



Eksplorasi Peran *Reactive Oxygen Species (ROS)* yang diinduksi oleh Ekstrak *Caesalpinia Sappan* untuk Air yang Terkontaminasi *Anabaena sp.*

^{1*}Himawan Akbar Mahendra, ²Intan Supraba, ³Budi Kamulyan, ⁴Eko Agus Suyono

¹Program Studi Magister Teknik Sipil, Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia

^{2,3}Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia

⁴Fakultas Biologi, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia

*Corresponding Author e-mail: himawanakbarmahendra@mail.uqm.ac.id

Received: February 2025; Revised: February 2025; Accepted: March 2025; Published: March 2025

Abstrak: Studi ini bertujuan untuk mengeksplorasi penurunan jumlah *Anabaena sp.* menggunakan ekstrak *Caesalpinia sappan* untuk menentukan konsentrasi optimal dalam menginduksi stres oksidatif untuk melemahkan struktur sel melalui peningkatan produksi *Reactive Oxygen Species (ROS)*. Analisa parameter kualitas air seperti warna, kekeruhan dan *Total Dissolved Solid (TDS)*, untuk mengevaluasi efektivitas ekstrak terhadap dampak ekosistem perairan. Dengan pendekatan metode TRIZ (*Theory of Inventive Problem Solving*) dan *True Experimental* untuk mengoptimalkan variasi konsentrasi ekstrak dan untuk memahami *Caesalpinia Sappan* atau kayu secang dapat menembus lapisan peptidoglikan dari *Anabaena sp.* Hasil penelitian selama 2 hari menunjukkan bahwa senyawa bioaktif dalam *Caesalpinia sappan* menginduksi ROS yang dikonfirmasi adanya peningkatan warna dari hari 1 ke 2 yang diakibatkan dari pelepasan pigmen *Anabaena sp.* sebagai respon pada saat mengalami stres oksidatif. Peningkatan konsentrasi ekstrak *Caesalpinia sappan* mempengaruhi jumlah populasi *Anabaena sp.* dengan nilai tertinggi pada konsentrasi tinggi 100% dengan penurunan mencapai 86% pada hari ke 2 dengan warna 1209 Cu, kekeruhan 39,6 NTU, dan TDS 114,5 mg/l. Observasi mikroskopis menunjukkan *Anabaena sp.* mengalami disintegrasi sel dan hancurnya sel. Studi ini membuktikan bahwa senyawa bioaktif dalam *Caesalpinia sappan*, seperti brazilin dan flavonoid, berperan dalam generasi ROS yang mengarah pada kematian sel *Anabaena sp.* melalui mekanisme stres oksidatif.

Kata kunci: *Caesalpinia sappan*; Harmful Algae Blooms (HAB); stres oksidatif; *Reactive Oxygen Species (ROS)*; kualitas air

Abstract: This study aims to explore the reduction of *Anabaena sp.* populations using *Caesalpinia sappan* extract, aiming to determine the optimal concentration to induce oxidative stress that weakens cell structures via increased production of *Reactive Oxygen Species (ROS)*. Water quality parameters such as color, turbidity, and *Total Dissolved Solids (TDS)* were analyzed to evaluate the extract's effectiveness on the aquatic ecosystem. Employing a combination of the TRIZ (*Theory of Inventive Problem Solving*) method and a *True Experimental* design, the study optimized extract concentration variations and examined the ability of *Caesalpinia sappan* (sappan wood) to penetrate the peptidoglycan layer of *Anabaena sp.* Results obtained over two days indicate that the bioactive compounds in *Caesalpinia sappan* induce ROS, as evidenced by an increase in color intensity from day 1 to day 2 due to pigment release from *Anabaena sp.* in response to oxidative stress. Higher extract concentrations led to a significant reduction in *Anabaena sp.* populations, with the 100% concentration yielding an 86% decrease on day 2, alongside a color reading of 1209 Cu, turbidity of 39.6 NTU, and TDS of 114.5 mg/l. Microscopic observations revealed notable cell disintegration and damage in *Anabaena sp.* This study confirms that bioactive compounds, such as brazilin and flavonoids in *Caesalpinia sappan*, contribute to ROS generation, leading to cell death in *Anabaena sp.* via oxidative stress.

Keywords: *Caesalpinia sappan*; Harmful Algae Blooms (HAB); oxidative stress; *Reactive Oxygen Species (ROS)*; water quality.

How to Cite: Mahendra, H., Supraba, I., Kamulyan, B., & Suyono, E. (2025). Eksplorasi Peran *Reactive Oxygen Species (ROS)* yang diinduksi oleh Ekstrak *Caesalpinia Sappan* untuk Air yang Terkontaminasi *Anabaena sp.*. *Bioscientist: Jurnal Ilmiah Biologi*, 13(1), 492-509. doi:<https://doi.org/10.33394/bioscientist.v13i1.14756>



<https://doi.org/10.33394/bioscientist.v13i1.14756>

Copyright© 2025, Mahendra et al

This is an open-access article under the CC-BY-SA License.



PENDAHULUAN

Anabaena sp. adalah genus *cyanobacteria* yang sering ditemukan di ekosistem air tawar dan berperan penting dalam siklus nitrogen (Davidson *et al.*, 2014). Kemampuan *Anabaena sp.* untuk mengikat nitrogen di atmosfer berasal dari aktivitas enzim nitrogenase yang terdapat dalam heterokista, yaitu sel khusus yang ada dalam struktur filamen mikroalga ini (Kumar *et al.*, 2010). Struktur filamen *Anabaena sp.* terdiri dari sel vegetatif dan heterokista, yang mendukung fiksasi nitrogen dan kelangsungan hidup mikroalga dalam kondisi lingkungan yang kurang ideal. Pigmen fotosintesis utama, seperti klorofil-a, fikoeritrin, dan fikosianin, memungkinkan *Anabaena sp.* berfotosintesis baik dalam cahaya rendah maupun tinggi Klepacz-Smółka *et al.*, 2020; Matos, 2017). Namun, pertumbuhan yang tidak terkendali dari *Anabaena sp.* dapat menyebabkan masalah lingkungan serius, seperti *Harmful Algae Blooms* (HAB) (Zhang *et al.*, 2022). HAB sering dipicu oleh peningkatan konsentrasi nitrat dan fosfat yang berlebihan di perairan, menyebabkan *Anabaena sp.* berkembang biak secara masif, merusak kualitas air, dan mengancam keberlanjutan ekosistem air tawar (Schindler *et al.*, 2016).

Penggunaan pupuk, yang mengandung nutrisi nitrogen dan fosfor, memberikan kontribusi besar terhadap pencemaran air permukaan (Tilman *et al.*, 2002). Nitrogen yang tidak diserap oleh tanaman akan terangkut oleh air tanah atau limpasan air saat hujan, sehingga masuk ke badan air, sedangkan fosfor akan menempel pada partikel tanah dan terbawa ke badan air melalui sedimentasi akibat hujan deras (Chang *et al.*, 2018; Xu *et al.*, 2017). Kualitas air yang dimaksud seperti warna, *Total Dissolved Solid* (TDS), dan kekeruhan dalam badan air. Selama fase HAB, *Anabaena sp.* menghasilkan *Reactive Oxygen Species* (ROS), jika berlebih akan menyebabkan stres oksidatif dalam selnya (He & Häder, 2002a). Stres oksidatif ini mengakibatkan kerusakan pada membran sel, DNA, dan pigmen fotosintesis, sehingga menurunkan kapasitas fotosintesis dan daya tahan hidup mikroalga (Gill & Tuteja, 2010; He & Häder, 2002b; Latifi *et al.*, 2009; Panda *et al.*, 2014). Selain itu, *Anabaena sp.* diketahui memproduksi *cyanotoxin*, yang sangat berbahaya bagi kesehatan manusia jika dikonsumsi melalui air yang terkontaminasi (Paerl & Otten, 2013). *Cyanotoxin* tidak hanya berdampak negatif pada manusia tetapi juga pada organisme lain yang hidup di ekosistem air (Pan *et al.*, 2018). HAB juga dapat mengancam kehidupan ikan dan organisme air lainnya (Sazali *et al.*, 2024).

Fenomena HAB menjadi permasalahan global, sehingga mendorong upaya mitigasi dengan cara yang inovatif. Salah satunya adalah dikembangkan pendekatan fisik seperti sistem aerasi, penggunaan gelombang ultrasonik (Bosma *et al.*, 2003), *skimming* (Uduman *et al.*, 2010) dan filtrasi (Lourenço *et al.*, 2002). Pendekatan fisik tersebut menghadapi tantangan yaitu dapat merusak ekosistem dan dalam penerapan secara luas memerlukan biaya operasional tinggi (Lee *et al.*, 2012). Sistem filtrasi membutuhkan pengembangan lebih lanjut dan implementasi di skala yang luas (Arenas *et al.*, 2016). Pendekatan kimia-fisik yang memodifikasi penggunaan senyawa organik dan anorganik seperti kitosan dan PAC dapat menghasilkan residu yang dapat menimbulkan dampak negatif bagi biota air (Renault *et al.*, 2009).

Pemantauan kualitas air seperti jumlah mikroalga, warna, TDS, dan kekeruhan dapat menjadi indikator dalam pembentukan atau peningkatan HAB. Jumlah sel mikroalga sering berkorelasi dengan konsentrasi toksin, peningkatan warna dapat berkorelasi dengan pelepasan pigmen mikroalga ketika proses pembentukan ROS (Silva *et al.*, 2024). Dalam pengembangan metode mitigasi perlu mempertimbangkan dampak yang dihasilkan pada kualitas air dengan pendekatan berbasis ekosistem yang lebih terintegrasi dan berkelanjutan. Penggunaan ekstrak kayu secang dapat

menjadi solusi dalam mitigasi mikroalga yang aman bagi biota pada ekosistem air. Dengan adanya pendekatan menggunakan bahan organik memungkinkan lebih terintegrasi dan berkelanjutan. Bahan organik dapat terdegradasi secara alami sehingga ramah lingkungan.

Sebagai solusi untuk mengatasi HAB, penggunaan bahan organik alami seperti *Caesalpinia sappan* menjadi pilihan yang menarik. *Caesalpinia sappan*, yang dikenal sebagai kayu secang, adalah tanaman obat tradisional yang kaya akan senyawa bioaktif seperti brazilin. Kayu secang telah lama digunakan di Asia Tenggara untuk tujuan medis karena sifat antikanker, antimikroba, antioksidan, dan antiinflamasi (Nirmal et al., 2015; Tewtrakul et al., 2015). Brazilin adalah senyawa flavonoid yang ditemukan dalam kayu secang, memiliki potensi besar sebagai agen penghambat pertumbuhan mikroalga (Azim et al., 2018). Dengan sifat antioksidannya, brazilin dapat memicu stres oksidatif dalam sel mikromikroalga, termasuk *Anabaena sp.* yang menyebabkan kerusakan pada struktur seluler dan pigmen fotosintesis (Lee et al., 2015). Meningkatnya produksi ROS dalam sel mikromikroalga, sehingga menghambat proses fotosintesis dan akhirnya menyebabkan kematian sel mikroalga (Lee et al., 2015). Kayu secang juga terbukti dalam menghambat penyebaran penyakit pada ikan seperti bakteri *Edwardsiella tarda* dan *Edwardsiella ictalurid* (Sazali et al., 2024). Senyawa metabolit sekunder pada kayu secang berperan sebagai antimikroba (Sazali et al., 2024). Alkaloid mempunyai kemampuan untuk mematikan bakteri, saponin dapat mengganggu stabilitas membran sel bakteri, flavonoid bertugas dalam merusak membran sitoplasma sel bakteri, dan tannin dapat menghancurkan enzim pada kaitan membran sel dan polipeptida (Febriyani et al., 2018).

Penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi potensi ekstrak kayu secang, terutama kandungan senyawa bioaktifnya, dalam mengendalikan pertumbuhan *Anabaena sp.* di ekosistem perairan tercemar HAB. Selain itu, penelitian ini akan menganalisis bagaimana senyawa bioaktif dalam ekstrak kayu secang dapat mempengaruhi atau bereaksi pada *Anabaena sp.* pengaruh hubungan pertumbuhan mikroalga yang massif keterkaitan dengan indikator dari beberapa parameter kualitas air seperti perubahan warna, *Total Dissolved Solids* (TDS), dan kekeruhan. Perubahan yang signifikan apakah dapat mempengaruhi fungsi ekosistem perairan dan berdampak negatif terhadap kehidupan akuatik serta penggunaan air oleh manusia. Dalam konteks ini, ekstrak kayu secang diharapkan tidak hanya efektif dalam menekan pertumbuhan *Anabaena sp.* tetapi juga dapat memperbaiki parameter kualitas air setelah aplikasi, seperti penurunan kekeruhan, stabilisasi warna air, dan pengurangan TDS. Evaluasi efektivitas kayu secang sebagai agen pengendali biologis akan dilakukan dengan menggunakan indikator kualitas air tersebut, sehingga memberikan pendekatan ilmiah yang komprehensif. Penelitian ini diharapkan memberikan bukti ilmiah tentang keunggulan kayu secang sebagai solusi pengendalian menggunakan bahan alami yang ramah lingkungan dan dampak dapat terdegradasi secara alami. Dengan mengutamakan bahan alami yang aman bagi ekosistem, penelitian ini berkontribusi pada pengembangan metode pengelolaan *Harmful Algae Blooms* (HAB) yang tidak hanya efektif, tetapi juga berkelanjutan untuk menjaga kualitas air di masa depan untuk mengurangi ketergantungan penggunaan bahan kimia sintesis yang berpotensi merusak ekosistem.

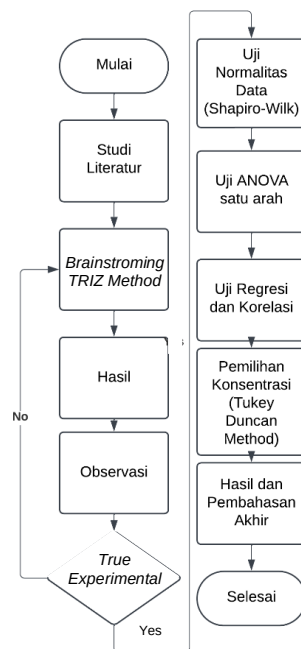
METODE

Untuk menganalisis pengaruh ekstraksi kayu secang terhadap jumlah mikroalga dan hubungannya dengan parameter kualitas air seperti warna, kekeruhan, dan TDS perlu dirancang sebuah metode penelitian. Pada penelitian ini menggunakan *TRIZ*

(*Theory of Inventive Problem Solving*) untuk pendekatan penelitian dilakukan untuk mengidentifikasi strategi dalam pengelolaan kualitas air untuk menangani *Harmful Algae Bloom*. Metode *TRIZ* memiliki kemampuan dalam menganalisis masalah secara sistematis dan menghasilkan solusi inovatif (Hiltmann *et al.*, 2014) mengadaptasi matrik kontradiksi sebagai cara untuk menyelesaikan tantangan dalam rekayasa proses. Proses analisis kontradiksi pada metode *TRIZ* berdasarkan matrik 39 parameter dan matrik 40 jenis prinsip inovasi. Dengan matrik dalam metode ini dapat diidentifikasi prinsip yang sesuai dan terdapat saran cara untuk menghasilkan solusi ideal (Rahim *et al.*, 2015). Metode ini digunakan untuk menggantikan metode *trial and error* yang tidak sistematis menjadi sistematis sehingga dapat mengembangkan inovasi secara efektif.

Proses *brainstorming* menggunakan metode *TRIZ*, dengan pendekatan ini digunakan untuk memahami bagaimana *Caesalpinia Sappan* atau kayu secang dapat menembus lapisan peptidoglikan dari *Anabaena sp.* Identifikasi kontradiksi utama terdapat 2 jenis yaitu kontradiksi teknis dan kontradiksi fisik. Pada kontradiksi teknis lapisan peptidoglikan sebagai lapisan luar yang berfungsi penghalang atau pelindung dan dapat memberikan resistensi terhadap penetrasi senyawa aktif. Kontradiksi fisik struktur mikroalga perlu dihancurkan tanpa merusak komponen lainnya di dalam air. Untuk penerapan prinsip inventif *TRIZ* berdasarkan prinsip *TRIZ* nomor 35 (Transformasi sifat fisik) dan prinsip *TRIZ* nomor 15 (Dinamisme), komponen aktif yang terdapat dalam kayu secang seperti brazilin dan protosappanin B dapat berfungsi untuk melemahkan struktur peptidoglikan melalui mekanisme seperti oksidasi atau dengan gangguan molekuler dengan membutuhkan variasi konsentrasi dan waktu paparan sebagai tolak ukur tingkat optimalisasi senyawa aktif tanpa menyebabkan toksisitas yang berlebih di dalam badan air. Segmentasi sistem dengan pemisahan lapisan peptidoglikan memanfaatkan brazilin yang memungkinkan memiliki interaksi terhadap ikatan dalam peptidoglikan yang dapat melemahkan integrasi dinding sel mikroalga. Dengan pemanfaatan sumber daya lokal ekstrak kayu secang memiliki sifat antimikroba, antiinflamasi, antikanker dan antioksidan memiliki keunggulan mudah didapatkan karena ketersediaan di Indonesia sehingga dapat memperkuat argumen untuk penerapannya dalam konteks lokal. Model sistem yang ideal dengan hasil yang diinginkan yaitu penghancuran dinding sel *Anabaena sp.* tanpa menurunkan kualitas air sehingga aman bagi lingkungan dan makhluk hidup, mekanisme brazilin berpotensi dapat melemahkan dinding sel gram negatif dengan menembus membran dalam, merusak lapisan peptidoglikan sehingga dapat mengurangi ikatan struktural dinding sel mikroalga, disisi lain protosappanin B dapat berfungsi sebagai agen yang dapat meningkatkan permeabilitas lapisan pelindung mikroalga.

Dalam proses penelitian menggunakan metode *True Experimental*, yang dilakukan pengujian secara langsung di Laboratorium. Laboratorium yang digunakan yaitu di Laboratorium Teknik Penyehatan dan Lingkungan Universitas Gadjah Mada. Pada penelitian ini akan dilakukan pengambilan data dari sampel yaitu jumlah mikroalga, dan parameter kualitas air seperti warna, kekeruhan dan TDS. Data akan dilakukan analisa pengaruh ekstraksi secang terhadap pertumbuhan mikroalga dan hubungan terhadap kualitas air di badan air. Langkah-langkah penelitian dijelaskan dalam Gambar 1, yang mencakup pengumpulan data awal, penerapan perlakuan, dan evaluasi hasil.



Gambar 1. Alur Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan sampel yang diambil dari Embung Tirtoagung yang ada di Kecamatan Seyegan, Kabupaten Sleman. Embung Tirtoagung memiliki air yang berwarna hijau yang diduga terkontaminasi oleh mikroalga jenis *cyanobacteria*. Sampel diambil dengan metode *purposive sampling* di lima titik embung pada permukaan air embung, pengambilan sampel dilakukan dengan metode *purposive sampling* pada lima titik yang dipilih secara strategis berdasarkan kondisi lingkungan terkait potensi sumber pencemar. Lima titik embung ini yaitu dekat dengan *overflow* embung, dekat dengan pertanian jagung, dekat dengan *inlet*, dekat dengan tambak ikan dan dekat kebun dengan pohon besar. Pemilihan lima titik ini dimaksud untuk memperoleh gambaran representatif sebaran dan konsentrasi mikroalga. Pengambilan sampel dilakukan sekitar pukul 09.00 WIB dengan setiap titiknya diambil air sampel sebanyak 100ml (Vuuren *et al.*, 2008), waktu ini dipilih karena mikroalga pada pagi hari melakukan fotosintesis dan bergerak ke permukaan air.

Pengambilan sampel pada permukaan air dilakukan pada pagi hari karena adanya tren migrasi kolom air pada populasi *cyanobacteria* (Wood *et al.*, 2009). Hal ini juga disebutkan bahwa kelimpahan relatif *cyanothrichaceae* pada pagi hari 11,1% dan pada sore 1,4% (Cameron *et al.*, 2024). Sampel yang diambil dikelompokkan dalam enam kelompok perlakuan yaitu 0%, 1%, 10%, 25%, 50%, dan 100% dengan dua jenis konsentrasi ekstraksi kayu secang yaitu konsentrasi rendah dan konsentrasi tinggi. Setiap kelompok sebelum perlakuan dilakukan observasi menggunakan mikroskop untuk mengetahui kesesuaian sampel dengan tujuan penelitian. Setiap kelompok setelah perlakuan diuji pada Sedgwick Rafter Chamber untuk menghitung jumlah mikroalga. Pengamatan dilakukan 20 kotak pada Sedgwick Rafter Chamber dilakukan selama tiga hari: hari ke-0 sebagai *baseline*, hari ke-1, dan hari ke-2 setelah perlakuan. Penelitian ini dilakukan selama 2 hari untuk melihat dampak langsung ekstrak kayu secang terhadap kualitas air dalam waktu singkat serta dapat mengevaluasi perubahan yang terjadi dengan 2 perbandingan konsentrasi kayu secang. Setiap sampel per hari juga dilakukan uji parameter warna, kekeruhan, dan TDS (*Total Dissolved Solids*). Pengujian ini bertujuan untuk mengamati bagaimana

ekstrak kayu secang memengaruhi kualitas air, baik dari segi fisik maupun kimia, seperti efek warna yang dihasilkan oleh ekstrak secang, penurunan kekeruhan dan perubahan kadar padatan terlarut.

Metode *True Experimental* yang dilakukan pengujian secara langsung di Laboratorium Teknik Penyehatan dan Lingkungan Universitas Gadjah Mada. Pada penelitian ini akan dilakukan pengambilan data dari sampel yaitu jumlah mikroalga, dan parameter kualitas air seperti warna, kekeruhan dan TDS. Data akan dilakukan analisa pengaruh ekstraksi secang terhadap pertumbuhan mikroalga dan hubungan terhadap kualitas air di badan air. Instrumen utama yang digunakan yaitu Sedgwick Rafter Chamber untuk menghitung jumlah mikroalga, colorimeter untuk analisis warna, turbidimeter untuk mengukur kekeruhan, dan TDS meter untuk mengukur *total dissolved solids (TDS)*. Instrumen yang digunakan dilakukan kalibrasi dengan standar referensi yang sesuai untuk memastikan akurasi dalam pengukuran. Kalibrasi dilakukan menggunakan larutan standar untuk colorimeter, sampel air uji baku untuk turbidimeter, dan larutan konduktivitas standar untuk TDSmeter. Validitas dan reliabilitas instrumen telah diuji sebelumnya berdasarkan standar laboratorium yang relevan. Prosedur penelitian mencakup pengukuran parameter awal pada hari ke-0, pemberian ekstraksi kayu secang sesuai dengan konsentrasi yang ditentukan, dan pengamatan perubahan pada hari ke-1 dan ke-2. Setiap pengamatan dilakukan dengan dua kali pengulangan untuk meningkatkan akurasi data. Perhitungan jumlah mikroalga menggunakan bantuan kamera android dan perangkat lunak *colony counter* untuk meminimalisir kesalahan perhitungan jumlah mikroalga.

Proses ekstraksi konsentrasi rendah kayu secang menggunakan potongan kayu secang dengan berat 1gram yang ditimbang menggunakan timbangan laboratorium kemudian dimasukkan dalam gelas beker yang telah diisi dengan aquades sebanyak 100ml untuk dilakukan proses ekstraksi. Proses ekstraksi dilakukan dengan pengadukan menggunakan *magnetic stirrer* dengan kecepatan pengadukan 600rpm selama 120menit. Hasil ekstraksi konsentrasi rendah ini menunjukkan tingkat warna 285 Cu, TDS 26,6 mg/l, dan kekeruhan 8,73 NTU. Setiap variasi konsentrasi disiapkan tabung uji terpisah, rasio ekstraksi dengan pengenceran 0% (5 ml aquades), 1% (4,95 ml aquades, 0,05 mL ekstrak), 10% (4,5 ml aquades, 0,5 mL ekstrak), 25% (3,75 ml aquades, 1,25 mL ekstrak), 50% (2,5 ml aquades, 2,5 mL ekstrak), dan 100% (5 ml ekstrak). Setiap sampel uji dengan 90 ml air sampel ditambahkan variasi konsentrasi ekstraksi kayu secang.

Proses ekstraksi konsentrasi tinggi kayu secang menggunakan potongan kayu secang dengan berat 1gram yang ditimbang menggunakan timbangan laboratorium kemudian dimasukkan dalam gelas beker yang telah diisi dengan aquades sebanyak 100ml untuk dilakukan proses ekstraksi. Proses ekstraksi dilakukan dengan cara pemanasan dengan kompor listrik selama 20menit. Hasil ekstraksi konsentrasi tinggi ini menunjukkan tingkat warna 1730 Cu, TDS 36,3 mg/l, dan kekeruhan 23,1 NTU. Setiap variasi konsentrasi disiapkan tabung uji terpisah dengan rasio ekstraksi dengan pengenceran. Pada pengujian dengan ekstraksi konsentrasi tinggi, rasio ekstraksi dengan pengenceran 0% (10 ml aquades), 1% (9,9 ml aquades, 0,1 ml ekstrak), 10% (9 ml aquades, 1 ml ekstrak), 25% (7,5 ml aquades, 2,5 ml ekstrak), 50% (5 ml aquades, 5 ml ekstrak), dan 100% (10 ml ekstrak). Setiap sampel uji dengan 90 ml air sampel ditambahkan masing-masing variasi konsentrasi ekstraksi kayu secang.

Data jumlah mikroalga yang diperoleh dianalisis menggunakan uji normalitas *Shapiro-Wilk* untuk menentukan distribusi data. Jika dalam uji normalitas dengan *Shapiro-Wilk* didapatkan $p > 0,05$, maka data diterima sebagai data yang terdistribusi normal. Kepadatan populasi mikroalga dihitung menggunakan rumus sebagai berikut:

$$C = (T \times 1000 \text{ mm}^3) / (P \times L \times T \times S)$$

Di mana, N = jumlah sel/koloni yang dihitung, L = panjang strip transek/kotak (mm), W = lebar jalur transek/kotak (mm), D = kedalaman ruang (mm), dan S = jumlah transek/kotak yang dihitung.

Data awal diuji normalitas menggunakan uji *Shapiro-Wilk* untuk memastikan bahwa data yang diperoleh mengikuti distribusi normal, yang merupakan syarat utama dalam analisis parametrik. Jika nilai p dari uji tersebut >0,05, maka data dianggap memenuhi asumsi normalitas. Setelah data terbukti normal, dilakukan analisis variansi (ANOVA) satu arah. Metode ini digunakan untuk menguji apakah terdapat perbedaan signifikan antara rata-rata kelompok perlakuan ekstrak. Dengan membandingkan variansi antar kelompok dengan variansi dalam kelompok, ANOVA dapat memberikan gambaran apakah perlakuan memiliki pengaruh nyata terhadap perubahan yang diukur. Apabila *p-value* yang dihasilkan <0,05, maka terdapat perbedaan yang signifikan di antara setidaknya dua kelompok. Untuk mengetahui secara spesifik perbedaan antar kelompok, kami menggunakan uji *post-hoc Tukey HSD*. Uji ini memungkinkan perbandingan berpasangan antara semua kelompok sehingga dapat diidentifikasi kelompok mana saja yang berbeda secara signifikan satu sama lain. Selain itu, hubungan antara jumlah mikroalga dan parameter kualitas air (seperti warna, kekeruhan, dan *Total Dissolved Solids*) dianalisis dengan uji korelasi *Pearson*. Uji ini mengukur kekuatan dan arah hubungan linier antara dua variabel. Nilai koefisien korelasi (r) yang mendekati 1 atau -1 menunjukkan hubungan yang kuat, sedangkan nilai mendekati 0 menandakan hubungan yang lemah. Seluruh analisis statistik dilakukan menggunakan perangkat lunak SPSS versi terbaru, dengan tingkat signifikansi ditetapkan pada $p < 0,05$. Pendekatan ini memberikan dasar yang kuat untuk menyimpulkan bahwa perlakuan ekstrak berpengaruh signifikan terhadap jumlah mikroalga dan parameter kualitas air. Dengan demikian, hasil penelitian ini diharapkan dapat mendukung pengembangan solusi pengendalian mikroalga cyanobacteria yang efektif dan ramah lingkungan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sampel diambil di lima titik Embung Tirtoagung, Kecamatan Seyegan, Kabupaten Sleman dengan hipotesis awal tercemar mikroalga *cyanobacteria*. Berikut kondisi Embung Tirtoagung yang dapat dilihat pada Gambar 2 sebagai berikut:



Gambar 2. Kondisi embung tirtoagung Kecamatan Seyegan, Kabupaten Sleman

Setelah pengambilan sampel dilakukan observasi jenis mikroalga yang mencemari Embung Tirtoagung menggunakan Mikroskop Olympus CX33 didapatkan hasil tercemar oleh mikroalga *Anabaena sp.* dapat dilihat pada Gambar 3 sebagai berikut:



Gambar 3. Hasil observasi mikroskop *Anabaena* sp.

Hasil Observasi menggunakan mikroskop divalidasi dengan *library* pada *UTEX Culture Collection of Algae (UTEX LB3013 Anabaena sp.)*. Mikroalga ini di klasifikasikan pada *Bacteria (Kingdom)*, *Gracilicutes (Subkingdom)*, *Cyanobacteria (Phylum)*, *Cyanophyceae (Class)*, *Nostocophycidae (Subclass)*, *Nostocales (Order)*, *Nostocaceae (Family)*, dan *Anabaena (Genus)*.

Selama periode pengujian dua hari, dilakukan pengamatan terhadap populasi mikroalga dan parameter kualitas air, termasuk warna, TDS, dan kekeruhan yang dapat dilihat pada Tabel 1 untuk hasil pengujian konsentrasi rendah dan Tabel 2 untuk hasil pengujian konsentrasi tinggi. Konsentrasi ekstrak kayu secang terhadap perubahan kepadatan populasi, warna, kekeruhan dan TDS dari hari ke 0 atau *baseline* hingga di hari ke 2 pada konsentrasi rendah ekstraksi kayu secang dapat dilihat berturut-turut pada Grafik 4a, b, c, dan d. Konsentrasi ekstrak kayu secang terhadap perubahan kepadatan populasi, warna, kekeruhan dan TDS dari hari ke 0 atau *baseline* hingga di hari ke 2 pada konsentrasi tinggi ekstraksi kayu secang dapat dilihat berturut-turut pada Grafik 5a, b, c, dan d.

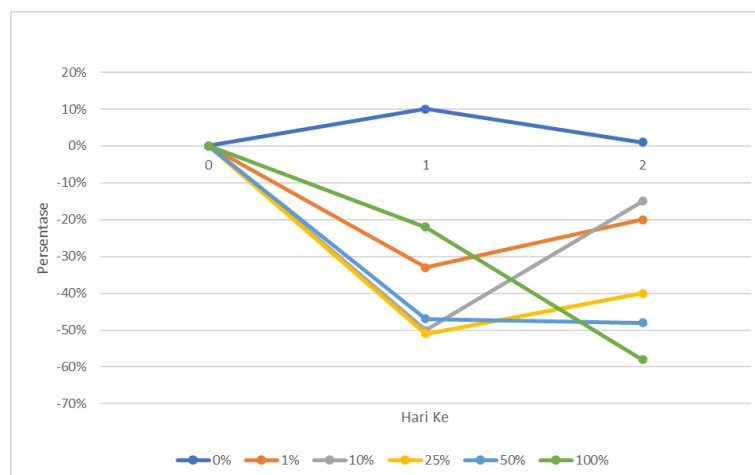
Tabel 1. Hasil pengujian ekstraksi kayu secang konsentrasi rendah terhadap kualitas air (warna, kekeruhan, dan TDS)

No	Hari	Konsentrasi Kayu Secang	Kepadatan Populasi	Persentase Kepadatan	Warna (Cu)	Kekeruhan (NTU)	TDS (Mg/l)
1	0	0%	217650	0%	119	61,7	111,7
2		1%	217650	0%	118	54,3	111,4
3		10%	217650	0%	116	56,1	111,9
4		25%	217650	0%	121	55,5	110,9
5		50%	217650	0%	137	63,4	112,3
6		100%	217650	0%	149	60,6	111,7
1	1	0%	239350	10%	100	51,4	113,6
2		1%	146200	-33%	95,9	61,5	113,8
3		10%	109500	-50%	102	49,7	114
4		25%	106900	-51%	104	47,9	114,3
5		50%	114950	-47%	131	54,8	115,2
6		100%	168700	-22%	159	52,1	115,6
1	2	0%	218850	1%	83,9	43,6	120,5
2		1%	173700	-20%	83,9	46,7	120,7
3		10%	185300	-15%	95,8	50,5	120,9

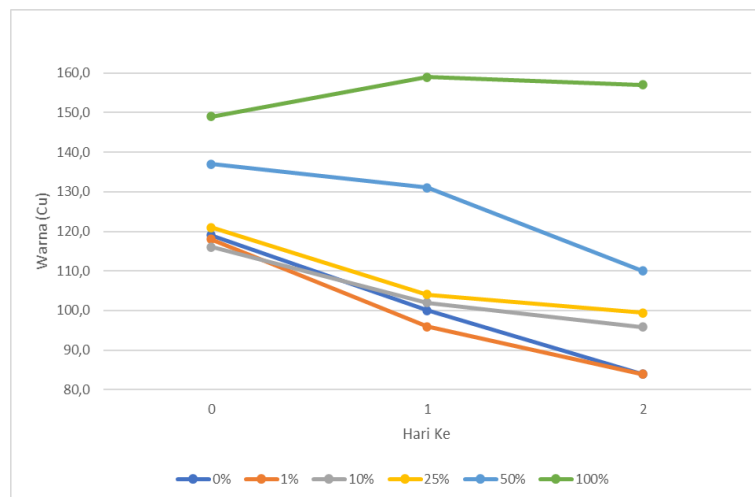
No	Hari	Konsentrasi Kayu Secang	Kepadatan Populasi	Persentase Kepadatan	Warna (Cu)	Kekeruhan (NTU)	TDS (Mg/l)
4		25%	129600	-40%	99,4	44,7	120,7
5		50%	112550	-48%	110	43,2	120,9
6		100%	91000	-58%	157	39,9	122,8

Tabel 2. Hasil pengujian ekstraksi kayu secang konsentrasi tinggi terhadap kualitas air (warna, kekeruhan, dan TDS)

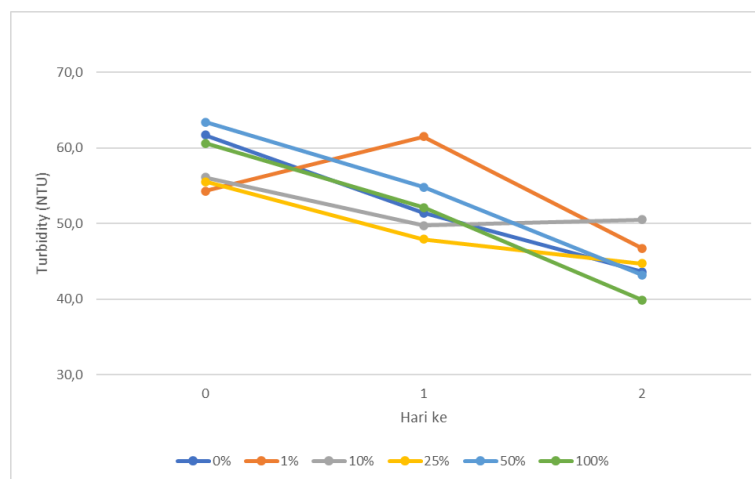
No	Hari	Konsentrasi Kayu Secang	Kepadatan Populasi	Persentase Kepadatan	Warna (Cu)	Kekeruhan (NTU)	TDS (Mg/l)
1	0	0%	161150	0%	115	66,7	96,8
2		1%	161150	0%	131	60,3	96,5
3		10%	161150	0%	172	56,2	97
4		25%	161150	0%	254	56,2	97,2
5		50%	161150	0%	406	60,6	97,7
6		100%	161150	0%	894	56,1	98,6
1	1	0%	191800	19%	104	62	107,8
2		1%	197650	23%	127	64,1	107
3		10%	189750	18%	174	54,4	107,3
4		25%	54250	-66%	267	41,7	108,9
5		50%	41400	-74%	501	40,9	108,5
6		100%	26750	-83%	1170	47,2	109
1	2	0%	177200	10%	109	71,2	113,6
2		1%	155950	-3%	138	61,1	112,2
3		10%	116500	-28%	184	60,1	112,9
4		25%	42200	-74%	286	34,6	114,2
5		50%	39850	-75%	531	37,3	114,1
6		100%	24700	-85%	1209	39,6	114,5



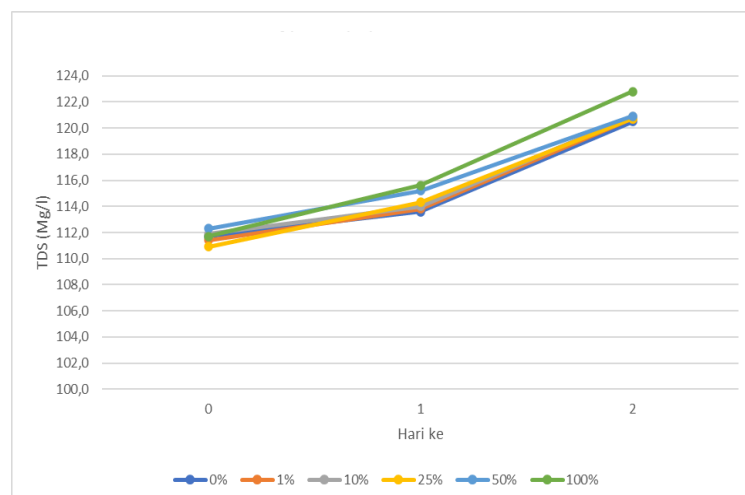
Grafik 4a. Grafik perubahan jumlah *Anabaena sp.* per hari pada konsentrasi rendah



Grafik 4b. Grafik perubahan warna per hari pada konsentrasi rendah



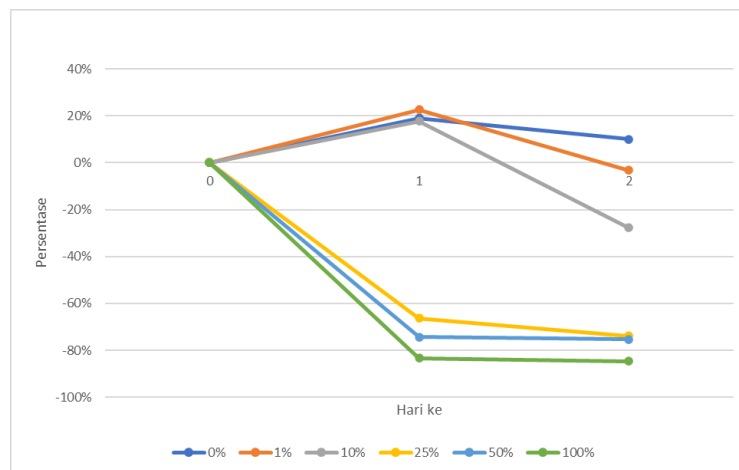
Grafik 4c. Grafik perubahan kekeruhan per hari pada konsentrasi rendah



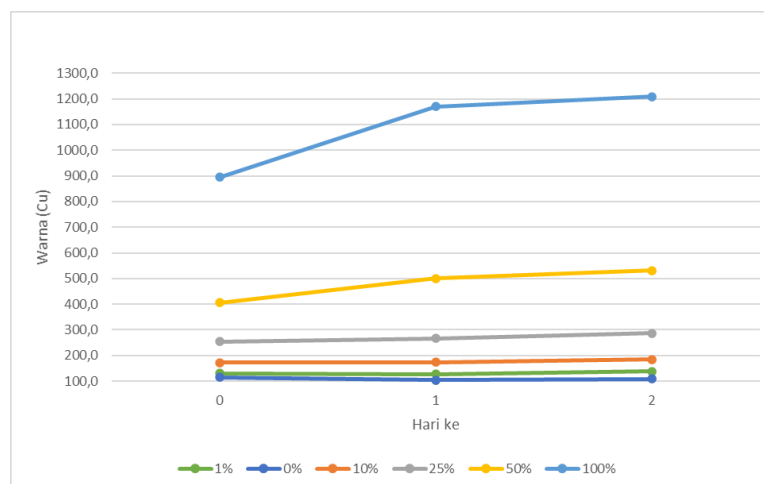
Grafik 4d. Grafik perubahan TDS per hari pada konsentrasi rendah

Berdasarkan hasil di atas dapat diketahui bahwa perubahan jumlah *Anabaena sp.* terhadap persentase konsentrasi rendah ekstrak kayu secang pada 0% dari hari 0 ke 1 mengalami kenaikan jumlah *Anabaena sp.* bergerak ke permukaan karena proses

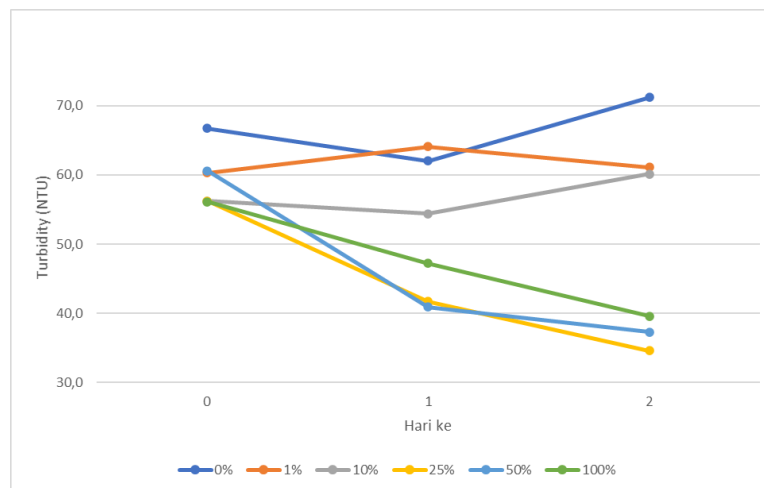
fotosintesis. Sedangkan pada 1%, 10%, 25%, dan 50% membentuk kurva V dimana bentuk respon untuk bertahan diri yang menandakan bahwa adanya pola gerak kehidupan *Anabaena sp.* Pada konsentrasi 100% terus mengalami penurunan jumlah karena mengalami stress oksidatif sedang, hasil ini dikonfirmasi pada grafik perubahan warna terhadap konsentrasi ekstrak kayu secang, dari hari 0 ke 1 menunjukkan adanya kenaikan warna. Hasil ini sesuai dengan penelitian terkait ketika mengalami stres oksidatif *Anabaena sp.* akan mengeluarkan pigmen (Silva et al., 2024). Dari grafik perubahan kekeruhan dari hari 0 ke 2 pada konsentrasi 0%, 25%, 50%, dan 100% mengalami penurunan berbeda dengan konsentrasi 1% dan 10% yang masih mengalami penurunan dan kenaikan diantara hari 0 ke 1, dan 1 ke 2. Untuk grafik TDS dari konsentrasi 0%, 1%, 10%, 25%, 50%, dan 100% cenderung sama-sama mengalami kenaikan dengan pola yang sama.



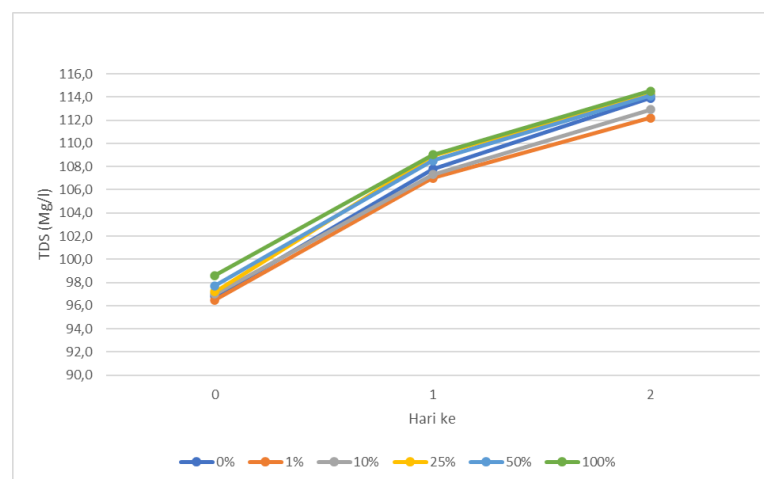
Grafik 5a. Grafik perubahan jumlah *Anabaena sp.* per hari pada konsentrasi tinggi



Grafik 5b. Grafik perubahan warna per hari pada konsentrasi tinggi



Grafik 5c. Grafik perubahan kekeruhan per hari pada konsentrasi tinggi



Grafik 5d. Grafik perubahan TDS per hari pada konsentrasi tinggi

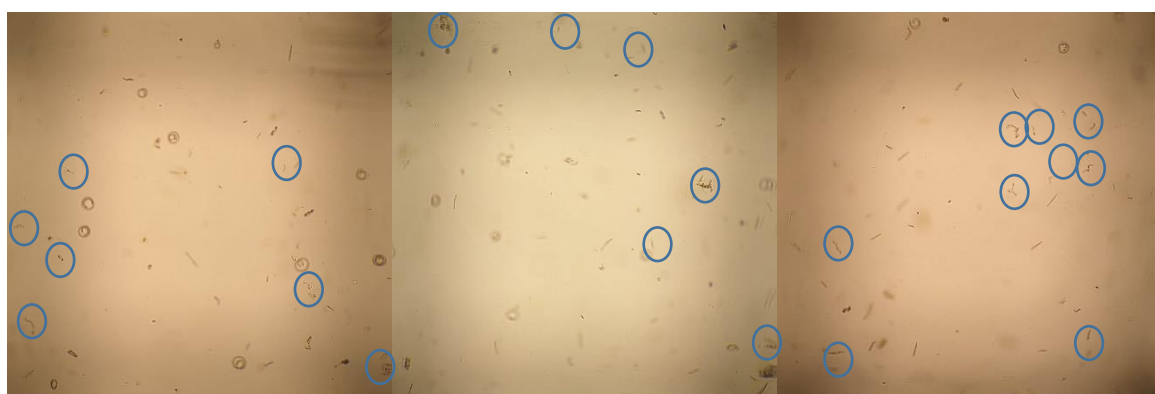
Berdasarkan hasil di atas dapat diketahui hubungan antara konsentrasi rendah dan konsentrasi tinggi bahwa pada konsentrasi tinggi *Anabaena sp.* mengalami peningkatan warna karena stres oksidatif, dimana *Anabaena sp.* mengeluarkan pigmen seperti pada gambar konsentrasi ekstrak kayu secang terhadap warna. Pada grafik perubahan jumlah *Anabaena sp.* per hari terhadap konsentrasi ekstrak kayu secang pada konsentrasi 0%, 1%, dan 10% mengalami peningkatan jumlah kepadatan populasi *Anabaena sp.* pada hari 0 ke 1 sedangkan pada hari 1 ke 2 mengalami penurunan jumlah kepadatan populasi *Anabaena sp.* hal ini mengkonfirmasi bahwa masih adanya pola gerak dan respon *Anabaena sp.* untuk bertahan diri. Pada konsentrasi 25%, 50%, dan 100% mengalami penurunan yang signifikan dari hari 0 ke 1, dan pada hari 1 ke 2 cenderung stabil. Konsentrasi tinggi ekstrak kayu secang pada konsentrasi 25%, 50%, dan 100% memiliki hipotesis awal bahwa *Anabaena sp.* mengalami kematian. Dari grafik perubahan kekeruhan dari hari 0 ke 2 pada konsentrasi 25%, 50%, dan 100% mengalami penurunan berbeda dengan konsentrasi 0%, 1%, dan 10% yang masih mengalami penurunan dan kenaikan diantara hari 0 ke 1, dan 1 ke 2. Untuk grafik TDS dari konsentrasi 0%, 1%, 10%, 25%, 50%, dan 100% cenderung sama-sama mengalami kenaikan dengan pola yang sama.

Berdasarkan data jumlah *Anabaena sp.* yang dilakukan perhitungan menggunakan Sedgwick Rafter Chamber sebanyak 20 kotak setiap perlakuan perhari kemudian dilakukan uji normalitas data. Uji normalitas data digunakan metode *Shapiro*

Wilk didapatkan hasil data dari setiap perlakuan dan perhari $p > 0,05$ maka data diterima sebagai data yang terdistribusi normal. Pada konsentrasi rendah hari ke-1 didapatkan nilai p antara 0,135-0,888, untuk konsentrasi rendah hari ke-2 didapatkan nilai p antara 0,227-0,925, untuk konsentrasi tinggi hari ke-1 didapatkan nilai p antara 0,188-0,794, dan konsentrasi tinggi hari ke-2 didapatkan nilai p antara 0,251-0,987.

Berdasarkan uji ANOVA, nilai $p < 0,001$ menunjukkan bahwa terdapat perbedaan signifikan antar perlakuan, baik pada konsentrasi rendah maupun tinggi, pada hari ke-1 dan ke-2. Untuk mengetahui secara spesifik kelompok mana yang berbeda secara signifikan, dilakukan uji *post-hoc Tukey HSD*. Hasil uji *Tukey HSD* menunjukkan bahwa pada hari ke-2, perlakuan dengan konsentrasi ekstrak kayu secang 100%, 50%, dan 25% menghasilkan penurunan populasi *Anabaena sp.* yang jauh lebih besar dibandingkan perlakuan dengan konsentrasi yang lebih rendah. Data menunjukkan bahwa konsentrasi 100% mencapai penurunan populasi hingga 86%, sedangkan konsentrasi 50% dan 25% masing-masing menunjukkan penurunan sekitar 74% dan 66%. Hasil tersebut diinterpretasikan sebagai indikasi bahwa peningkatan konsentrasi ekstrak berkorelasi langsung dengan efektivitas penekanan pertumbuhan *Anabaena sp.* Mekanisme yang mendasarinya adalah induksi pembentukan *Reactive Oxygen Species (ROS)*, yang menyebabkan stres oksidatif dan mengakibatkan kerusakan pada struktur sel. Hal ini dibuktikan dengan pengamatan mikroskopis pada perlakuan dengan konsentrasi 100%, 50%, dan 25% tampak sel-sel *Anabaena sp.* mengalami pelepasan ikatan dan disintegrasi, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2a, 2b, 2c serta Gambar 3a, 3b, 3c. Di sisi lain, pada perlakuan dengan konsentrasi 0%, 1%, dan 10% tidak ditemukan kerusakan struktural yang signifikan, meskipun terdapat fluktuasi jumlah populasi antara hari pertama dan kedua. Kemudian dilakukan uji korelasi *Pearson* mendukung temuan tersebut dengan menunjukkan hubungan negatif yang kuat antara kepadatan populasi dan parameter kualitas air, misalnya hubungan antara kepadatan populasi *Anabaena sp.* dengan kekeruhan (nilai r mencapai -0,966 pada konsentrasi tinggi di hari ke-2). Data ini menguatkan interpretasi bahwa penurunan populasi yang signifikan pada konsentrasi tinggi ekstrak kayu secang terkait dengan perubahan parameter kualitas air akibat peningkatan ROS.

Hasil pengujian statistik dan observasi mikroskopis secara bersama-sama mendukung bahwa konsentrasi ekstrak kayu secang yang tinggi (100%, 50%, dan 25% pada hari ke-2) memberikan efek signifikan dalam menekan populasi *Anabaena sp.* melalui mekanisme induksi ROS yang menyebabkan kerusakan sel, sehingga memperkuat potensi ekstrak sebagai solusi inovatif dan ramah lingkungan dalam pengendalian mikroalga beracun.



Gambar 2. Hasil mikroskop ikatan sel *Anabaena sp.* lepas atau hancur



a

b

c

Gambar 3. Hasil mikroskop *Anabaena sp.* sel utuh

Setelah uji signifikansi, dilakukan uji korelasi dengan metode *pearson* untuk mengetahui hubungan antara kepadatan populasi *Anabaena sp.* dengan parameter kualitas air (warna, kekeruhan, TDS). Didapatkan hasil seperti pada Tabel 3, Tabel 4, Tabel 5 dan Tabel 6 sebagai berikut.

Tabel 3. Hasil pengujian korelasi ekstraksi kayu secang konsentrasi rendah hari ke 1 terhadap kualitas air (warna, kekeruhan, dan TDS)

		Persentase	Warna	Kekeruhan	TDS
Pearson Correlation	Persentase	1.000	.011	.079	-.252
	Warna	.011	1.000	-.084	.954
	Kekeruhan	.079	-.084	1.000	-.084
	TDS	-.252	.954	-.084	1.000

Tabel 4. Hasil pengujian korelasi ekstraksi kayu secang konsentrasi rendah hari ke 2 terhadap kualitas air (warna, kekeruhan, dan TDS)

		Persentase	Warna	Kekeruhan	TDS
Pearson Correlation	Persentase	1.000	-.817	.586	-.688
	Warna	-.817	1.000	-.673	.964
	Kekeruhan	.586	-.673	1.000	-.598
	TDS	-.688	.964	-.598	1.000

Tabel 5. Hasil pengujian korelasi ekstraksi kayu secang konsentrasi tinggi hari ke 1 terhadap kualitas air (warna, Kekeruhan, dan TDS)

		Persentase	Warna	Kekeruhan	TDS
Pearson Correlation	Persentase	1.000	-.755	.906	-.937
	Warna	-.755	1.000	-.501	.695
	Kekeruhan	.906	-.501	1.000	-.834
	TDS	-.937	.695	-.834	1.000

Tabel 6. Hasil pengujian korelasi ekstraksi kayu secang konsentrasi tinggi hari ke 2 terhadap kualitas air (warna, kekeruhan, dan TDS)

		Persentase	Warna	Kekeruhan	TDS
Pearson Correlation	Persentase	1.000	-.741	.966	-.771
	Warna	-.741	1.000	-.608	.673
	Kekeruhan	.966	-.608	1.000	-.703
	TDS	-.771	.673	-.703	1.000

Pada uji korelasi *Pearson*, hasil menunjukkan bahwa pada perlakuan dengan konsentrasi rendah pada hari ke-1 tidak ditemukan korelasi yang signifikan antara kepadatan populasi *Anabaena sp.* dengan ketiga parameter (warna, kekeruhan, dan TDS), dengan nilai korelasi mendekati nol. Sebaliknya, pada konsentrasi rendah hari ke-2, nilai korelasi antara kepadatan populasi dan parameter warna mencapai -0,817, sedangkan untuk kekeruhan dan TDS masing-masing menunjukkan korelasi sebesar 0,586 dan -0,688. Pada perlakuan dengan konsentrasi tinggi, hasil uji korelasi pada hari ke-1 menunjukkan korelasi negatif yang kuat antara kepadatan populasi dengan warna ($r = -0,755$) dan TDS ($r = -0,937$), serta korelasi positif yang kuat dengan kekeruhan ($r = 0,906$). Pada hari ke-2, nilai korelasi pada konsentrasi tinggi semakin menegaskan temuan tersebut, di mana nilai korelasi antara kepadatan populasi dan kekeruhan mencapai nilai tertinggi ($r = 0,966$), sedangkan untuk warna dan TDS masing-masing diperoleh nilai korelasi -0,741 dan -0,771.

Nilai-nilai korelasi ini menunjukkan bahwa pada konsentrasi rendah hari ke-2, penurunan kepadatan populasi berkorelasi dengan penurunan nilai warna dan TDS, sedangkan peningkatan kepadatan berhubungan dengan peningkatan kekeruhan. Pada konsentrasi tinggi, terutama pada hari ke-2, terdapat hubungan yang sangat kuat antara peningkatan kekeruhan dan penurunan kepadatan populasi, yang mengindikasikan bahwa peningkatan efek stres oksidatif (ditandai dengan peningkatan kekeruhan) namun berbanding terbalik dengan jumlah sel *Anabaena sp.*

KESIMPULAN

Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa ekstraksi kayu secang (*Caesalpinia sappan*) memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kepadatan populasi *Anabaena sp.* Konsentrasi 25%, 50%, 100% ekstraksi kayu secang konsentrasi tinggi mengakibatkan penurunan populasi jumlah *Anabaena sp.* yang signifikan. Pada konsentrasi 100% dapat menurunkan jumlah populasi *Anabaena sp.* mencapai 86%. Ekstraksi kayu secang mengakibatkan *Anabaena sp.* mengalami stres oksidatif yang ditandai dengan peningkatan pigmen warna pada air sampel. Penurunan populasi jumlah *Anabaena sp.* ditandai dengan adanya pelepasan ikatan sel dan hancurnya sel pada hasil pengamatan mikroskopis. Dari hasil uji korelasi didapatkan bahwa pada ekstraksi kayu secang pada konsentrasi rendah maupun tinggi mempengaruhi kualitas air yaitu pada parameter warna, kekeruhan dan TDS. Pada parameter warna dengan tingkat penurunan jumlah populasi *Anabaena sp.* semakin besar penurunan jumlah populasi *Anabaena sp.* maka semakin tinggi nilai warna. Pada parameter kekeruhan dengan tingkat penurunan jumlah populasi *Anabaena sp.* semakin besar penurunan jumlah populasi *Anabaena sp.* maka semakin rendah nilai kekeruhan. Pada parameter TDS dengan tingkat penurunan jumlah populasi *Anabaena sp.* semakin besar penurunan jumlah populasi *Anabaena sp.* maka semakin tinggi nilai TDS.

REKOMENDASI

Penelitian ini belum mempertimbangkan hasil jumlah populasi *Anabaena sp.* pada kedalaman tertentu pada badan air. Sehingga perlu adanya penelitian yang menguji antara pengaruh ekstraksi kayu secang terhadap jumlah *Anabaena sp.* pada variasi kedalaman badan air. Pengujian yang dilakukan perlu dilakukan pada badan air secara langsung tanpa terkontrol sehingga dapat mempresentasikan hasil apabila ekstraksi kayu secang dilakukan pada badan air skala besar. Perlu dilakukan juga penelitian yang mempertimbangkan ekstraksi kayu secang terhadap parameter kualitas air yang lain seperti nitrat, nitrit, fosfat merupakan zat yang berpengaruh besar terhadap peningkatan jumlah populasi *Anabaena sp.* dengan ditambahkan pengujian

parameter klorofil-a sebagai parameter validasi hasil. Penelitian lanjutan dengan variasi waktu yang lebih panjang untuk memahami efek jangka panjang ekstrak kayu secang terhadap *Anabaena sp.*

DAFTAR PUSTAKA

- Abdul Rahim, Z., Lim, I., & Bakar, N. (2015). TRIZ Methodology for Applied Chemical Engineering: A Case Study of New Product Development. *Chemical Engineering Research and Design*, 103. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2015.08.027>
- Arenas, E., Rodríguez-Palacio, M. C., Juantorena, A. U., Santis-Espinosa, L. F., & Sebastián, P. J. (2016). Microalgae as a Potential Source for Biodiesel Production: Techniques, Methods, and Other Challenges. *International Journal of Energy Research*, 41(6), 761–789. <https://doi.org/10.1002/er.3663>
- Azim, N. H., Subki, A., & Yusof, Z. N. B. (2018). Abiotic Stresses Induce Total Phenolic, Total Flavonoid and Antioxidant Properties in Malaysian Indigenous Microalgae and Cyanobacterium. *Malaysian Journal of Microbiology*. <https://doi.org/10.21161/mjm.100317>
- Bennett, A., & Bogorad, L. (1973). Complementary Chromatic Adaptation in a Filamentous Blue-Green Alga. *The Journal of Cell Biology*, 58(2), 419–435. <https://doi.org/10.1083/jcb.58.2.419>
- Bosma, R., Spronsen, W. A. van, Tramper, J., & Wijffels, R. H. (2003). Ultrasound, a New Separation Technique to Harvest Microalgae. *Journal of Applied Phycology*, 15(2/3), 143–153. <https://doi.org/10.1023/a:1023807011027>
- Cameron, E. S., Krishna, A., Emelko, M. B., & Müller, K. M. (2024). Sporadic diurnal fluctuations of cyanobacterial populations in oligotrophic temperate systems can prevent accurate characterization of change and risk in aquatic systems. *Water Research*, 252, 121199. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.121199>
- Chang, S., Tang, Y., Dong, L., Zhan, Q., & Xu, W. (2018). Impacts of Sewer Deposits on the Urban River Sediment After Rainy Season and Bioremediation of Polluted Sediment. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(13), 12588–12599. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1457-9>
- Davidson, K., Gowen, R. J., Harrison, P. J., Fleming, L. E., Hoagland, P., & Moschonas, G. (2014). Anthropogenic Nutrients and Harmful Algae in Coastal Waters. *Journal of Environmental Management*, 146, 206–216. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.07.002>
- Febriyani, E., Falah, S., Andrianto, D., & Lastini, T. (2018). Identification of Active Compounds and Anti-Acne Activity From Extracts and Fractions of Surian (Toona Sinensis) Leaves Planted in Sumedang, West Java, Indonesia. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 19(4), 1406–1412. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d190429>
- Gill, S. S., & Tuteja, N. (2010). Reactive Oxygen Species and Antioxidant Machinery in Abiotic Stress Tolerance in Crop Plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 48(12), 909–930. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2010.08.016>
- He, Y., & Häder, D. P. (2002a). Involvement of Reactive Oxygen Species in the UV-B Damage to the Cyanobacterium *Anabaena Sp.* *Journal of Photochemistry and Photobiology B Biology*, 66(1), 73–80. [https://doi.org/10.1016/s1011-1344\(01\)00278-0](https://doi.org/10.1016/s1011-1344(01)00278-0)
- He, Y., & Häder, D. P. (2002b). UV-B-induced Formation of Reactive Oxygen Species and Oxidative Damage of the Cyanobacterium *Anabaena Sp.*: Protective Effects of Ascorbic Acid and N-Acetyl-L-Cysteine. *Journal of Photochemistry and*

- Photobiology B Biology*, 66(2), 115–124. [https://doi.org/10.1016/s1011-1344\(02\)00231-2](https://doi.org/10.1016/s1011-1344(02)00231-2)
- Hiltmann, K., Souchkov, V., Thurnes, C., Adunka, R., Koltze, K., Livotov, P., Mayer, O., & Müller, W. (2014). *Standard VDI 4521: Solving Inventive Problems with TRIZ (Status)* (pp. 247–254).
- Janse van Vuuren, S., Swanepoel, A., Preez, H., Schoeman, C., & Sundram, A. (2008). *Condensed Laboratory Methods for Monitoring Phytoplankton, including Cyanobacteria, in South African Freshwaters*.
- Klepacz-Smółka, A., Pietrzyk, D., Szeląg, R., Gluszczyk, P., Daroch, M., Tang, J., & Ledakowicz, S. (2020). Effect of Light Colour and Photoperiod on Biomass Growth and Phycocyanin Production by *Synechococcus* PCC 6715. *Bioresource Technology*, 313, 123700. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123700>
- Kumar, K. P., Mella-Herrera, R. A., & Golden, J. W. (2010). Cyanobacterial Heterocysts. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*, 2(4), a000315–a000315. <https://doi.org/10.1101/cshperspect.a000315>
- Latifi, A., Ruiz, M., & Zhang, C. (2009). Oxidative Stress in Cyanobacteria. *Fems Microbiology Reviews*, 33(2), 258–278. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.2008.00134.x>
- Lee, H., Kang, S. W., Byun, H. S., Jeon, J., Park, K. A., Kang, K. K., Seo, W., Won, M., Seok, J. H., Han, M. D., Shen, H., & Hur, G. M. (2015). Brazilin Limits Inflammatory Responses Through Induction of Prosurvival Autophagy in Rheumatoid Fibroblast-Like Synoviocytes. *Plos One*, 10(8), e0136122. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0136122>
- Lee, S. M., Kim, S.-M., & Lee, Y. H. (2012). Introduction of the M(i,j,k)BCP and Risk Assessment of Underground Limestone Mine. *Tunnel and Underground Space*, 22(6), 383–392. <https://doi.org/10.7474/tus.2012.22.6.383>
- Lourenço, S. O., Barbarino, E., Mancini-Filho, J., Schinke, K. P., & Aidar, E. (2002). Effects of Different Nitrogen Sources on the Growth and Biochemical Profile of 10 Marine Microalgae in Batch Culture: An Evaluation for Aquaculture. *Phycologia*, 41(2), 158–168. <https://doi.org/10.2216/i0031-8884-41-2-158.1>
- Matos, Â. P. (2017). The Impact of Microalgae in Food Science and Technology. *Journal of the American Oil Chemists Society*, 94(11), 1333–1350. <https://doi.org/10.1007/s11746-017-3050-7>
- Mur, L. R. (1983). Some Aspects of the Ecophysiology of Cyanobacteria. *Annales De L Institut Pasteur Microbiologie*, 134(1), 61–72. [https://doi.org/10.1016/s0769-2609\(83\)80097-0](https://doi.org/10.1016/s0769-2609(83)80097-0)
- Nirmal, N. P., Rajput, M. S., Prasad, R. G. S. V., & Ahmad, M. (2015). Brazilin From *Caesalpinia Sappan* Heartwood and Its Pharmacological Activities: A Review. *Asian Pacific Journal of Tropical Medicine*, 8(6), 421–430. <https://doi.org/10.1016/j.apjtm.2015.05.014>
- Paerl, H. W., & Otten, T. G. (2013). Harmful Cyanobacterial Blooms: Causes, Consequences, and Controls. *Microbial Ecology*, 65(4), 995–1010. <https://doi.org/10.1007/s00248-012-0159-y>
- Pan, G., Lyu, T., & Mortimer, R. J. G. (2018). Comment: Closing Phosphorus Cycle From Natural Waters: Re-Capturing Phosphorus Through an Integrated Water-Energy-Food Strategy. *Journal of Environmental Sciences*, 65, 375–376. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2018.02.018>
- Panda, B., Basu, B., Rajaram, H., & Apte, S. K. (2014). Methyl Viologen Responsive Proteome Dynamics Of *Anabaena* sp. Strain PCC7120. *Proteomics*, 14(16), 1895–1904. <https://doi.org/10.1002/pmic.201300522>

- Renault, F., Sancey, B., Badot, P.-M., & Crini, G. (2009). Chitosan for coagulation/flocculation processes – An eco-friendly approach. *European Polymer Journal*, 45(5), 1337–1348. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2008.12.027>
- Sazali, A., Adriadi, A., Yusuf, A., Maritsa, H., Siringo-ringo, A., & Kise, H. (2024). AKTIVITAS ANTIBAKTERI EKSTRAK KAYU SECANG (*Caesalpinia sappan* L.) TERHADAP BAKTERI *Edwardsiella tarda* DAN *Edwardsiella ictaluri* PATOGEN BUDIDAYA PERIKANAN. *Berita Biologi*, 23, 41–48. <https://doi.org/10.55981/beritabiologi.2024.2606>
- Schindler, D. W., Carpenter, S. R., Chapra, S. C., Hecky, R. E., & Orihel, D. M. (2016). Reducing Phosphorus to Curb Lake Eutrophication Is a Success. *Environmental Science & Technology*, 50(17), 8923–8929. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b02204>
- Silva, R., Gonçalves, T., Morone, J., Moreira, G. A., Morais, J., Hentschke, G. S., Álvarez-Gutiérrez, P. E., Batista-García, R. A., Vasconcelos, V., & Lopes, G. (2024). Pigments profile and antioxidant potential of extremophile cyanobacteria isolated from the Mexican Volcanic Lake Chichonal. *Algal Research*, 81, 103578. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2024.103578>
- Tewtrakul, S., Tungcharoen, P., Sudsai, T., Karalai, C., Ponglimanont, C., & Yodsaoue, O. (2015). Antiinflammatory and Wound Healing Effects of *Caesalpinia Sappan* L. *Phytotherapy Research*, 29(6), 850–856. <https://doi.org/10.1002/ptr.5321>
- Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R. L., & Polasky, S. (2002). Agricultural Sustainability and Intensive Production Practices. *Nature*, 418(6898), 671–677. <https://doi.org/10.1038/nature01014>
- Uduman, N., Qi, Y., Danquah, M. K., Forde, G. M., & Hoadley, A. (2010). Dewatering of Microalgal Cultures: A Major Bottleneck to Algae-Based Fuels. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2(1). <https://doi.org/10.1063/1.3294480>
- Wood, S. A., Hamilton, D. P., Paul, W. J., Safi, K. A., & Williamson, W. M. (2009). *New Zealand Guidelines for cyanobacteria in recreational fresh waters: Interim guidelines*.
- Xu, Z., Xiong, L., Li, H., Yin, H., Wu, J., Xu, J., & Zhang, J. (2017). Pollution Characterization and Source Analysis of the Wet Weather Discharges in Storm Drainages. *Desalination and Water Treatment*, 72, 169–181. <https://doi.org/10.5004/dwt.2017.20687>
- Zhang, P., Peng, C., Zhang, J., Zhang, J., Chen, J., & Zhao, H. (2022). Long-Term Harmful Algal Blooms and Nutrients Patterns Affected by Climate Change and Anthropogenic Pressures in the Zhanjiang Bay, China. *Frontiers in Marine Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.849819>