

## KEPADATAN SEL DAN KADAR BETA-KAROTEN MIKROALGA HALOFILIK *Dunaliella salina* HASIL KULTIVASI PADA SALINITAS BERBEDA DAN PENGERINGAN BEKU

Aldy Nur Faqih<sup>1</sup>, Eka Nurrahema Ning Asih<sup>2\*</sup>, Makhfud Efendy<sup>3</sup>, Mohamad Zaki Mahasin<sup>3</sup>, dan Siska Aprilliyanti<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Ilmu Kelautan, Fakultas Pertanian, Universitas Trunodjoyo Madura, Jalan Raya Telang PO Box 2 Kamal, Bangkalan 69162, Jawa Timur, Indonesia

<sup>2</sup>Kementerian Kelautan dan Perikanan, Jalan Medan Merdeka Timur No.16, Jakarta Pusat 10110, DKI Jakarta, Indonesia

<sup>3</sup>Balai Besar Perikanan Budidaya Air Payau Jepara, Jalan Cik Lanang, Jepara 59418, Jawa Tengah, Indonesia

(Naskah diterima: 08 Maret 2026; Revisi final: 20 April 2026; Disetujui dipublikasi: 01 Mei 2026)

### ABSTRAK

*Dunaliella salina* merupakan mikroalga halofilik uniseluler hijau yang tumbuh pada salinitas ekstrem. Pertumbuhan sel *D. salina* dan kandungan beta-karotennya sangat bergantung pada salinitas media. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh salinitas terhadap kepadatan sel dan kandungan beta-karoten *D. salina*. Penelitian ini dirancang dengan model rancangan acak lengkap dengan menggunakan empat tingkat salinitas, yaitu 15, 30, 45, dan 60 ppt. Hasil kultur *D. salina* dikeringkan dengan menggunakan metode *freeze drying* pada suhu beku  $-50^{\circ}\text{C}$  dan diuji menggunakan metode spektrofotometri untuk mengetahui kandungan beta-karotennya. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa terdapat perbedaan yang signifikan ( $p < 0,05$ ) pada kepadatan sel *D. salina* dengan perlakuan salinitas media kultur yang berbeda. Kepadatan sel *D. salina* tertinggi didapati pada salinitas 15 ppt ( $142,83 \times 10^4$  sel  $\text{mL}^{-1}$ ), sedangkan kepadatan sel terendah terdapat pada salinitas 60 ppt ( $103,16 \times 10^4$  sel  $\text{mL}^{-1}$ ). Variasi salinitas secara signifikan dapat memengaruhi kandungan beta-karoten *D. salina* ( $p < 0,05$ ). Perlakuan salinitas ekstrem (60 ppt) mampu menghasilkan rata-rata kandungan beta-karoten sebesar  $1,320 \pm 0,01 \mu\text{g g}^{-1}$ , sedangkan perlakuan salinitas terendah (15 ppt) menghasilkan rata-rata kandungan beta-karoten sebesar  $0,074 \pm 0,01 \mu\text{g g}^{-1}$ . Pada kesimpulannya, temuan dalam penelitian ini mengindikasikan bahwa salinitas merupakan faktor kunci yang meregulasi pertumbuhan *D. salina* dan akumulasi beta-karotennya, dengan salinitas rendah (15 ppt) membantu dalam pertumbuhan sel dan salinitas tinggi (60 ppt) dapat meningkatkan produksi beta-karoten.

**KATA KUNCI:** beta-karoten; *Dunaliella salina*; mikroalga halofilik; salinitas berbeda

**ABSTRACT:** *Cell Density and Beta-Carotene Content of the Halophilic Microalga Dunaliella salina Cultivated at Different Salinities and Dried through Freeze Drying Method*

*Dunaliella salina* is a green unicellular halophilic microalga that grows in extreme salinity. The cell growth of *D. salina* and its beta-carotene content are highly influenced on the salinity of the culture media. This study aimed to evaluate the effects of salinity on cell density and beta-carotene content of *D. salina*. This experiment was conducted using a completely randomized design with four salinity treatments: 15, 30, 45, and 60 ppt. The biomass of *D.*

---

\*Korespondensi: Program Studi Ilmu Kelautan, Fakultas Pertanian, Universitas Trunodjoyo Madura, Jalan Raya Telang PO Box 2 Kamal, Bangkalan 69162, Jawa Timur, Indonesia  
Email: eka.asih@trunojoyo.ac.id

*salina* was dried using freeze drying method at  $-50^{\circ}\text{C}$  and tested by spectrophotometry method to determine the beta-carotene content. The results demonstrated that salinity significantly affected the cell density of *D. salina* ( $p < 0.05$ ). The highest cell density of *D. salina* was found at a salinity of 15 ppt ( $142.83 \times 10^4$  cells  $\text{mL}^{-1}$ ), while the lowest cell density was found at a salinity of 60 ppt ( $103.16 \times 10^4$  cells  $\text{mL}^{-1}$ ). Variations in salinity could significantly influence the beta-carotene content of *D. salina* ( $p < 0.05$ ). The extreme salinity treatment (60 ppt) was able to produce an average beta-carotene content of  $1.320 \pm 0.01 \mu\text{g g}^{-1}$ , while the lowest salinity treatment (15 ppt) produced an average beta-carotene content of  $0.074 \pm 0.01 \mu\text{g g}^{-1}$ . In conclusion, these findings indicate that salinity is a key factor regulating the growth and beta-carotene accumulation of *D. salina*, with low salinity (15 ppt) favoring cell growth and high salinity (60 ppt) promoting beta-carotene production.

**KEYWORDS:** beta-carotene; *Dunaliella salina*; halophilic microalgae; varying salinity

## PENDAHULUAN

*Dunaliella salina* adalah kelompok mikroalga hijau uniseluler yang termasuk divisi *Chlorophyta* dan kelas *Chlorophyceae* (Reshma *et al.*, 2021). Mikroalga ini juga memiliki kemampuan adaptasi unik terhadap lingkungan hipersalin, sehingga termasuk mikroalga halofilik (Kurniawan *et al.*, 2019). Organisme halofilik dapat memproduksi pigmen merah (Asih *et al.*, 2023). Pigmen merah yang tampak pada *D. salina* yang hidup pada kondisi hipersalin menunjukkan bahwa mikroalga halofilik ini mengandung senyawa karotenoid yaitu alfa-karoten dan beta-karoten (Çelebi *et al.*, 2021). Kemampuan beradaptasi pada lingkungan hipersalin ini juga memicu *D. salina* mengandung pigmen lainnya yaitu klorofil dan xantofil (Barbosa *et al.*, 2023). Karakter visual pigmen pada mikroorganisme halofilik menunjukkan kemampuan adaptasi organisme ini terhadap salinitas perairan (Dewi *et al.*, 2022).

Selain perubahan karakteristik pigmentasi, *D. salina* cenderung memiliki morfologi sel bulat berukuran kecil ketika terpapar kondisi hipersalin (Ramachandran *et al.*, 2023). Perubahan karakteristik morfologi tersebut merupakan bentuk adaptasi sel mikroalga ini terhadap tekanan hiperosmotik lingkungan yang menyebabkannya mudah berubah ukuran (Keil *et al.*, 2023). Kemampuan adaptasi tersebut menyebabkan *D. salina* dapat tumbuh dengan baik dalam air laut pada salinitas 29 ppt (Hutari *et al.*, 2022) dan air tambak

garam dengan salinitas tinggi yaitu 31-35 ppt (Nazhifan *et al.*, 2023). Beberapa keunggulan tersebut menjadikan spesies mikroalga ini prospektif untuk dimanfaatkan dalam industri bioteknologi (Barbosa *et al.*, 2023).

*D. salina* memiliki potensi pemanfaatan skala industri yang sangat luas mulai dari farmasi, kosmetik, pangan fungsional, hingga pakan alami untuk akuakultur (Barbosa *et al.*, 2023). Hal ini dikarenakan biomassa mikroalga ini kaya akan senyawa bioaktif bernilai ekonomi tinggi yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber bahan bakar terbarukan, gliserol, protein, lipid, vitamin, dan beta-karoten (Barbosa *et al.*, 2023; Monte *et al.*, 2020; Wu *et al.*, 2025). Pigmen karotenoid yang terkandung pada *D. salina* merupakan kelompok karotenoid esensial, di antaranya alfa- dan beta-karoten, kriptoxantin, zeaxanthin, dan lutein (Çelebi *et al.*, 2021). Kandungan beta-karoten mikroalga ini berpotensi besar untuk dijadikan antioksidan. Senyawa yang terkandung pada *D. salina* sudah dimanfaatkan dalam industri makanan dan kesehatan, khususnya sebagai suplemen kesehatan (Hyrslava *et al.*, 2022).

Senyawa pigmen karotenoid yang terdapat dalam *D. salina* memiliki fungsi krusial untuk mengoptimalkan penyerapan energi cahaya saat fase fotosintesis berlangsung dan melindungi sel dari radiasi serta tekanan osmotik tinggi pada kondisi salinitas ekstrem (Kimberly *et al.*, 2019; Tran-Nguyen *et al.*, 2023; Varshney *et al.*, 2015). Pembentukan pigmen beta-karoten dipicu oleh intensitas cahaya dan perubahan tekanan osmotik akibat perbedaan

konsentrasi garam di media hidupnya (Maulana, 2021). Selain dipengaruhi oleh faktor stres lingkungan, keberhasilan produksi biomassa dan pigmen *D. salina* juga bergantung pada manajemen kualitas air serta ketersediaan nutrisi (Djunaedi *et al.*, 2017).

Variabel kualitas air yang memengaruhi laju pertumbuhan dan produksi pigmen pada *D. salina* terdiri atas suhu, intensitas cahaya, salinitas, pH, oksigen terlarut, nitrogen, fosfor, serta nutrisi mikro lainnya (Novianti *et al.*, 2017; Wu *et al.*, 2016). Salinitas merupakan faktor pembatas yang memengaruhi perubahan morfologi sel serta memicu jalur biosintesis metabolit sekunder untuk menghasilkan senyawa beta-karoten pada *D. salina* (Kimberly *et al.*, 2019). Peningkatan kadar NaCl 1-3 M pada salinitas media kultur dapat meningkatkan produksi beta-karoten *D. salina* 2-4 kali lipat (Rammuni *et al.*, 2019). Kadar salinitas rendah berkisar antara 5–15 ppt dapat mengoptimalkan pertumbuhan dan meningkatkan kadar klorofil pada *D. salina* (Fakhri & Ekawati, 2020). Sebaliknya, kadar salinitas ekstrem (35 ppt) dapat meningkatkan kadar pigmen fikobiliprotein dan kandungan karotenoid (Djunaedi *et al.*, 2017; Nisa *et al.*, 2020).

Pengeringan beku (*freeze drying*) pada ekstrak produk biologis perlu dilakukan karena metode ini mampu mempertahankan mutu sampel seperti mempertahankan karakteristik sensorik, visual fisik, kandungan gizi, dan kandungan kimia pada ekstrak dan produk (Habibi *et al.*, 2019). Nisa *et al.* (2020) menyatakan bahwa ekstrak *D. salina* sebanyak 1 mL yang diperoleh dari kultur pada salinitas 50 ppt tanpa dikeringkan dengan metode *freeze drying*, menghasilkan kandungan karotenoid sebesar 1,4769  $\mu\text{g mL}^{-1}$ . Tidak diterapkannya metode pengeringan beku pada ekstrak mikroalga dapat berisiko memperpendek masa simpan, merusak kualitas dan kandungan gizi ekstrak, salah satunya kandungan beta-karoten pada *D. salina* (Prasetya & Yastanto, 2023).

Berdasarkan hal tersebut, penelitian skala laboratorium ini dilakukan dengan tujuan untuk mengevaluasi pengaruh penggunaan

media kultur dengan salinitas ekstrem di atas 50 ppt dan metode pengeringan beku terhadap kepadatan sel dan kadar beta-karoten *D. salina*. Investigasi kelimpahan sel dan kadar beta-karoten *D. salina* pada berbagai salinitas dalam skala laboratorium yang dilengkapi dengan pengeringan menggunakan metode pengeringan beku pada penelitian ini diharapkan dapat menjadi informasi awal dalam upaya mengoptimalkan kandungan beta-karoten pada *D. salina* sebagai bahan baku dalam industri bioteknologi kelautan.

## BAHAN DAN METODE

### Desain Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Juni hingga Agustus 2025 di Balai Besar Perikanan Budidaya Air Payau Jepara (BBPBAP Jepara), Jawa Tengah, Indonesia. Kultur mikroalga *D. salina* dilakukan di Laboratorium Pakan Alami BBPBAP Jepara. Uji kandungan beta-karoten dilakukan di Laboratorium Chem-Mix Pratama, Yogyakarta, Indonesia. Penggunaan lokasi penelitian yang berbeda tersebut disesuaikan dengan ketersediaan fasilitas laboratorium dan peralatan analisis yang mendukung pelaksanaan penelitian.

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas berbagai instrumen laboratorium dan perangkat pendukung kultur mikroalga. Alat-alat tersebut meliputi gelas ukur PYREX Graduated Cylinder tipe 3022JIS kapasitas 100 mL, erlenmeyer PYREX 4980 kapasitas 250 mL, 500 mL, dan 2000 mL, corong PYREX berdiameter 100 mm, pipet tetes OneMed kapasitas 1 mL, serta tabung reaksi IWAKI tipe 9820TST16-100NP kapasitas 12 mL. Peralatan lainnya yang digunakan antara lain, mikroskop OLYMPUS tipe CX23, hemositometer Improved Neubauer dengan ukuran ruling 1 mm, refraktometer Atago tipe *handheld*, termometer Ludwig Schneider, aerator Takari tipe AT 999, *hand tally counter* Kenko tipe 302, *lux meter* Mini Light Meters tipe UT383BT, autoklaf 18 L merek GEA tipe YX-18LDJ, lampu *light emitting diode* (LED) *tube*

light Phillips berdaya 36 watt serta freeze dryer merek BIOBASE tipe BK FD10P Table Top. Seluruh peralatan tersebut digunakan untuk mendukung proses kultur, pengamatan, dan pengukuran parameter penelitian.

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas bahan utama dan bahan pendukung untuk proses kultur serta analisis mikroalga. Bahan utama yang digunakan yaitu mikroalga *D. salina* yang merupakan koleksi dari BBPBAP Jepara, air laut yang berasal dari perairan Desa Bulu, Kabupaten Jepara, Jawa Tengah, Indonesia, serta air tawar yang berasal dari air PAM Desa Bulu, Kabupaten Jepara, Jawa Tengah, Indonesia. Bahan pendukung yang digunakan meliputi aquadest One Quick Aquadest, garam kasar non-yodium hasil produksi petambak garam Madura di Jawa Timur, Indonesia, pupuk KW21 produksi Jaringan Pertama Co., Ltd. 1850-Yohonrui Yakuso, klorin granular Kimia Land produksi Indonesia, thiosulfat Merck tipe sodium thiosulfate pentahydrate, formalin (formaldehid 4%) Sigma-Aldrich, petroleum ether merek Merck, aseton Supelco merek Merck, kapas dan kasa merek OneMed, serta saringan mikrofilter ukuran 200 mesh. Seluruh bahan tersebut digunakan untuk menunjang proses kultur, sterilisasi, preservasi, dan analisis kandungan beta-karoten mikroalga.

Penelitian ini didesain menggunakan rancangan acak lengkap (RAL) satu faktor yang terdiri atas empat perlakuan salinitas berbeda dengan jumlah ulangan masing-masing tiga kali. Pemilihan interval salinitas pada penelitian ini mengacu pada penelitian Nisa *et al.* (2020) yang dimodifikasi dengan penambahan 10 ppt untuk mewakili salinitas ekstrem. Perlakuan salinitas media kultur *D. salina* yang digunakan pada penelitian ini terdiri atas salinitas 15 (P1), 30 (P2), 45 (P3), dan 60 ppt (P4). Pemilihan kisaran salinitas ini didasarkan pada keterwakilan kemampuan toleran *D. salina* yang bersifat halofilik, yaitu halofilik rendah (15 ppt), halofilik sedang (30 ppt dan 45 ppt) serta halofilik ekstrem (60 ppt). Penentuan salinitas dilakukan dengan metode pengenceran menggunakan persamaan (1) hingga mencapai salinitas yang diinginkan.

$$V1 \times M1 = V2 \times M2 \dots\dots\dots(1)$$

Keterangan:

V1 = Volume air laut yang akan diencerkan (L)

M1 = Salinitas air laut yang akan diencerkan (ppt)

V2 = Volume air dengan salinitas yang diinginkan (L)

M2 = Salinitas yang diinginkan (ppt)

### Persiapan Media Kultur *D. salina*

Proses kultur mikroalga *D. salina* dalam skala laboratorium diawali dengan persiapan media air laut. Air laut yang akan digunakan disterilisasi terlebih dahulu agar mendapatkan kualitas media air laut yang sesuai. Proses sterilisasi media kultur mengacu pada penelitian Febriani *et al.* (2020) yang dimodifikasi, di mana air laut bersalinitas 30 ppt dengan volume 100 L ditambahkan klorin dengan dosis 100 ppm serta diberi aerasi, kemudian didiamkan selama 24 jam. Setelah itu, proses sterilisasi kimia dilanjutkan dengan menambahkan thiosulfat pada konsentrasi 50 ppm. Selanjutnya, air laut disterilisasi pada tekanan 1 atm selama 2–3 jam menggunakan autoklaf.

Media air laut yang sudah siap digunakan sebagai tempat pembibitan mikroalga disaring menggunakan saringan T200 dengan total volume media mencapai 2 L. Media air laut yang telah disaring tersebut diukur salinitasnya untuk memastikan salinitas media telah sesuai dengan perlakuan yang diinginkan. Jika salinitas pada air laut telah sesuai, maka bibit *D. salina* ditebar sebanyak 50 mL dan diberi pupuk KW21 dengan dosis 1 mg L<sup>-1</sup> untuk kultur volume 2 L (Lestari *et al.*, 2019). Kultur *D. salina* dilakukan di dalam ruangan yang dilengkapi pendingin udara untuk menjaga kestabilan suhu ruangan pada 23°C. Kultur *D. salina* dilakukan dengan lama penyinaran 24 jam, intensitas cahaya 2.500 lux berasal dari lampu LED tube light di ruangan, dan dilakukan aerasi secara terus-menerus. Proses kultur dilaksanakan selama 7 hari yang dipilih berdasarkan fase

eksponensial dalam pertumbuhan *D. salina*, di mana pada fase ini *D. salina* mencapai kepadatan tertinggi (Nisa *et al.*, 2020).

**Perhitungan Kepadatan Sel Harian *D. salina***

Tahap perhitungan kepadatan sel harian mengacu pada metode penelitian Febriani *et al.* (2020), yang dilakukan dengan mengambil 1 mL sampel dari erlenmeyer dengan volume 2 L. Sampel tersebut dimasukkan ke dalam tabung reaksi yang berisi 9 mL *aquadest* dan dihomogenkan. Selanjutnya, sampel tersebut ditambahkan 0,5 mL formalin 4%, kemudian diteteskan pada hemositometer. Proses pengamatan dilakukan menggunakan mikroskop dengan pembesaran 100x. Kepadatan sel *D. salina* dapat dihitung pada 25 kotak besar yang terlihat pada hemositometer menggunakan alat bantu *hand tally counter*.

Perhitungan kepadatan *D. salina* dilakukan pada awal tebar yang dihitung sebagai H0. Pengukuran kepadatan mikroalga dilakukan setiap hari hingga hari ke-7 yang bertepatan dengan fase eksponensial (puncak) dari pertumbuhan mikroalga *D. salina*, menggunakan persamaan (2). Pengukuran parameter kualitas air pada kultur *D. Salina* yang meliputi suhu, pH dan intensitas cahaya, dilakukan setiap hari pada pagi hari untuk mengetahui kestabilan media kultur.

$$\text{Jumlah} = \frac{n1+n2}{2} \times 10^4 \dots\dots\dots(2)$$

Keterangan:

n1 = Jumlah sel *layer* atas hemositometer (sel)

n2 = Jumlah sel *layer* bawah hemositometer (sel)

10<sup>4</sup> = Jumlah kepadatan sel pada 1 mL media atau air (sel mL<sup>-1</sup>)

**Pemanenan *D. salina* dengan Metode *Freeze Drying***

Mikroalga yang telah dikultur dipanen hingga menghasilkan produk akhir berupa tepung dengan menggunakan metode *freeze*

*drying*. Metode pengeringan beku mikroalga dilakukan dengan menggunakan alat *freeze dryer*. Metode *freeze drying* digunakan karena metode ini memiliki kemampuan untuk mempertahankan kuantitas dan kualitas kandungan metabolit sekunder, salah satunya kadar beta-karoten pada tepung *D. salina*. Metode ini dilakukan dengan cara mengambil tiap sampel hasil kultur sebanyak 150 mL lalu dituang dalam loyang dan dibekukan terlebih dahulu di dalam kulkas suhu -18°C selama 24 jam. Setelah itu, sampel didinginkan hingga mencapai suhu -50°C selama 2 jam dan selanjutnya masuk ke tahap sublimasi atau pengeringan selama 24 jam menggunakan *freeze dryer*. Hasil ekstraksi akan menjadi serbuk halus dan ditimbang untuk melihat seberapa banyak berat kering yang dihasilkan setelah dilakukan pengeringan beku pada biomassa *D. salina*.

**Uji Kadar Beta-Karoten *D. salina***

Pengujian kadar beta-karoten terdiri dari tiga tahap, yaitu persiapan sampel, pembuatan larutan blanko beta-karoten, dan uji kadar beta-karoten sampel. Persiapan sampel dilakukan dengan cara menimbang sampel *D. salina* sebanyak 5 g dan dimasukkan ke dalam erlenmeyer ukuran 500 mL. Pembuatan larutan blanko ekstrak beta-karoten dilakukan dengan mencampur larutan *petroleum ether* dan *acetone* dengan perbandingan 1:1, hingga berwarna kuning. Tahap selanjutnya berupa uji beta-karoten pada sampel kering *D. salina*. Uji beta-karoten diawali dengan pembuatan dua lapisan endapan, yaitu lapisan atas yang merupakan filtrat uji (fraksi *carotene* dalam *petroleum ether*) dan lapisan bawah (fraksi sisa *acetone* hidrofobik). Filtrat uji yang terbentuk ditampung ke dalam kolom kromatografi, kemudian dilakukan proses aktivasi pada suhu 180°C selama 2 jam. Hasil filtrat yang telah melalui proses aktivasi kemudian diencerkan menggunakan *petroleum ether* hingga mencapai batas tera. Larutan tersebut dimasukkan dalam kuvet dan diukur dengan panjang gelombang 450 nm dengan metode spektrofotometri

untuk mengetahui kadar beta-karoten pada sampel uji (Ullah *et al.*, 2018).

### Analisis Data

Analisis data dilakukan dengan bantuan perangkat lunak SPSS (IBM SPSS Statistics 27.0.1.0, Amerika Serikat). Analisis data diawali dengan uji normalitas dan uji homogenitas varians. Data yang memenuhi asumsi normalitas ( $p > 0,05$ ) dan homogenitas varians ( $p > 0,05$ ), kemudian dianalisis dengan uji *one-way* ANOVA. Data yang memiliki perbedaan signifikan akan diuji lanjut dengan uji lanjut Duncan.

## HASIL DAN BAHASAN

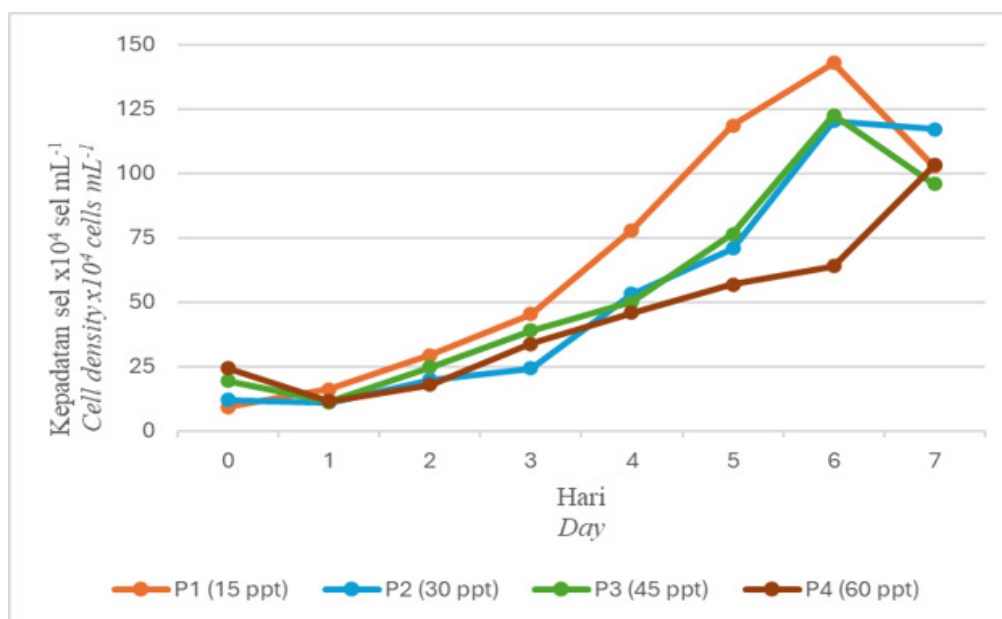
### Kepadatan Sel Harian *D. salina* pada Salinitas Berbeda

Kepadatan sel *D. salina* umumnya melewati empat fase pertumbuhan, yaitu fase *lag* (adaptasi), fase eksponensial (puncak), fase stasioner (stabil), dan fase kematian (penurunan) (Tewal *et al.*, 2021). Berdasarkan fluktuasi kepadatan sel *D. salina* pada Gambar 1, terlihat bahwa sel *D. salina* telah melewati

fase *lag* (adaptasi) dan fase eksponensial. Fase eksponensial merupakan fase puncak kepadatan sel tertinggi yang terjadi pada hari ke-6 pada perlakuan salinitas 15 ppt, 30 ppt, dan 45 ppt, sedangkan pada perlakuan salinitas 60 ppt, fase eksponensial terjadi pada hari ke-7.

Kepadatan sel *D. salina* tertinggi didapatkan pada salinitas 15 ppt pada hari ke-6 dengan kepadatan sel harian sebesar  $142,83 \times 10^4$  sel  $\text{mL}^{-1}$ . Tingkat kepadatan sel *D. salina* yang dihasilkan oleh studi ini mendekati nilai yang didapatkan oleh Fakhri dan Ekawati (2020) dengan salinitas yang sama, di mana kepadatan sel harian tertinggi mencapai  $9,86 \times 10^6$  sel  $\text{mL}^{-1}$  dibandingkan dengan kultur pada salinitas lainnya (Fakhri & Ekawati, 2020). Hasil penelitian ini juga menunjukkan bahwa kepadatan sel *D. salina* terendah ditemukan pada perlakuan salinitas 60 ppt dengan kepadatan sel tertinggi yang tercatat pada hari ke-7 sebesar  $103,16 \times 10^4$  sel  $\text{mL}^{-1}$ .

Tingginya kepadatan sel harian *D. salina* pada salinitas 15 ppt disebabkan karena salinitas ini merupakan salinitas optimal untuk mendukung pertumbuhan sel *D. salina*. Sebaliknya, rendahnya kepadatan sel *D. salina* pada salinitas 60 ppt terjadi karena salinitas ini



Gambar 1. Kepadatan sel harian *D. salina* yang dikultivasi pada salinitas berbeda selama 7 hari  
 Figure 1. Daily cell density of *D. salina* cultured at different salinity levels for 7 days

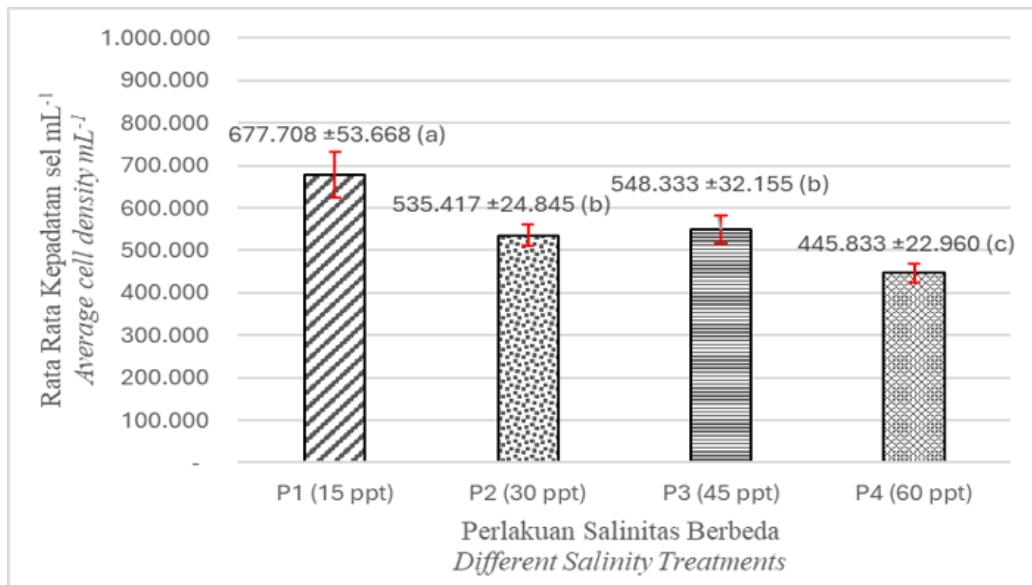
merupakan salinitas yang ekstrem bagi *D. salina* untuk tumbuh, sehingga dapat mengganggu laju pertumbuhan *D. salina*. Hal tersebut selaras dengan pernyataan Nisa *et al.* (2020) bahwa salinitas yang tinggi menyebabkan laju pertumbuhan mikroalga halofilik ini menjadi lambat akibat melemahnya kemampuan menyerap nutrisi dan kerusakan dinding sel akibat tekanan hidrostatis yang tinggi.

Rata-rata kepadatan sel *D. salina* yang tersaji pada Gambar 2 juga menunjukkan bahwa perlakuan 1 (P1) dengan salinitas 15 ppt menghasilkan nilai tertinggi dengan rata-rata kepadatan sel sebesar  $677.708 \pm 53.668$  sel  $\text{mL}^{-1}$ , sedangkan rata-rata kepadatan sel terendah ditunjukkan oleh perlakuan 4 (P4) dengan salinitas 60 ppt yang menghasilkan rata-rata kepadatan sel sebesar  $445.833 \pm 22.960$  sel  $\text{mL}^{-1}$  ( $p < 0,05$ ). Hal ini mengindikasikan bahwa semakin tinggi salinitas pada media kultur dapat menghasilkan rata-rata kepadatan sel *D. salina* yang lebih rendah. Rendahnya rata-rata kepadatan sel mikroalga halofilik ini pada salinitas ekstrem merupakan upaya untuk mempertahankan diri dari tekanan

lingkungan ekstrem, sehingga kondisi tersebut menyebabkan rendahnya rata-rata kepadatan sel *D. salina* pada perlakuan 4 (P4). Lingkungan ekstrem berupa tingginya kadar salinitas media menyebabkan terganggunya proses penyerapan nutrisi sehingga dapat memperlambat laju pertumbuhan *D. salina* (Nisa *et al.*, 2020). Rendahnya rata-rata kepadatan sel *D. salina* pada salinitas 60 ppt kemungkinan besar juga diakibatkan oleh lambatnya pertumbuhan *D. salina* karena berkurangnya respons permukaan sel akibat menurunnya kekuatan ionik larutan garam (Trova *et al.*, 2019)

### Kualitas Air

Kepadatan sel *D. salina* dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor lingkungan, seperti kualitas air dan nutrisi. Parameter kualitas air seperti pH, intensitas cahaya, dan suhu merupakan faktor utama yang berpengaruh terhadap kecepatan sel untuk berkembang saat proses kultur *D. salina* (Al-Mhanna *et al.*, 2023; Byrd & Burkholder, 2017; Çelekli *et al.*, 2014; Dewi *et al.*, 2023; Febriani *et al.*, 2020;



Gambar 2. Rata-rata kepadatan sel *D. salina* yang dikultivasi pada salinitas berbeda selama 7 hari periode kultur. Huruf yang berbeda setelah rata-rata  $\pm$  standar deviasi di atas masing-masing batang menunjukkan perbedaan nyata ( $p < 0,05$ ) antarperlakuan

Figure 2. Average of *D. salina* cell density cultured at different salinity levels over a 7-day culture period. Different letters after mean  $\pm$  standard deviation on each bar indicate significant differences ( $p < 0.05$ ) among treatments

Pourkarimi *et al.*, 2020; Reshma *et al.*, 2021). Kisaran nilai kualitas air secara umum pada kultur *D. salina* selama penelitian dapat dilihat pada Tabel 1.

Hasil pengukuran kualitas air pada kultur *D. salina* selama penelitian pada Tabel 1 menunjukkan bahwa rentang suhu media kultur pada unit penelitian ini sesuai dengan rentang optimal untuk kultur *D. salina*. Suhu pada media kultur saat penelitian berkisar antara 23–25°C. Mikroalga halofilik ini mampu hidup pada suhu relatif rendah (20°C) (Çelebi *et al.*, 2021) dan tumbuh optimal pada suhu 32°C saat dikultur pada skala laboratorium (Pourkarimi *et al.*, 2020). Suhu yang tinggi dapat menyebabkan stres dan mengganggu pertumbuhan *D. salina* saat dikultur pada fotobioreaktor (Okoro *et al.*, 2019). Sebaliknya, suhu yang rendah (15–22°C) dapat meningkatkan kepadatan sel *D. salina* (Wu *et al.*, 2016).

Data pada Tabel 1 menunjukkan bahwa intensitas cahaya yang digunakan selama penelitian (2500–3000 lux) berada dalam kondisi optimal, yaitu berkisar 2000–5500 lux. Intensitas cahaya yang dibutuhkan untuk mengoptimalkan pertumbuhan *D. salina* dilaporkan pada 5500 lux dan 2000 lux untuk menghasilkan kadar beta-karoten sebesar  $0,178 \pm 0,122 \text{ mg m}^{-3}$  (Dewi *et al.*, 2023). Intensitas cahaya pada media kultur

dapat memengaruhi proses fotosintesis bagi mikroalga halofilik, sehingga semakin tinggi intensitas cahaya dalam kultur mikroalga halofilik dapat meningkatkan pertumbuhan sel dan kandungan beta-karoten mikroalga tersebut. Kontrol terhadap suhu dan intensitas cahaya pada kultur *D. salina* dapat mendukung percepatan proses fotosintesis *D. salina* dan akumulasi beta-karoten dalam lingkungan ekstrem. Hasil penelitian Al-Mhanna *et al.* (2023), menunjukkan bahwa kultur mikroalga pada salinitas 50 ppt mampu menghasilkan biomassa sebanyak  $1,11 \text{ g L}^{-1}$  dengan adanya kontrol terhadap suhu dan intensitas cahaya.

Nilai pH media kultur *D. salina* selama penelitian menunjukkan hasil yang sesuai dengan kisaran optimal bagi pertumbuhan *D. salina*. Standar optimum pH yang dibutuhkan untuk mendukung pertumbuhan *D. salina* sebesar 7–9 (Çelekli *et al.*, 2014; Reshma *et al.*, 2021). Ekskalasi salinitas dan pH pada media kultur mikroalga halofilik dapat berdampak pada terganggunya pertumbuhan sel, sehingga menyebabkan menurunnya kelimpahan mikroalga halofilik, namun ekskalasi kedua parameter tersebut juga dapat mempercepat pembentukan senyawa beta-karoten pada mikroalga halofilik sebagai respons dari cekaman lingkungan (Maulana, 2021).

Tabel 1. Kualitas air pada media kultur *D. salina* dengan perlakuan salinitas yang berbeda  
 Table 1. Water quality of *D. salina* culture medium with different salinity treatments

Parameter <i>Parameter</i>	Kisaran parameter kualitas air <i>Range of water quality parameter</i>	Standar optimum kualitas air <i>Optimum water quality standards</i>
Suhu (°C) <i>Temperature (°C)</i>	23–25	20–32*
Intensitas cahaya (lux) <i>Light intensity (lux)</i>	2500–3000	2000–5500**
pH	7,9–8,6	7–9***

Sumber: \*Çelebi *et al.* (2021) dan Pourkarimi *et al.* (2020); \*\*Dewi *et al.* (2023) dan Febriani *et al.* (2020); \*\*\*Reshma *et al.* (2021) dan Çelekli *et al.* (2014).

Sources: \*Çelebi *et al.* (2021) and Pourkarimi *et al.* (2020); \*\*Dewi *et al.* (2023) and Febriani *et al.* (2020); \*\*\*Reshma *et al.* (2021) and Çelekli *et al.* (2014).

**Total Berat Kering dan Visual Warna *D. salina* Hasil Pengeringan Beku**

Pengeringan beku (*freeze drying*) merupakan metode pengeringan sampel yang dilakukan dengan cara membekukan sampel terlebih dahulu hingga mencapai suhu  $-50^{\circ}\text{C}$  dan kemudian memasuki proses sublimasi untuk menghilangkan kadar air tanpa melewati proses pencairan di bawah kondisi tekanan rendah. Metode pengeringan ini sangat efektif untuk mikroalga karena tidak melibatkan suhu tinggi, sehingga dapat mencegah sel dari degradasi senyawa sensitif terhadap panas, seperti pigmen karotenoid (beta-karoten), protein, dan senyawa antioksidan lainnya. Hasil pengeringan *D. salina* dengan menggunakan metode *freeze drying* dapat dilihat pada Tabel 2.

Data bobot kering *D. salina* setelah melalui proses *freeze drying* pada Tabel 2 menunjukkan hasil yang relatif berbeda antarperlakuan. Berat kering tertinggi diperoleh pada salinitas 15 ppt dengan nilai  $11,56 \pm 0,525$  g, sedangkan berat kering terendah diperoleh pada salinitas 60 ppt dengan berat  $2,92 \pm 0,425$  g. Bobot kering yang diperoleh pada penelitian ini lebih tinggi jika dibandingkan dengan hasil penelitian Darsi *et al.* (2012) dengan bobot kering *D. salina* yang hanya mencapai 3,29 g melalui pengeringan dengan menggunakan *oven*.

Penggunaan metode *freeze drying* untuk mengeringkan *D. salina* sangat efektif untuk

mengoptimalkan total berat kering dan meminimalkan kadar air dari bubuk *D. salina*. Selain itu, metode ini juga mampu menjaga stabilitas kandungan senyawa metabolit primer dan sekunder mikroalga, khususnya kadar beta-karoten. Kelebihan metode *freeze drying* dalam menjaga kualitas senyawa primer dan sekunder bahan biologis disebabkan oleh kemampuan metode ini untuk mengurangi kadar air pada sampel secara perlahan dengan teknik sublimasi menggunakan kisaran suhu  $-60^{\circ}\text{C}$  hingga  $-80^{\circ}\text{C}$  (Assegehegn *et al.*, 2020). Metode ini juga dilaporkan mampu menjaga stabilitas dan mutu sensorik sampel serta memiliki risiko kerusakan kandungan senyawa metabolit seperti protein dan beta-karoten yang sangat minim (Andrieu & Vessot, 2017; Habibi *et al.*, 2019; Nowak & Jakubczyk, 2020). Ryckebosch *et al.* (2011) juga melaporkan bahwa pengeringan mikroalga menggunakan metode *freeze drying* mampu mempertahankan warna dan kandungan *free fatty acid* (FFA) pada mikroalga selama 35 hari dibandingkan dengan metode lainnya.

Metode pengeringan lainnya yang dapat digunakan untuk proses pascapenen mikroalga halofilik seperti *D. salina* adalah metode *spray drying*, namun metode ini memiliki kelemahan seperti relatif rendahnya stabilitas senyawa metabolit dan kualitas sensorik produk selama penyimpanan. Penurunan kadar beta-karoten sebesar 10% selama 5 hari penyimpanan

Tabel 2. Total berat kering biomassa *D. salina* hasil kultur pada salinitas berbeda dan pengeringan menggunakan metode *freeze drying*

Table 2. Total dry weight of *D. salina* biomass yielded from cultivation at different salinity levels and drying using the freeze drying method

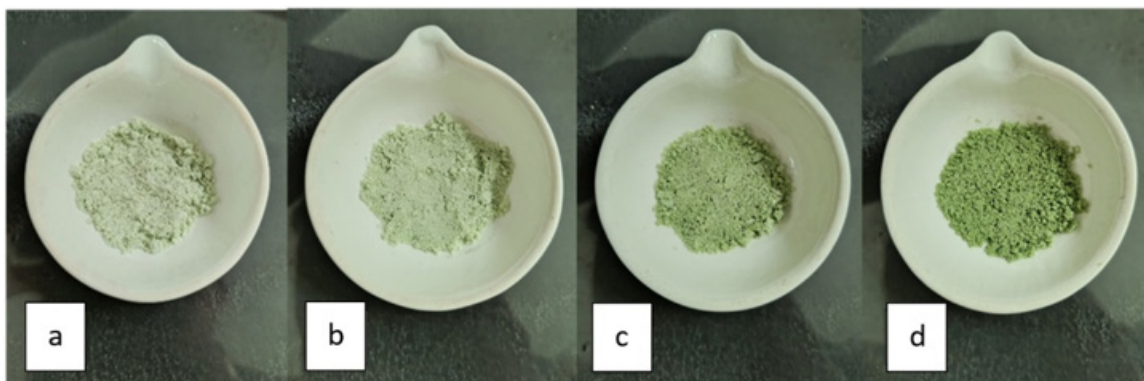
Salinitas (ppt)	Total berat kering (g)
Salinity (ppt)	Total dry weight (g)
15	$11,56 \pm 0,525$
30	$8,16 \pm 0,823$
45	$5,44 \pm 0,461$
60	$2,92 \pm 0,425$

terjadi pada *D. salina* yang dikeringkan dengan metode *spray drying* yang ditandai dengan berubahnya warna bubuk *D. salina* yang semula berwarna jingga menjadi hijau pucat (Orset *et al.*, 1999). Hal tersebut diduga diakibatkan oleh proses pengeringan bersuhu tinggi yang menyebabkan kerusakan pada sel mikroalga, sehingga beta-karoten menjadi lebih rentan terhadap oksidasi dan degradasi warna serta kandungan bahan aktif di dalamnya.

Bubuk *D. salina* secara umum memiliki warna hijau dengan kontras warna yang berbeda (Gambar 3). Perbedaan kontras warna tersebut menjelaskan fakta bahwa salinitas berpengaruh terhadap tingkat kepekatan warna *D. salina* yang menunjukkan perbedaan kapasitas produksi beta-karoten. Salinitas yang tinggi menyebabkan produksi beta-karoten dalam jumlah tinggi pada sel *D. salina* sebagai bentuk adaptasi terhadap kondisi lingkungan ekstrem. Peningkatan salinitas pada media kultur secara signifikan dapat memengaruhi kandungan beta-karoten *D. salina* karena kondisi hipersalin dapat menyebabkan stres oksidatif yang memicu sintesis karotenoid sebagai bentuk mekanisme proteksi sel pada mikroalga ini (Wu *et al.*, 2020). Visual pigmen ekstrak mikroalga yang semakin pekat menunjukkan bahwa kandungan pigmen beta-karoten pada mikroalga ini semakin tinggi (Marino *et al.*, 2020).

### Kandungan Beta-Karoten *D. salina* Hasil Kultur pada Salinitas yang Berbeda

Hasil pengukuran kandungan beta-karoten pada *D. salina* dengan menggunakan variasi salinitas berbeda selama masa kultur tersaji pada Tabel 3. Kadar beta-karoten terendah didapatkan pada salinitas 15 ppt dengan nilai rata-rata  $0,074 \pm 0,01 \mu\text{g g}^{-1}$ , sedangkan kandungan beta-karoten yang tertinggi ditemukan pada salinitas 60 ppt dengan nilai rata-rata  $1,320 \pm 0,01 \mu\text{g g}^{-1}$ . Hasil tersebut mengindikasikan bahwa semakin tinggi salinitas pada media kultur akan menghasilkan akumulasi kandungan beta-karoten pada *D. salina* yang semakin tinggi. Hal ini disebabkan karena tekanan osmotik lingkungan media kultur *D. salina* membuat sel mikroalga ini mengalami stres sehingga memproduksi karotenoid sebagai bentuk perlindungan diri dari lingkungan yang ekstrem. Hal ini sejalan dengan pernyataan Al-Mhanna *et al.* (2023), yang menjelaskan bahwa salinitas yang tinggi memicu aktivitas air, kekuatan ionik, dan osmotik, sehingga menyebabkan akumulasi kandungan karotenoid yang tinggi sebagai bentuk perlindungan diri *D. salina* terhadap tekanan lingkungan. Hasil penelitian ini dapat menjadi acuan metode kultur *D. salina* yang efektif untuk menghasilkan beta-karoten dengan jumlah yang tinggi. Pengukuran kepadatan sel dan kadar beta-karoten dari *D.*



Gambar 3. Penampakan visual bubuk *D. salina* hasil kultur pada salinitas berbeda dan dikeringkan dengan metode *freeze drying*: a. 15 ppt, b. 30 ppt, c. 45 ppt, dan d. 60 ppt

Figure 3. Visual appearance of *D. salina* powder yielded from cultivation at different salinity levels and dried with freeze drying method: a. 15 ppt, b. 30 ppt, c. 45 ppt, and d. 60 ppt

Tabel 3. Kandungan beta-karoten *D. salina* hasil kultur pada salinitas berbeda selama 7 hari periode kultur

Table 3. Beta-carotene content of *D. salina* yielded from cultivation at different salinity levels over a 7-day culture period

Salinitas (ppt) Salinity (ppt)	Beta-carotene ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )			Rata-Rata Average
	Ulangan 1 Repetition 1	Ulangan 2 Repetition 2	Ulangan 3 Repetition 3	
15	0,07404	0,06191	0,08618	0,074 $\pm$ 0,01 <sup>a</sup>
30	0,49402	0,50602	0,46998	0,490 $\pm$ 0,01 <sup>b</sup>
45	0,86883	0,91638	0,88072	0,889 $\pm$ 0,02 <sup>c</sup>
60	1,30783	1,31982	1,33181	1,320 $\pm$ 0,01 <sup>d</sup>

Keterangan: Huruf yang berbeda pada kolom yang sama menunjukkan perbedaan nyata ( $p < 0,05$ ).

Note: Different letters in the same column indicate significant differences ( $p < 0.05$ ).

*salina* yang hanya dilakukan pada fase lag hingga eksponensial dalam penelitian ini membuka ruang pengembangan untuk penelitian berikutnya. Pengukuran kepadatan sel dan beta-karoten pada fase stasioner dan kematian perlu dilakukan untuk menentukan waktu panen *D. salina* yang tepat untuk memperoleh produksi beta-karoten yang tinggi.

### KESIMPULAN

Salinitas tinggi dalam kultur *D. salina* menyebabkan terjadinya penurunan kepadatan sel *D. salina*, namun secara signifikan mampu meningkatkan kandungan beta-karoten mikroalga halofilik ini. Salinitas 15 ppt merupakan salinitas yang optimal untuk mendapatkan kepadatan sel *D. salina* tertinggi dengan durasi kultur selama 7 hari. Salinitas 60 ppt merupakan salinitas yang optimal untuk produksi beta-karoten sebagai produk akhir dari kultur *D. salina*.

### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kementerian Kelautan dan Perikanan (KKP) atas dukungan berupa pendanaan dalam penelitian ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Universitas Trunodjoyo Madura atas fasilitas bimbingan selama kegiatan penelitian berlangsung.

Terima kasih kami sampaikan kepada BBPBAP Jepara yang telah menyediakan bibit kultur *D. salina* dan Laboratorium Chem-Mix Pratama sebagai mitra laboratorium untuk pengujian kandungan beta-karoten dari *D. salina*.

### PEMBIAYAAN PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian kolaboratif antara peneliti dari Universitas Trunodjoyo Madura dan Kementerian Kelautan dan Perikanan (KKP). Pembiayaan penelitian dibagi menjadi dua yaitu seluruh kegiatan penelitian dibiayai menggunakan dana riset mandiri peneliti dari Universitas Trunodjoyo Madura dan biaya publikasi dari hasil penelitian didanai oleh KKP dalam periode tahun 2026.

### KONTRIBUSI PENULIS

ANF: berkontribusi dalam pengujian laboratorium, pengumpulan data, analisis data, supervisi penelitian, dan penulisan naskah asli. ENNA: berperan dalam pembentukan konsep, perancangan metodologi penelitian, validasi, dan penulisan naskah asli serta pengeditan. ME: turut berkontribusi dalam administrasi, perangkat lunak, visualisasi serta penulisan perbaikan dan pengeditan naskah. MZM: berkontribusi dalam akuisisi pendanaan, konseptualisasi, dan pengawasan, SA: berperan dalam penyusunan metodologi dan pengawasan.

## PERNYATAAN KONFLIK KEPENTINGAN DAN PENGGUNAAN ARTIFICIAL INTELLIGENCE (AI)

Penulis menyatakan tidak terdapat konflik kepentingan dalam pelaksanaan penelitian dan penulisan naskah ini. Penulis naskah ini tidak menggunakan alat kecerdasan buatan untuk pembuatan isi tulisan. Analisis, interpretasi data, dan penyusunan naskah dilakukan secara manual oleh penulis.

## DAFTAR ACUAN

- Al-Mhanna, N., Pistorius, M., & Sammarraie, L. A. (2023). Optimization of the cultivation conditions of the green algae *Dunaliella salina* by using simplex method. *Processes*, 11, 292. <https://doi.org/10.3390/pr11010292>
- Andrieu, J., & Vessot, S. (2017). A review on experimental determination and optimization of physical quality factors during pharmaceuticals freeze-drying cycles. *Drying Technology*, 36(2), 129-145. <https://doi.org/10.1080/07373937.2017.1340895>
- Asih, E. N. N., Fitri, D. A., Kartika, A. G. D., Astutik, S., & Efendy, M. (2023). Potensi bakteri halofilik ekstrem dari tambak garam tradisional sebagai penghambat aktivitas bakteri *Salmonella* sp. *Journal of Marine Research*, 12(3), 382-390. <https://doi.org/10.14710/jmr.v12i3.35372>
- Assegehegn, G., Fuente, E. B., Franco, J. M., & Gallegos, C. (2020). Freeze-drying: A relevant unit operation in the manufacture of foods, nutritional products, and pharmaceuticals. *Advances in Food and Nutrition Research*, 93, 1–58. <https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2020.04.001>
- Barbosa, M., Inácio, L. G., Afonso, C., & Maranhão, P. (2023). The microalga *Dunaliella* and its applications: A review. *Applied Phycology*, 4(1), 99-120. <https://doi.org/10.1080/26388081.2023.2222318>
- Byrd, S. M., & Burkholder, J. M. (2017). Environmental stressors and lipid production in *Dunaliella* sp. II. Nutrients, pH, and light under optimal or low salinity. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 487, 33–44. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2016.11.006>
- Çelebi, H., Bahadır, T., Şimşek, İ., & Tulun, Ş. (2021). Use of *Dunaliella salina* in environmental applications. *Proceedings of 1<sup>st</sup> International Electronic Conference on Biological Diversity, Ecology and Evolution*, 68, 1-8. <https://doi.org/10.3390/bdee2021-09411>
- Çelekli, A., Bozkurt, H., & Dönmez, G. (2014). Predictive modeling of  $\beta$ -carotene accumulation by *Dunaliella salina* as a function of pH, NaCl, and irradiance. *Russian Journal of Plant Physiology*, 61(2), 215-223. <https://doi.org/10.1134/S1021443714010038>
- Darsi, R., Supriadi, A., & Sasanti, A. D. (2012). Karakteristik kimiawi dan potensi pemanfaatan *Dunaliella salina* dan *Nannochloropsis*. *Fishtech*, 1(1), 14-25. <https://doi.org/10.36706/FISHTECH.V1I1.802>
- Dewi, K., Asih, E. N. N., Fitri, D. A., & Astutik, S. (2022). Karakterisasi fisiologis isolat bakteri halofilik dari kolam peminihan tambak garam rakyat di Kabupaten Pamekasan. *Juvenil*, 3(3), 79-84. <https://doi.org/10.21107/juvenil.v3i3.17074>
- Dewi, R., Winanto, T., Haryono, F. E. D., Marhaeni, B., Hanifa, G., Nabila, D., Muis, D. R., & Khalisa, S. (2023). Potensi klorofil dan karotenoid fitoplankton *Dunaliella salina* sebagai sumber antioksidan. *Buletin Oseanografi Marina*, 12(1), 125-132. <https://doi.org/10.14710/buloma.v12i1.49006>
- Djunaedi, A., Suryono, C. A., & Sardjito. (2017). Kandungan pigmen polar dan biomassa pada mikroalga *Dunaliella salina* dengan salinitas berbeda. *Jurnal Kelautan Tropis*, 20(1), 1-6. <https://doi.org/10.14710/jkt.v20i1.1347>

- Fakhri, M., & Ekawati, A. W. (2020). Pengaruh salinitas terhadap pertumbuhan, biomassa dan klorofil-a *Dunaliella* sp. *Journal of Fisheries and Marine Research*, 4(3), 393-398. <https://doi.org/10.21776/ub.jfmr.2020.004.03.12>
- Febriani, R., Hasibuan, S., & Syafridiiman. (2020). Pengaruh intensitas cahaya berbeda terhadap kepadatan dan kandungan karotenoid *Dunaliella salina*. *Jurnal Perikanan dan Kelautan*, 25(1), 36-43. <https://doi.org/10.31258/jpk.25.1.36-43>
- Habibi, N. A., Fathia, S., & Utami, C. T. (2019). Perubahan karakteristik bahan pangan pada keripik buah dengan metode *freeze drying*. *Jurnal Sains Terapan*, 5(2), 67-76. <https://doi.org/10.32487/jst.v5i2.634>
- Hutari, A., Nisaa, R. A., Suhendra, Yarza, H. N., & Anugrah, D. (2022). Isolation of *Dunaliella salina* microalgae from Pari Island, Jakarta, Indonesia. *Jurnal Biologi Tropis*, 22(3), 809-814. <http://dx.doi.org/10.29303/jbt.v22i3.3804>
- Hyrslava, I., Krausova, G., Mrvikova, I., Stankova, B., Branyik, T., Malinska, H., Huttl, H., Kana, A., & Dorskocil, I. (2022). Functional properties of *Dunaliella salina* and its positive effect on probiotics. *Marine Drugs*, 20(12), 781. <https://doi.org/10.3390/md20120781>
- Keil, K., Mehlmer, N., Cavellius, P., Garbe, D., Haack, M., Ritz, M., Awad, D., & Bruck, T. (2023). The time-resolved salt stress response of *Dunaliella tertiolecta*—A comprehensive system biology perspective. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(20), 15374. <https://doi.org/10.3390/ijms242015374>
- Kimberly, F. D., Supriyantini, E., & Sedjati, S. (2019). Pertumbuhan dan kandungan lutein *Dunaliella salina* pada salinitas yang berbeda. *Buletin Oseanografi Marina*, 8(1), 44-48. <https://doi.org/10.14710/buloma.v8i1.20839>
- Kurniawan, A., Firdaus, M. E., Salamah, L. N., & Ulfa, S. M. (2019). Analisis pengaruh konsentrasi vanadate ( $VO_4^{3-}$ ) dalam media kultur terhadap pertumbuhan *Dunaliella* sp. *Media Akuakultur*, 14(1), 49-54. <https://doi.org/10.15578/MA.14.1.2019.49-54>
- Lestari, U. A., Mukhlis, A., & Priyono, J. (2019). Pengaruh pemberian pupuk nutrisil dan KW21+Si terhadap pertumbuhan *Chaetoceros calcitrans*. *Jurnal Perikanan*, 9(1), 66-74. <https://doi.org/10.29303/jp.v8i2.137>
- Marino, T., Casella, P., Sangiorgio, P., Verardi, A., Ferraro, A., Hristoforou, E., Molino, A., & Musmarra, D. (2020). Natural beta-carotene: a microalgae derivate for nutraceutical applications. *Chemical Engineering Transactions*, 79, 103-108. <https://doi.org/10.3303/CET2079018>
- Maulana, I. T. (2021). Pengaruh modifikasi nutrisi media kultur *Dunaliella salina* terhadap aktivitas sitotoksik antikanker. *Jurnal Ilmiah Farmasi Farmasyifa*, 4(2), 66-78. <https://doi.org/10.29313/jiff.v4i2.7971>
- Monte, J., Ribeiro, C., Parreira, C., Costa, L., Brive, L., Casal, S., Brazinha, C., & Crespo, J. G. (2020). Biorefinery of *Dunaliella salina*: Sustainable recovery of carotenoids, polar lipids and glycerol. *Bioresource Technology*, 297, 122509. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122509>
- Nazhifan, S. F., Dewi, K., & Asih, E. N. N. (2023). Bakteri halofilik dan halotoleran dari air baku tambak garam Universitas Trunojoyo Madura. *Jurnal Pengolahan Hasil Perikanan Indonesia*, 26(1), 67-76. <http://dx.doi.org/10.17844/jphpi.v26i1.44536>
- Nisa, K., Hasibuan, S., & Syafridiiman. (2020). Pengaruh salinitas berbeda terhadap kepadatan dan kandungan karotenoid *Dunaliella salina*. *Jurnal Perikanan dan Kelautan*, 25(1), 27-35. <https://doi.org/10.31258/jpk.25.1.27-35>

- Novianti, T., Zainuri, M., & Widowati, I. (2017). Studi tentang pertumbuhan mikroalga *Chlorella vulgaris* yang dikultivasi berdasarkan sumber cahaya yang berbeda. *Jurnal Mangifera Edu*, 1(2), 1-8. <https://doi.org/10.31943/mangiferaedu.v1i2.67>
- Nowak, D., & Jakubczyk, E. (2020). The freeze-drying of foods—The characteristic of the process course and the effect of its parameters on the physical properties of food materials. *Foods*, 9(10), 1488. <https://doi.org/10.3390/foods9101488>
- Okoro, V., Azimov, U., Munoz, J., Hernandez, H. H., & Phan, A. N. (2019). Microalgae cultivation and harvesting: Growth performance and use of flocculants - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 115, 109364. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109364>
- Orset, S., Leach, G. C., Morais, R., & Young, A. J. (1999). Spray-drying of the microalga *Dunaliella salina*: Effects on  $\beta$ -carotene content and isomer composition. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 47(11), 4782-4790. <https://doi.org/10.1021/jf990571e>
- Pourkarimi, S., Hallajisani, A., Alizadehdakhl, A., Nouralishahi, A., & Golzary, A. (2020). Factors affecting production of beta-carotene from *Dunaliella salina* microalgae. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 29, 101771. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101771>
- Prasetya, W., & Yastanto, A. J. (2023). Evaluasi waktu pengeringan pada metode *freeze drying* terhadap karakteristik kacang tanah, bawang putih dan tomat menggunakan alat Labconco FreeZone 2.5 L. *Indonesian Journal of Laboratory*, 6(2), 100-105. <https://doi.org/10.22146/ijl.v1i2.87724>
- Ramachandran, P., Pandey, N. K., Yadav, R. M., Suresh, P., Kumar, A., & Subramanyam, R. (2023). Photosynthetic efficiency and transcriptome analysis of *Dunaliella salina* under hypersaline: A retrograde signaling mechanism in the chloroplast. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1192258. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1192258>
- Rammuni, M. N., Ariyadasa, T. U., Nimarshana, P. H. V., & Attalage, R. A. (2019). Comparative assessment on the extraction of carotenoids from microalgal sources: Astaxanthin from *H. pluvialis* and  $\beta$ -carotene from *D. salina*. *Food Chemistry*, 277, 128-134. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.10.066>
- Reshma, R., Devi, K. C., Kumar, S. D., Santhanam, P., Perumal, P., Krishnaveni, N., Begum, A., Pragnya, M., Arthikha, R., Dhanalakshmi, B., & Kim, M. K. (2021). Enhancement of pigments production in the green microalga *Dunaliella salina* (PSBDU05) under optimized culture condition. *Bioresource Technology Reports*, 14, 100672. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100672>
- Ryckebosch, E., Muylaert, K., Eeckhout, M., Ruysen, T., & Foubert, I. (2011). Influence of drying and storage on lipid and carotenoid stability of the microalga *Phaeodactylum tricorutum*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(20), 11063-11069. <https://doi.org/10.1021/jf2025456>
- Tewal, F., Kemer, K., Rimper, J. R., Mantiri, D. M., Pelle, W. E., & Mudeng, J. D. (2021). Laju pertumbuhan dan kepadatan mikroalga *Dunaliella* sp. pada pemberian timbal asetat dengan konsentrasi yang berbeda. *Jurnal Pesisir dan Laut Tropis*, 9(1), 30-37. <https://doi.org/10.35800/jplt.9.1.2021.33571>
- Tran-Nguyen, Q. A., Tran, T. T. V., & Trinh-Dang, M. (2023). Effects of light on the growth and  $\beta$ -carotene accumulation in the green algae *Dunaliella salina*. *Asian Journal of Biology*, 18(1), 1-10. <https://doi.org/10.9734/AJOB/2023/v18i1332>
- Trovão, M., Pereira, H., Silva, J., Páramo, J., Quelhas, P., Santos, T., Silva, J. T., Machado, A., Gouveia, L., Barreira, L., & Varela, J. (2019). Growth performance, biochemical composition and sedimentation velocity of *Tetraselmis* sp. CTP4 under different salinities using low-cost lab-and pilot-scale systems. *Heliyon*, 5(5), e01553. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01553>

- Ullah, R., Khan, S., Shah, A., Ali, H., & Bilal, M. (2018). Time-temperature dependent variations in beta-carotene contents in carrot using different spectrophotometric techniques. *Laser Physics*, 28(5), 055601. <https://doi.org/10.1088/1555-6611/aaadee>
- Varshney, P., Mikulic, P., Vonshak, A., Beardall, J., & Wangikar, P. P. (2015). Extremophilic micro-algae and their potential contribution in biotechnology. *Bioresource Technology*, 184, 363-372. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.11.040>
- Wu, M., Zhu, R., Lu, J., Lei, A., Zhu, H., Hu, Z., & Wang, J. (2020). Effects of different abiotic stresses on carotenoid and fatty acid metabolism in the green microalga *Dunaliella salina* Y6. *Annals of Microbiology*, 70, 48. <https://doi.org/10.1186/s13213-020-01588-3>
- Wu, S., Ye, K., Zheng, X., & Zhao, L. (2025). Review microalgal valorization of CO<sub>2</sub>: A sustainable pathway to biofuels and high-value chemicals. *Fermentation*, 11(7), 371. <https://doi.org/10.3390/fermentation11070371>
- Wu, Z., Duangmanee, P., Zhao, P., Juntawong, N., & Ma, C. (2016). The effects of light, temperature, and nutrition on growth and pigment accumulation of three *Dunaliella salina* strains isolated from saline soil. *Jundishapur Journal of Microbiology*, 9(1), e26732. <https://doi.org/10.5812/jjm.26732>