke dalam sel mikroalga SP, sehingga saat terjadi pembekuan, volume dapat mengembang secara maksimal, sehingga memecah dinding sel, dan fikobiliprotein dapat terekstraksi secara maksimal (Sulistiawati, Rochmadi, et al., 2023). Proses *freezing* (pembekuan), yaitu memasukkan sampel ke dalam *freezer* dibekukan selama 24 jam, setelah itu sampel dikeluarkan dari *freezer* (proses *thawing*). *Yield* yang dihasilkan proses ekstraksi fikobiliprotein dengan metode *freezing-thawing* lebih baik dibandingkan menggunakan metode pengadukan (Sulistiawati, Setyawan, et al., 2023).

#### 3.2. Proses filtrasi

Proses ekstraksi dilakukan dengan menambahkan akuades pada berbagai variasi yang ditentukan (20 - 200 mL). Hasil dari proses penyaringan vakum dapat dilihat pada Tabel 1. Berdasarkan Tabel 1, volume filtrat yang diperoleh berkisar antara 65-87% dari volume cairan awal, menunjukkan bahwa sekitar 13-35% cairan tertinggal dalam ampas (residu). Kadar PBP dalam filtrat bervariasi antara 1,7310 g/L hingga 7,6390 g/L, dengan waktu penyaringan antara 30-90 menit. Volume pelarut yang lebih besar umumnya menghasilkan volume filtrat yang lebih besar, tetapi pada volume 40 mL dan 50 mL, hasil filtrasi hampir serupa, mengindikasikan batas kapasitas penyerapan filter. Waktu filtrasi mempengaruhi kadar PBP, di mana waktu yang lebih singkat seperti pada sampel B2 menghasilkan kadar tertinggi

karena mengurangi paparan oksigen dan cahaya yang dapat merusak PBP. Fikobiliprotein sensitif terhadap cahaya dan udara karena dapat menyebabkan penurunan kadarnya (Sedjati et al., 2012).

**Tabel 1.** Hasil ekstraksi (filtrat) dari alat penyaringan vakum pada berbagai variasi volume solven (dari 1,5 g SP kering).

Kode Sampel	Volume Solven, mL	Volume yang diperoleh, mL	Waktu Filtrasi, menit	Volume Filtrat, %	PBP, g/L
A1	20	17	70,00	65,38	4,1689
A2	20	20	90,00	76,92	3,3878
B1	30	25	90,00	69,44	5,8395
B2	30	25	30,55	69,44	7,6390
C1	40	40	75,00	86,96	1,7310
C2	40	39	52,50	84,78	4,3114
D1	50	45	90,00	80,36	2,5798
D2	50	45	44,50	80,36	2,3931

Keterangan: PBP=fikobiliprotein

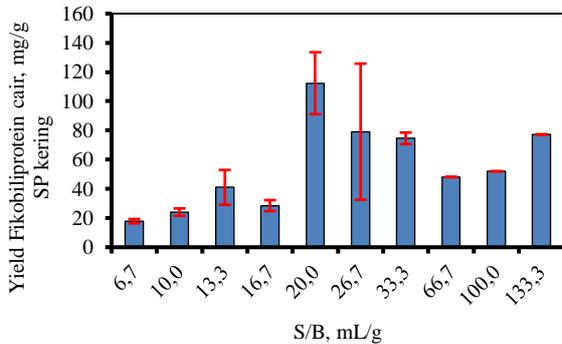
Ketidakteragaman waktu penyaringan juga dapat mempengaruhi konsentrasi dan rendemen fikobiliprotein. Semakin cepat waktu proses filtrasi, maka semakin tinggi kadar fikobiliprotein yang dihasilkan. Semakin lama waktu yang dibutuhkan untuk proses filtrasi dapat menyebabkan kadar fikobiliprotein menurun. Perbedaan hasil dibandingkan dengan penelitian sebelumnya, pada penelitian yang dilakukan oleh (Patel et al., 2010), menunjukkan bahwa waktu filtrasi yang lebih lama tidak selalu meningkatkan hasil, yang konsisten bahwa waktu filtrasi yang lebih lama dapat mengakibatkan penurunan kadar PBP. Selain itu, variabilitas dalam volume pelarut dan ketidakstabilan tekanan vakum juga mempengaruhi hasil filtrasi. Waktu yang optimal untuk memfiltrasi terdapat pada sampel B2 dengan berat basis kering 1,5 g SP dan volume 30mL dengan waktu yang dibutuhkan untuk proses filtrasi yaitu selama 30,55 menit dan menghasilkan kadar fikobiliprotein tertinggi yaitu 7,639 g/L.

Pada Tabel 1 volume yang diperoleh melalui proses filtrasi lebih kecil daripada volume solven yang digunakan ketika di awal. Hal ini disebabkan karena terjadi penyusutan volume selama proses filtrasi, pelarut dapat menyerap ke dalam bahan yang disaring, seperti kertas saring yang dapat menyebabkan volume filtrat menyusut. Residu SP juga memiliki pori yang dapat menyerap air, sehingga proses filtrasi menjadi kurang optimal. Selain itu, tekanan juga mempengaruhi pompa vakum yang digunakan. Pompa vakum dapat menghasilkan tekanan yang sangat tinggi, sehingga dapat mengurangi volume yang dibutuhkan untuk filtrasi. Tekanan yang lebih tinggi akan mengurangi volume cairan yang masuk ke filter, sehingga volume diakhir menjadi lebih kecil daripada volume awal. Kapasitas penyaring vakum selama proses filtrasi mempengaruhi nilai penyerapan fikobiliprotein dalam filtrat. Hal ini dipengaruhi oleh kondisi tekanan vakum yang tidak stabil. Tekanan vakum yang tidak stabil akan mempengaruhi proses pemisahan filtrat dan residu. Jika tekanan vakum rendah,

maka filtrat yang dihasilkan tidak optimal, sehingga berdampak pada nilai absorbansi fikobiliprotein.

### 3.3. Pengaruh perbandingan solven–biomassa (S/B) terhadap yield fikobiliprotein pada fase cair

Pengaruh perbandingan Solven terhadap Biomassa (S/B) dan yield fikobiliprotein (PBP) dalam fase cair tersaji pada Gambar 1.

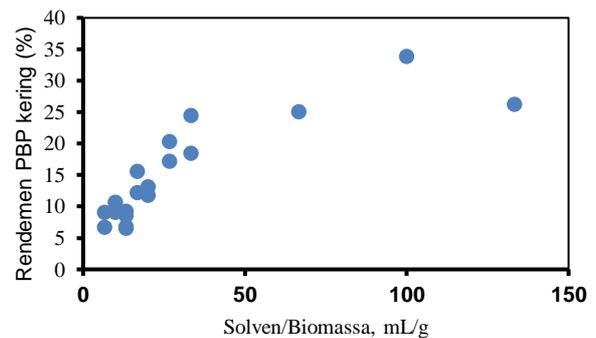


**Gambar 1.** Grafik Pengaruh perbandingan Solven-Biomassa (S/B) terhadap yield fikobiliprotein (dalam fase cair).

Gambar 1 mengilustrasikan bahwa semakin besar nilai perbandingan pelarut terhadap biomassa (S/B), maka yield fikobiliprotein cenderung mengalami kenaikan. Semakin besar nilai (S/B), maka semakin banyak fikobiliprotein yang dapat terekstraksi, karena molekul air lebih banyak yang dapat berkontak dengan fikobiliprotein di dalam sel yang telah pecah. Semakin besar rasio pelarut terhadap berat bahan, maka tekanan yang diberikan kepada sel, serta kontak dengan bahan juga semakin besar, sehingga *solute* yang keluar semakin banyak (Siswanti et al., 2022). Pada penelitian ini nilai S/B yang optimum didapatkan sebesar 20 mL/g dengan yield  $112,32 \pm 21,21$  mg/g (SP kering). Rasio pelarut dengan biomassa yang lebih tinggi dari 20 mL/g menyebabkan proses filtrasi semakin lama, sehingga PBP yang terekstrak berpeluang lebih lama terpapar udara dan kualitasnya berkurang. Penggunaan pelarut air yang lebih banyak juga tidak diinginkan, karena akan memperberat kinerja proses pengeringan.

Fenomena transfer massa yang terjadi pada ekstraksi biokomponen, dari dalam sel menuju ke dinding sel yang pecah, lalu terjadi transfer massa menuju pelarut hingga terjadi keadaan kesetimbangan massa (Dewati et al., 2020). Perbedaan kadar fikobiliprotein disebabkan oleh perbedaan tekanan di dalam dan di luar sel yang mengakibatkan pecahnya dinding dan membran sel. Berdasarkan penelitian sebelumnya memperoleh rendemen maksimum sebesar 74,51 mg/g (SP kering) dengan kemurnian 0,56 pada perbandingan S/B 10 setelah empat siklus (Tavanandi et al., 2018). Pada penelitian yang dilakukan oleh (Sulistiawati, Rochmadi, et al., 2023) perbandingan S/B sebesar 100 dengan satu siklus *freezing-thawing* menghasilkan fikobiliprotein maksimum sebesar 84,69 mg/g (SP kering). Perbandingan solven terhadap biomassa yang besar (yaitu

100 mL/g) kurang menguntungkan jika hasilnya harus dikeringkan, karena harus menguapkan air dengan jumlah yang cukup besar, jika dibandingkan dengan S/B yang kecil. Penelitian ini menggunakan nilai S/B=20, menghasilkan rendemen lebih besar dibandingkan penelitian-penelitian sebelumnya. Adapun pengaruh perbandingan solven-biomassa terhadap rendemen serbuk PBP setelah melalui proses *freeze-drying* dapat dilihat pada Gambar 2.



**Gambar 2.** Pengaruh perbandingan S/B terhadap rendemen serbuk PBP

Berdasarkan grafik pada Gambar 2 peningkatan perbandingan solven/biomassa (S/B) umumnya menghasilkan peningkatan rendemen fikobiliprotein yang diekstraksi dari *Spirulina platensis*. Pada S/B yang berada dalam rentang 6,7 hingga 26,7 mL/g, rendemen menunjukkan variasi yang cukup signifikan, dengan nilai berkisar antara 6 hingga 20%. Ini menunjukkan bahwa pada S/B yang lebih rendah, perubahan kecil dalam volume solven dapat menyebabkan fluktuasi rendemen yang cukup besar. Pada rentang S/B yang lebih tinggi, seperti 66,7 hingga 133,3 mL/g, peningkatan volume solven menghasilkan rendemen yang lebih stabil dan konsisten, dengan S/B 100 mL/g memberikan rendemen tertinggi sebesar 34%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan S/B umumnya meningkatkan rendemen, namun setelah mencapai titik tertentu, seperti S/B 100 mL/g, hasil ekstraksi cenderung stabil, mencerminkan keseimbangan massa antara PBP di dalam sel dan pelarut (Dewati et al., 2020). Penelitian ini sejalan dengan penelitian (Kumar et al., 2014), yang menemukan bahwa rendemen fikobiliprotein meningkat dengan peningkatan volume solven hingga mencapai saturasi pada sekitar 100 mL/g. Penelitian ini konsisten dengan penelitian lain yang menunjukkan bahwa setelah S/B mencapai nilai tertentu, efisiensi ekstraksi tidak meningkat signifikan (Wang et al., 2023).

Meskipun nilai S/B yang besar dapat menghasilkan rendemen yang tinggi, di sisi lain, hal ini juga meningkatkan beban energi penguapan air pada alat *freeze-dryer*. Oleh karena itu, penting untuk menemukan keseimbangan yang optimal antara efisiensi ekstraksi dan konsumsi energi, sehingga S/B optimum yang dipilih adalah 20 mL/g, yang memberikan keseimbangan antara efisiensi ekstraksi dan konsumsi energi. Ini memberikan keseimbangan yang tepat

antara hasil ekstraksi yang memadai dan konsumsi energi yang efisien, menghindari pemborosan energi sambil memaksimalkan kualitas produk akhir. Selain itu, selang waktu yang lama antara proses filtrasi dan *freeze-drying* juga berpengaruh terhadap kualitas PBP, di mana kemungkinan terjadi degradasi atau oksidasi fikobiliprotein selama jeda waktu tersebut. Faktor-faktor lain seperti suhu, pH, dan durasi ekstraksi juga berperan penting dalam menentukan hasil ekstraksi (Ilter et al., 2018). Suhu yang optimal diperlukan untuk memaksimalkan difusi tanpa merusak protein, sementara pH yang tepat mencegah denaturasi fikobiliprotein (Rodrigues et al., 2019). Perbandingan hasil ekstraksi fikobiliprotein dari *Spirulina platensis* dengan penelitian lain dapat dilihat pada Tabel 2.

**Tabel 2.** Perbandingan hasil ekstraksi fikobiliprotein dari *Spirulina platensis* dengan penelitian lain.

Metode Ekstraksi	Pelarut	S/B, mL/g	Yield, mg/g	Referensi
<i>Freezing-thawing</i> (4 siklus)	Akuades	10	74,51	(Tavanandi et al., 2018)
<i>Freezing</i>	CaCl <sub>2</sub> 1.5%	100	55,33	(Ilter et al., 2018)
Ultrasonik	2-HEAA + 2-HEAF	7,93	12,29	(Rodrigues et al., 2018)
Pengadukan secara mekanis	2-HEAA + 2-HEAF	6,59	22,07	(Rodrigues et al., 2019)
<i>Freezing-thawing</i> dan homogenisasi	0.01 M Sodium	25	78,17	(Pan-utai & Iamtham, 2019)
<i>Freezing-thawing</i> satu siklus	Akuades	100	84,69	(Sulistiawati, Rochmadi, et al., 2023)
<i>Freezing-thawing</i> dan pengeringan beku	Akuades	20	112,32	Penelitian ini

Pada Tabel 2 metode ekstraksi *freezing-thawing* satu siklus dan pengeringan beku pada penelitian ini menunjukkan keunggulan yang signifikan dalam menghasilkan fikobiliprotein dengan *yield* tinggi, yaitu 112,32 mg/g. Keunggulan utama dari metode ini adalah kemampuannya untuk menghasilkan produk akhir dalam bentuk fasa padatan. Fikobiliprotein dalam bentuk padatan memiliki masa simpan yang lebih lama dibandingkan dengan bentuk cair, meningkatkan stabilitas dan umur simpan produk. Penggunaan akuades sebagai pelarut juga memberikan keuntungan tambahan karena merupakan pelarut yang aman dan ramah lingkungan, mengurangi potensi risiko kesehatan serta dampak lingkungan.

Sebaliknya, metode ekstraksi seperti ultrasonik dan pengadukan mekanis menghasilkan fikobiliprotein dalam bentuk cair, yang cenderung memiliki masa simpan yang lebih singkat dan memerlukan penanganan khusus untuk menjaga kualitasnya. Metode seperti ultrasonik juga menghasilkan *yield* yang lebih rendah 1,29 mg/g dibandingkan dengan metode *freezing-thawing* dan pengeringan beku. Pengadukan mekanis juga memiliki *yield* yang lebih rendah 22,07 mg/g dan sering kali memerlukan waktu yang lebih lama untuk mencapai hasil yang optimal.

Kekurangan dari metode *freezing-thawing* satu siklus dan pengeringan beku termasuk sensitivitas terhadap kondisi

ekstraksi seperti suhu, pH, dan cahaya. Perubahan suhu ekstrem selama proses *freezing-thawing* dapat menyebabkan kerusakan struktural pada sel, mempengaruhi integritas fikobiliprotein yang diekstraksi. Selain itu, pH yang tidak sesuai selama proses ekstraksi dapat mempengaruhi stabilitas dan aktivitas biologis fikobiliprotein. Paparan cahaya juga dapat menyebabkan degradasi lebih lanjut pada senyawa sensitif cahaya. Proses pengeringan beku, meskipun menghasilkan produk padat yang stabil, memerlukan kontrol ketat untuk memastikan bahwa suhu dan kondisi beku tidak merusak struktur sel dan kualitas produk.

### 3.4. Pengaruh waktu pengeringan proses *freeze-drying*

Filtrat yang telah diperoleh dari proses penyaringan vakum, selanjutnya dimasukkan ke dalam alat pengeringan beku. Kondisi operasi pada alat pengeringan beku dapat dilihat pada Tabel 3.

**Tabel 3.** Kondisi Operasi *freeze-drying*

Variasi Waktu <i>Freeze-dryer</i>	Volume Solven 100 - 200 mL		Volume Solven 20 - 50 mL	
	Suhu, C	Tekanan, mT	Suhu, C	Tekanan, mT
Jam ke-0	-68,0	93	-66,4	183
Jam ke-8	-68,8	115	-68,1	121
Jam ke-24	-70,3	99	-69,7	99
Jam ke-32	-68,2	122	-	-

Berdasarkan pada Tabel 3 dapat dilihat bahwa kisaran kerja *freeze-drying* pada variasi volume solven 100-200 mL memiliki kondisi suhu berkisar antara -68 hingga -70,3°C dan tekanan berkisar antara 93–122 miliTorr. Pada variasi volume solven 20–50 mL kondisi suhu berkisar antara -66,4 hingga -69,7 °C dan tekanan 99 – 183 miliTorr. Proses transfer massa air dari padatan ke udara dalam *freeze dryer* dipengaruhi oleh kontrol suhu dan tekanan. Semakin rendah suhu, semakin cepat pembekuan terjadi. Semakin rendah tekanan, semakin cepat laju sublimasi, karena tekanan rendah mengurangi tekanan uap air di atas es, mendorong uap untuk keluar dari sampel. Prinsip dasar metode *freeze-drying* adalah mengurangi air yang terkandung dalam bahan yang sudah beku tanpa melalui fase cair (Fortin et al., 2021). Waktu pengeringan yang lebih lama berpotensi mengurangi serapan air karena mengurangi kelembaban yang tersisa. suhu pengeringan yang diatur dengan baik dalam proses *freeze-drying* akan mempengaruhi laju sublimasi dan efisiensi pengeringan, mempengaruhi kadar air akhir dalam produk (Syamsyiah et al., 2023).

### 3.5. Pengaruh luas permukaan sampel terhadap kadar air yang teruapkan oleh *freeze-dryer*

Luas permukaan wadah sampel pada pengeringan beku menentukan kecepatan penguapan air dari bahan. Setelah proses pengeringan selesai diperoleh PBP dalam bentuk serbuk dan diukur beratnya. Pengaruh luas permukaan sampel terhadap banyaknya air yang teruapkan oleh *freeze-dryer* dapat dilihat pada Tabel 4. Pada Tabel 4 dapat dilihat bahwa semakin luas permukaan sampel maka banyaknya air

yang teruapkan oleh *freeze-dryer* cenderung semakin besar. Penguapan terbesar pada variasi volume solven 200 mL dan berat basis kering 1,5 g SP dengan luas permukaan sampel 427,5 cm<sup>2</sup> dan banyaknya air yang teruapkan sebesar 99,71%. Selain itu pada rentang variasi solven 20-50 mL, penguapan terbesar yaitu pada volume 30 mL dan berat basis kering 1,5 g SP dengan luas permukaan sampel 142,5 cm<sup>2</sup> dan air yang teruapkan sebesar 99,26%. Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh (Budiarti & Sulistiawati, 2019), yang menyatakan bahwa luas permukaan sampel berpengaruh terhadap kadar air. Semakin besar luas permukaan sampel, semakin cepat terjadi penguapan air dan semakin rendah kadar air yang diperoleh. Luas permukaan sampel berpengaruh terhadap kadar air yang teruapkan pada *freeze-dryer*.

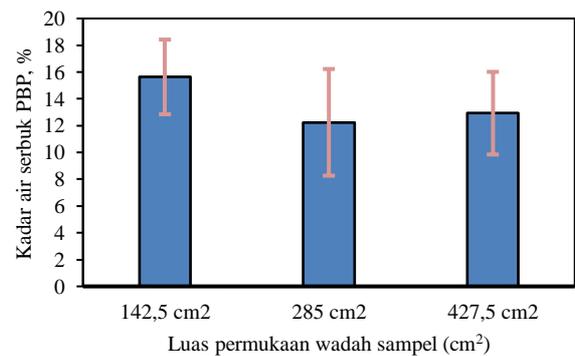
**Tabel 4.** Pengaruh luas permukaan sampel terhadap kadar air yang teruapkan oleh *freeze-dryer*.

Berat SP, g	Volume Solven, mL	Luas Permukaan Sampel, cm <sup>2</sup>	Banyaknya Air yang Teruapkan, %
3	30	142,5	98,06
3	50	142,5	98,27
3	20	142,5	98,48
3	20	142,5	98,61
1,5	30	142,5	98,63
3	30	142,5	98,78
3	40	142,5	98,98
3	50	285,0	98,99
1,5	50	285,0	99,05
1,5	20	142,5	99,10
1,5	40	142,5	99,14
3	40	142,5	99,19
1,5	20	142,5	99,20
1,5	40	285,0	99,22
1,5	50	285,0	99,23
1,5	30	142,5	99,26
1,5	100	285,0	99,42
1,5	150	427,5	99,55
1,5	200	427,5	99,71

Luas permukaan sampel berpengaruh signifikan terhadap laju penguapan air selama proses *freeze-drying*. Penguapan air yang lebih besar pada sampel dengan luas permukaan yang lebih besar disebabkan oleh peningkatan area di mana transfer massa terjadi. Hal ini mempercepat laju penguapan air dari permukaan sampel dan mempercepat proses pengeringan. Penelitian oleh (Sulistiawati, Rochmadi, et al., 2023) juga mendukung penelitian ini, dimana menyatakan bahwa semakin besar luas permukaan sampel, semakin cepat terjadi penguapan air dan semakin rendah kadar air yang diperoleh. Selain itu, peningkatan luas permukaan juga berkontribusi pada peningkatan efisiensi pengeringan dan penurunan kadar air yang diperoleh, yang pada akhirnya akan meningkatkan umur simpan serbuk fikobiliprotein.

Faktor-faktor lain yang dapat mempengaruhi kadar air yang teruapkan termasuk volume solven dan distribusi solven dalam sampel. Volume solven yang lebih besar cenderung meningkatkan jumlah air yang harus diuapkan, tetapi juga dapat memfasilitasi difusi air yang lebih efektif

selama *freeze-drying*. Homogenitas distribusi solven juga penting karena jika solven tidak terdistribusi secara merata, bagian sampel yang mengandung lebih banyak solven akan memerlukan waktu pengeringan yang lebih lama. Selain itu, suhu dan tekanan dalam *freeze-dryer* harus diatur secara optimal untuk memastikan bahwa semua bagian sampel mengalami kondisi pengeringan yang seragam (Fortin et al., 2021).



**Gambar 3.** Pengaruh luas permukaan wadah sampel terhadap kadar air pada serbuk PBP

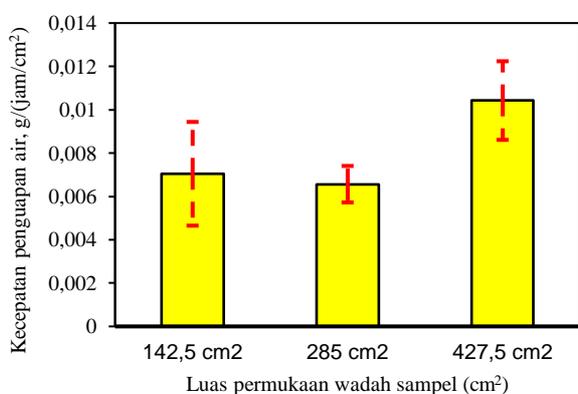
Pengaruh luas permukaan wadah sampel pengeringan beku terhadap kadar air serbuk PBP, dapat dilihat pada Gambar 3. Pada Gambar 3 dapat dilihat bahwa semakin luas permukaan sampel maka kadar air yang terdapat pada serbuk PBP cenderung semakin rendah. Peningkatan luas permukaan wadah sampel berhubungan dengan penurunan kadar air serbuk PBP. Kadar air terendah 12,25% dicapai pada luas permukaan 285 cm<sup>2</sup>, namun sedikit meningkat menjadi 12,93% pada luas permukaan terbesar 427,5 cm<sup>2</sup>. Hal ini menunjukkan bahwa luas permukaan wadah memengaruhi laju sublimasi, yang merupakan tahap kunci dalam proses *freeze-drying*.

Faktor utama yang memengaruhi fenomena ini adalah peningkatan luas permukaan yang memungkinkan kontak yang lebih besar antara permukaan sampel dan udara, sehingga mempercepat laju sublimasi es menjadi uap air. Namun, peningkatan yang terlalu besar dalam luas permukaan, seperti yang terlihat pada 427,5 cm<sup>2</sup>, dapat menyebabkan distribusi panas yang kurang merata, yang mungkin menjadi alasan mengapa kadar air tidak terus menurun secara signifikan setelah mencapai 285 cm<sup>2</sup>. Distribusi panas yang tidak merata dapat menyebabkan beberapa bagian dari sampel tetap lebih lembab, sehingga meningkatkan kadar air rata-rata.

Penelitian lain (Huang et al., 2019) menunjukkan bahwa peningkatan luas permukaan secara signifikan dapat mempercepat proses pengeringan pada metode *freeze-drying*. Namun, setelah mencapai luas permukaan tertentu, penambahan luas permukaan tidak memberikan pengurangan signifikan pada kadar air karena distribusi panas yang tidak merata dan heterogenitas sampel. Hasil ini

sejalan dengan hasil pada Gambar 3, dimana setelah titik tertentu, pengaruh peningkatan luas permukaan terhadap penurunan kadar air menjadi tidak terlalu signifikan.

Pengaruh luas permukaan wadah sampel pengeringan beku terhadap kecepatan penguapan air, dapat dilihat pada Gambar 4. Pada Gambar 4 menunjukkan bahwa kecepatan penguapan tertinggi 0,0104 g uap air/(jam.cm<sup>2</sup>) dicapai pada luas permukaan 427,5 cm<sup>2</sup>. Hal ini terlihat bahwa semakin besar luas permukaan wadah sampel, maka kecepatan penguapan air juga semakin besar. Hal ini terjadi karena semakin luas permukaan sampel, maka semakin besar kontak antara es yang terdapat pada permukaan bahan dengan udara, sehingga mempermudah terjadinya sublimasi, Jika kecepatan penguapan semakin besar, maka dalam waktu yang sama kadar air yang tertinggal di dalam serbuk akan cenderung semakin kecil, hingga tercapai keseimbangan.



**Gambar 4.** Pengaruh luas permukaan wadah sampel terhadap kecepatan penguapan air

Kecepatan penguapan air yang lebih tinggi pada luas permukaan yang lebih besar dapat dijelaskan oleh peningkatan gradien suhu antara es yang terdapat pada permukaan bahan dan lingkungan sekitarnya, yang mempercepat proses sublimasi. Selain itu, area yang lebih luas memungkinkan lebih banyak molekul air untuk menguap pada waktu yang sama, yang secara keseluruhan meningkatkan kecepatan penguapan. Pada penelitian yang dilakukan oleh (Huang et al., 2019) menyatakan peningkatan luas permukaan sampel secara signifikan meningkatkan laju penguapan selama proses *freeze-drying*. hal ini sejalan dengan hasil pada penelitian ini yaitu dengan meningkatnya luas permukaan hingga 427,5 cm<sup>2</sup> terjadi peningkatan laju penguapan.

#### 4. Kesimpulan

Dapat disimpulkan bahwa, semakin besar perbandingan solven-biomassa (S/B) maka semakin tinggi nilai yield yang dihasilkan, Nilai S/B yang optimum didapatkan sebesar 20 mL/g dengan *yield* 112,32±21,21 mg/g (SP kering). Semakin lama waktu pengeringan maka semakin banyak kandungan air yang teruapkan. Semakin luas permukaan sampel, maka kadar air pada serbuk PBP cenderung semakin

kecil, dan kecepatan penguapan air cenderung semakin besar. Kecepatan penguapan air tertinggi adalah 0,0104 g uap air/(jam.cm<sup>2</sup>), sedangkan kadar air serbuk fikobiliprotein terkecil adalah 12,25%.

#### Ucapan Terima kasih

Penelitian ini didanai oleh Universitas Ahmad Dahlan (Yogyakarta) dengan Surat Perjanjian Pelaksanaan Penelitian dengan nomor: PD-129/SP3/LPPM-UAD/XII/2023.

#### Daftar Pustaka

- Anvar, A. A., & Nowruzi, B. (2021). Bioactive Properties of Spirulina: A Review. *Microbial Bioactives*, 4(1), 134–142. <https://doi.org/10.25163/microbbioacts.412117b0719110521>
- Bortolini, D. G., Maciel, G. M., Fernandes, I. de A. A., Pedro, A. C., Rubio, F. T. V., Branco, I. G., & Haminiuk, C. W. I. (2022). Functional properties of bioactive compounds from Spirulina spp.: Current status and future trends. *Food Chemistry: Molecular Sciences*, 5(April). <https://doi.org/10.1016/j.fochms.2022.100134>
- Budiarti, G. I., & Sulistiawati, E. (2019). Aplikasi Hydrogen Rich Water Pada Modifikasi Tepung Kentang Dengan Pengeriing Gelombang Mikro Sebagai Alternatif Substitusi Gandum. *Elkawnie*, 5(2), 128. <https://doi.org/10.22373/ekw.v5i2.4704>
- Chia, S. R., Chew, K. W., Show, P. L., Xia, A., Ho, S. H., & Lim, J. W. (2019). Spirulina platensis based biorefinery for the production of value-added products for food and pharmaceutical applications. *Bioresource Technology*, 289. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121727>
- Choque-Quispe, D., Ligarda-Samanez, C. A., Huamán-Rosales, E. R., Aguirre Landa, J. P., Agreda Cerna, H. W., Zamalloa-Puma, M. M., Álvarez-López, G. J., Barboza-Palomino, G. I., Alzamora-Flores, H., & Gamarra-Villanueva, W. (2023). Bioactive Compounds and Sensory Analysis of Freeze-Dried Prickly Pear Fruits from An Inter-Andean Valley in Peru. *Molecules*, 28(9). <https://doi.org/10.3390/molecules28093862>
- Daryono, E. D., & Hutasoit, G. F. (2024). Ekstraksi Minyak Atsiri Jahe (*Zingiber officinale*) dengan Proses Distilasi: Pengaruh Jenis Jahe dan Metode Distilasi. *Eksergi*, 21(2), 55. <https://doi.org/10.31315/e.v21i2.11625>
- Dewati, P. R., Rochmadi, Rohman, A., & Budiman, A. (2020). A Preliminary Study of Extraction and Purification Processes of Astaxanthin from *Haematococcus pluvialis* as a Natural Antioxidant. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 778(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/778/1/012032>
- Fortin, G. A., Asnia, K. K. P., Ramadhani, A. S., &

- Maherawati, M. (2021). Minuman Fungsional Serbuk Instan Kaya Antioksidan Dari Bahan Nabati. *Agrointek : Jurnal Teknologi Industri Pertanian*, 15(4), 984–991.  
<https://doi.org/10.21107/agrointek.v15i4.8977>
- García, H. F. L., & Mejía, N. L. (2021). Mathematical Model of a Bubble Column for the Increased Growth of *Arthrospira platensis* and the Formation of Phycocyanin. *International Journal of Technology*, 12(2), 232–242.  
<https://doi.org/10.14716/ijtech.v12i2.4256>
- Hsieh-Lo, M., Castillo, G., Ochoa-Becerra, M. A., & Mojica, L. (2019). Phycocyanin and phycoerythrin: Strategies to improve production yield and chemical stability. In *Algal Research* (Vol. 42). Elsevier B.V.  
<https://doi.org/10.1016/j.algal.2019.101600>
- Huang, Y., Zhou, T., He, S., Xiao, H., Dai, H., Yuan, B., Chen, X., & Yang, X. (2019). Flame-retardant polyvinyl alcohol/cellulose nanofibers hybrid carbon aerogel by freeze drying with ultra-low phosphorus. *Applied Surface Science*, 497(July), 143775.  
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.143775>
- İlter, I., Akyıl, S., Demirel, Z., Koç, M., Conk-Dalay, M., & Kaymak-Ertekin, F. (2018). Optimization of phycocyanin extraction from *Spirulina platensis* using different techniques. *Journal of Food Composition and Analysis*, 70(August 2017), 78–88.  
<https://doi.org/10.1016/j.jfca.2018.04.007>
- Kamaludin, A. M. R., & Holik, H. A. (2022). Artikel Ulasan: Kandungan Senyawa Kimia dan Aktivitas Farmakologi *Spirulina* sp. *Indonesian Journal of Biological Pharmacy*, 2(2), 59.  
<https://doi.org/10.24198/ijbp.v2i2.38269>
- Kumar, D., Dhar, D. W., Pabbi, S., Kumar, N., & Walia, S. (2014). Extraction and purification of C-phycoerythrin from *Spirulina platensis* (CCC540). *Indian Journal of Plant Physiology*, 19(2), 184–188.  
<https://doi.org/10.1007/s40502-014-0094-7>
- Pan-utai, W., & Iamtham, S. (2019). Extraction, purification and antioxidant activity of phycobiliprotein from *Arthrospira platensis*. *Process Biochemistry*, 82(March), 189–198.  
<https://doi.org/10.1016/j.procbio.2019.04.014>
- Patel, S. M., Jameel, F., & Pikal, M. J. (2010). The effect of dryer load on freeze drying process design. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 99(10), 4363–4379.  
<https://doi.org/10.1002/jps.22132>
- Putri, W. A., Al Maqsyidi, M. A., Achmad, Z., Hadi, F., & Nur, M. M. A. (2023). Pengaruh Pelarut, Rasio Pelarut, dan Waktu Ekstraksi Terhadap Astaxanthin dari *Haematococcus* sp. dengan Bantuan Ultrasound Assisted Extraction. *Eksergi*, 20(3), 156.  
<https://doi.org/10.31315/e.v20i3.10733>
- Rodrigues, R. D. P., de Castro, F. C., Santiago-Aguiar, R. S. de, & Rocha, M. V. P. (2018). Ultrasound-assisted extraction of phycobiliproteins from *Spirulina* (*Arthrospira*) *platensis* using protic ionic liquids as solvent. *Algal Research*, 31, 454–462.  
<https://doi.org/10.1016/j.algal.2018.02.021>
- Rodrigues, R. D. P., de Lima, P. F., Santiago-Aguiar, R. S. de, & Rocha, M. V. P. (2019). Evaluation of protic ionic liquids as potential solvents for the heating extraction of phycobiliproteins from *Spirulina* (*Arthrospira*) *platensis*. *Algal Research*, 38(March 2018), 101391.  
<https://doi.org/10.1016/j.algal.2018.101391>
- Rodrigues, R. D. P., Silva, A. S. e., Carlos, T. A. V., Bastos, A. K. P., de Santiago-Aguiar, R. S., & Rocha, M. V. P. (2020). Application of protic ionic liquids in the microwave-assisted extraction of phycobiliproteins from *Arthrospira platensis* with antioxidant activity. *Separation and Purification Technology*, 252.  
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117448>
- Sedjati, S., Yudiati, E., & Suryono. (2012). Profil Pigmen Polar dan Non Polar Mikroalga Laut *Spirulina* sp. dan Potensinya sebagai Pewarna Alami. *Jurnal Ilmu Kelautan*, 17(3), 176–181.  
<https://doi.org/10.14710/ik.ijms.17.3.176-182>
- Siswanti, Satriavi, R., & Pratama, J. A. (2022). Koefisien Transfer Massa Ekstraksi Oleoresin Daun Zodia (*Evodia suaveolens*) dengan Pelarut Etanol Menggunakan Ultrasonic Cleaner. *Eksergi*, 19(2), 64.  
<https://doi.org/10.31315/e.v19i2.7286>
- Sugiarto, B., Sulistyowati, R. E., Dewi, C. T. M., & Hendranto, R. Y. (2023). Decreasing Of Oxalate Content in Porang Based on Different Sample Shape, Soaking Time, Temperature, and Soaking Solutions. *Eksergi*, 20(3), 178.  
<https://doi.org/10.31315/e.v20i3.9269>
- Sulistiawati, E., Rochmadi, Hidayat, M., & Budiman, A. (2023). Enhancement of Phycocyanin Extraction from Dry *Spirulina platensis* Powder by Freezing-Thawing Pre-treatment. *International Journal of Technology*, 14(4), 780–790.  
<https://doi.org/10.14716/ijtech.v14i4.5169>
- Sulistiawati, E., Setyawan, M., Abidin, Z., Darmawan, M., Makasar, H. A., & Pamungkas, T. W. (2023). Perbandingan Kinerja Ekstraksi Fikobiliprotein dari *Spirulina platensis* Melalui Pengadukan dan Freezing-Thawing. *Jurnal Pascapanen dan Bioteknologi Kelautan dan Perikanan*, 18(1), 41.  
<https://doi.org/10.15578/jpbkp.v18i1.912>
- Syaichurrozi, I., Toron, Y. S., Dwicahyanto, S., & Wardalia, W. (2023). Effect of Differences in Type and Concentration of Nitrogen Sources (NaNO<sub>3</sub> and Urea) on *Spirulina platensis* Biomass Production. *Eksergi*, 20(2), 112–117.  
<https://doi.org/10.31315/e.v20i2.9367>
- Syamsyiah, M.A., Sari, M.W., Cengristitama, & Nurdini, L. (2023). Pengaruh Suhu dan Waktu Pengeringan pada

- Bioplastik dari Pati Jagung terhadap Waktu Biodegradasi The Effect of Temperature and Time of Drying from Corn Starch Bioplastic on Biodegradation Time. Eksergi, 20(1), 2460–8203. <https://doi.org/10.31315/e.v20i2.9727>.
- Tavanandi, H. A., Mittal, R., Chandrasekhar, J., & Raghavarao, K. S. M. S. (2018). Simple and efficient method for extraction of C-Phycocyanin from dry biomass of *Arthrospira platensis*. *Algal Research*, 31(February), 239–251. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2018.02.008>
- Wang, F., Yu, X., Cui, Y., Xu, L., Huo, S., Ding, Z., Hu, Q., Xie, W., Xiao, H., & Zhang, D. (2023). Efficient extraction of phycobiliproteins from dry biomass of *Spirulina platensis* using sodium chloride as extraction enhancer. *Food Chemistry*, 406(April), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.135005>
- Wu, H. L., Wang, G. H., Xiang, W. Z., Li, T., & He, H. (2016). Stability and Antioxidant Activity of Food-Grade Phycocyanin Isolated from *Spirulina platensis*. *International Journal of Food Properties*, 19(10), 2349–2362. <https://doi.org/10.1080/10942912.2015.1038564>