

Kinerja Pertumbuhan *Tetraselmis chuii* dan Hubungannya dengan Penyisihan COD, TSS, dan Kromium pada Berbagai Konsentrasi Limbah Cair Penyamakan Kulit

Ashfiyak Nur Hamid, Okik Hendriyanto Cahyonugroho*

Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur, Surabaya

*Koresponden email: okikhc@upnjatim.ac.id

Diterima: 16 Juli 2026

Disetujui: 21 Juli 2026

Abstract

Tannery wastewater contains high organic pollutant loads and heavy metals so it has the potential to pollute the environment. This study aims to analyze the relationship between the abundance of *Tetraselmis chuii* cells and the removal efficiency of Chemical Oxygen Demand (COD), Total Suspended Solids (TSS), and total chromium (Cr total) at various concentrations of tannery wastewater. The study used an experimental design with four variations of waste concentration, namely 20%, 50%, 75%, and 100%, for 21 days of cultivation. The parameters observed included the abundance of microalgae cells, COD concentration, TSS, and total Cr. The results showed that *Tetraselmis chuii* was able to grow at all variations of waste concentration, but the best growth was obtained at a waste concentration of 20% with a cell abundance reaching 20×10^6 cells/mL on the 14th day. The highest COD removal occurred at a waste concentration of 20%, namely from 1350.2 mg/L to 98.8 mg/L (92.68%), the highest TSS removal occurred at a waste concentration of 50%, namely from 180 mg/L to 26.67 mg/L (85.18%), while the highest total Cr removal occurred at a waste concentration of 20%, namely from 15 mg/L to 0.4 mg/L (97.33%). Correlation analysis shows that an increase in cell abundance is related to a decrease in pollutant concentration.

Keywords: *tetraselmis chuii*, tannery wastewater, bioremediation, total chromium

Abstrak

Limbah cair penyamakan kulit mengandung beban pencemar organik dan logam berat yang tinggi sehingga berpotensi mencemari lingkungan. Penelitian ini bertujuan menganalisis keterkaitan kelimpahan sel *Tetraselmis chuii* dengan efisiensi penyisihan *Chemical Oxygen Demand* (COD), *Total Suspended Solids* (TSS), dan total kromium (Cr total) pada berbagai konsentrasi limbah cair penyamakan kulit. Penelitian menggunakan rancangan eksperimental dengan empat variasi konsentrasi limbah, yaitu 20%, 50%, 75%, dan 100% selama 21 hari kultivasi. Parameter yang diamati meliputi kelimpahan sel mikroalga, konsentrasi COD, TSS, dan Cr total. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *Tetraselmis chuii* mampu tumbuh pada seluruh variasi konsentrasi limbah, namun pertumbuhan terbaik diperoleh pada konsentrasi limbah 20% dengan kelimpahan sel mencapai 20×10^6 sel/mL pada hari ke-14. Penyisihan COD tertinggi terjadi pada konsentrasi limbah 20%, yaitu dari 1350,2 mg/L menjadi 98,8 mg/L (92,68%), penyisihan TSS tertinggi terjadi pada konsentrasi limbah 50%, yaitu dari 180 mg/L menjadi 26,67 mg/L (85,18%), sedangkan penyisihan Cr total tertinggi terjadi pada konsentrasi limbah 20%, yaitu dari 15 mg/L menjadi 0,4 mg/L (97,33%). Analisis korelasi menunjukkan bahwa peningkatan kelimpahan sel berkaitan dengan penurunan konsentrasi pencemar.

Kata Kunci: *tetraselmis chuii*, limbah cair penyamakan kulit, bioremediasi, total kromium

1. Pendahuluan

Industri penyamakan kulit merupakan salah satu sektor industri yang berperan penting dalam memenuhi kebutuhan bahan baku produk kulit. Namun, proses produksi pada industri ini menghasilkan limbah cair dengan karakteristik yang kompleks dan mengandung beban pencemar tinggi. Limbah cair penyamakan kulit umumnya mengandung bahan organik, padatan tersuspensi, garam, sulfida, serta logam berat, terutama kromium (Cr), yang berasal dari proses penyamakan menggunakan garam kromium. Apabila limbah tersebut dibuang ke lingkungan tanpa pengolahan yang memadai, maka dapat menurunkan kualitas badan air, mengganggu keseimbangan ekosistem perairan, serta menimbulkan risiko toksisitas terhadap organisme akuatik dan kesehatan manusia (Sbihi et al., 2024)

Parameter pencemar yang umum digunakan untuk mengevaluasi kualitas limbah cair penyamakan kulit meliputi *Chemical Oxygen Demand* (COD), *Total Suspended Solids* (TSS) dan total kromium (Cr

total). COD menggambarkan jumlah oksigen yang dibutuhkan untuk mengoksidasi senyawa organik maupun anorganik yang mudah teroksidasi di dalam air. Nilai COD yang tinggi menunjukkan tingginya kandungan bahan organik yang berpotensi menurunkan kadar oksigen terlarut di perairan. Sementara itu, TSS menunjukkan jumlah padatan tersuspensi yang dapat menghambat penetrasi cahaya, meningkatkan kekeruhan, serta mengganggu proses fotosintesis organisme perairan. Di sisi lain, kromium merupakan salah satu logam berat utama dalam limbah penyamakan kulit yang bersifat toksik, persisten, dan berpotensi terakumulasi dalam rantai makanan sehingga memerlukan penanganan yang efektif sebelum limbah dibuang ke lingkungan. Berbagai teknologi telah diterapkan untuk mengolah limbah cair penyamakan kulit, seperti koagulasi-flokulasi, presipitasi kimia, adsorpsi, filtrasi membran, dan proses oksidasi lanjut. Meskipun mampu menurunkan konsentrasi pencemar, metode-metode tersebut umumnya memerlukan biaya operasional yang tinggi, penggunaan bahan kimia dalam jumlah besar, serta menghasilkan lumpur residu yang masih memerlukan pengolahan lanjutan. Oleh karena itu, pengembangan teknologi pengolahan limbah yang lebih ramah lingkungan, berkelanjutan, dan ekonomis menjadi salah satu alternatif yang terus dikembangkan, salah satunya melalui pemanfaatan mikroalga sebagai agen bioremediasi (Almeida, 2023).

Mikroalga merupakan mikroorganisme fotosintetik yang mampu memanfaatkan karbon dioksida, cahaya, serta nutrisi dalam air untuk mendukung pertumbuhannya. Selain menghasilkan biomassa, mikroalga juga memiliki kemampuan menyisihkan berbagai jenis pencemar melalui beberapa mekanisme, antara lain asimilasi senyawa organik dan nutrisi ke dalam biomassa sel, biosorpsi logam berat pada permukaan dinding sel, bioakumulasi logam di dalam sel, serta bioflokulasi yang membantu pengendapan padatan tersuspensi. Kemampuan tersebut menjadikan mikroalga sebagai salah satu agen bioremediasi yang potensial untuk meningkatkan kualitas limbah cair sekaligus mengurangi dampak pencemaran lingkungan (Tetraselmis, 2024).

Salah satu mikroalga yang berpotensi dimanfaatkan dalam pengolahan limbah adalah *Tetraselmis chuii*. Mikroalga hijau laut ini memiliki laju pertumbuhan yang relatif cepat, toleran terhadap perubahan kondisi lingkungan, serta mampu menghasilkan biomassa dan senyawa ekstraseluler yang berperan dalam proses penyisihan polutan. Beberapa penelitian melaporkan bahwa *Tetraselmis chuii* mampu menurunkan konsentrasi bahan organik maupun logam berat melalui kombinasi mekanisme asimilasi, biosorpsi sehingga berpotensi diaplikasikan sebagai agen bioremediasi pada berbagai jenis limbah cair (Xie & Zhao, 2025).

2. Metode Penelitian

2.1 Rancangan penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen untuk mengevaluasi kemampuan mikroalga *Tetraselmis chuii* dalam menyisihkan *Chemical Oxygen Demand* (COD), *Total Suspended Solids* (TSS), dan total kromium (Cr) pada limbah cair penyamakan kulit. Penelitian dilakukan dengan empat variasi konsentrasi limbah, yaitu 20%, 50%, 75%, dan 100%, selama 21 hari masa kultivasi. Rancangan penelitian bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi konsentrasi limbah terhadap pertumbuhan mikroalga serta efektivitas penyisihan parameter pencemar. Penelitian dilakukan menggunakan empat reaktor aerasi dengan volume kerja masing-masing 5 L. Setiap reaktor diisi kultur *Tetraselmis chuii* dan limbah cair penyamakan kulit dengan variasi konsentrasi 20%, 50%, 75%, dan 100%. Seluruh reaktor diaerasi secara kontinu menggunakan sistem aerasi sebesar 1 VVM selama 21 hari untuk menjaga kondisi aerob, meningkatkan pencampuran media, dan mempertahankan mikroalga tetap tersuspensi selama proses bioremediasi berlangsung.

2.2 Bahan penelitian

Bahan utama yang digunakan meliputi limbah cair penyamakan kulit yang diperoleh dari salah satu industri penyamakan kulit skala UMKM di Kabupaten Nganjuk, Jawa Timur, serta mikroalga *Tetraselmis chuii* yang diperoleh dari Balai Perikanan Budidaya Air Payau (BPBAP) Situbondo. Media kultur menggunakan pupuk Walne sebagai sumber nutrisi dan air laut dengan salinitas 20–30 ppt sebagai media pertumbuhan mikroalga. Sebelum digunakan, limbah cair terlebih dahulu dilakukan pra-perlakuan (*pretreatment*) berupa penyaringan untuk menghilangkan padatan berukuran besar dan penyesuaian salinitas agar sesuai dengan kondisi optimum pertumbuhan *Tetraselmis chuii*.

2.3 Seeding Mikroalga

Tahap seeding dilakukan untuk memperoleh kultur *Tetraselmis chuii* yang aktif dan berada pada kondisi fisiologis optimum sebelum digunakan dalam penelitian utama. Kultur mikroalga diperoleh dari Balai Perikanan Budidaya Air Payau (BPBAP) Situbondo, kemudian dikembangkan menggunakan media

air laut bersalinitas 20–30 ppt yang diperkaya dengan pupuk Walne sebagai sumber nutrisi. Kultur dipelihara dalam wadah kultur yang dilengkapi sistem aerasi kontinu untuk menjaga homogenitas media, meningkatkan ketersediaan karbon dioksida, serta mencegah pengendapan sel. Selama proses seeding, kultur ditempatkan pada kondisi laboratorium dengan pencahayaan yang mendukung proses fotosintesis hingga mencapai fase eksponensial pertumbuhan. Tahap ini bertujuan memperoleh biomassa mikroalga dengan viabilitas tinggi sehingga memiliki kemampuan metabolisme yang optimal ketika diaplikasikan sebagai agen bioremediasi. Kultur yang telah mencapai fase eksponensial ditandai dengan peningkatan kelimpahan sel yang stabil dan warna kultur yang semakin hijau, sehingga siap digunakan pada tahap aklimatisasi (Marques et al., 2025).

2.4 Aklimatisasi Mikroalga

Aklimatisasi dilakukan untuk meningkatkan kemampuan adaptasi *Tetraselmis chuii* terhadap karakteristik limbah cair penyamakan kulit yang mengandung bahan organik, padatan tersuspensi, garam, serta logam berat kromium. Tahap ini dilakukan secara bertahap dengan menambahkan limbah cair hasil pra-perlakuan ke dalam media kultur mikroalga sehingga perubahan kondisi lingkungan tidak terjadi secara mendadak. Proses adaptasi bertujuan mengurangi risiko stres fisiologis yang dapat menghambat aktivitas fotosintesis, pertumbuhan sel, maupun produksi metabolit ekstraseluler. Selama proses aklimatisasi, kultur tetap diberikan aerasi secara kontinu untuk mempertahankan kondisi aerob dan menjaga distribusi nutrisi tetap merata di dalam media. Keberhasilan aklimatisasi diamati melalui perubahan warna kultur, tidak adanya penurunan kelimpahan sel secara drastis, serta kemampuan mikroalga mempertahankan pertumbuhan setelah terpapar limbah. Mikroalga yang berhasil melewati tahap aklimatisasi diharapkan memiliki toleransi yang lebih baik terhadap senyawa pencemar sehingga mampu menjalankan mekanisme asimilasi bahan organik, biosorpsi logam berat, dan bioflokulasi secara lebih efektif selama penelitian utama. (Muria et al., 2023)

2.5 Kultivasi Mikroalga

Tahap kultivasi merupakan penelitian utama yang dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan *Tetraselmis chuii* dalam menyisihkan COD, TSS, dan total kromium pada limbah cair penyamakan kulit. Kultivasi dilakukan menggunakan empat reaktor dengan volume kerja masing-masing 5 L yang berisi kultur mikroalga dan limbah cair pada variasi konsentrasi 20%, 50%, 75%, dan 100%. Seluruh reaktor diaerasi secara kontinu selama 21 hari untuk menjaga suplai oksigen, meningkatkan pencampuran media, mempertahankan sel tetap tersuspensi, serta mendukung proses fotosintesis dan metabolisme mikroalga. Pengamatan dilakukan secara berkala untuk mengetahui perubahan kelimpahan sel serta efisiensi penyisihan parameter pencemar (Rafay et al., 2020). Analisis COD dan TSS dilakukan pada hari ke-0, 3, 7, 14, dan 21, sedangkan konsentrasi total kromium dianalisis pada awal dan akhir kultivasi. Selain itu, produksi Extracellular Polymeric Substances (EPS) dianalisis pada akhir periode kultivasi untuk mengevaluasi perannya dalam proses biosorpsi dan bioflokulasi. Selama kultivasi berlangsung, mikroalga memanfaatkan senyawa organik sebagai sumber nutrisi, menghasilkan biomassa melalui proses fotosintesis, serta berinteraksi dengan partikel tersuspensi dan ion logam berat melalui mekanisme asimilasi, biosorpsi, bioakumulasi, dan pembentukan flok. Dengan demikian, proses kultivasi tidak hanya bertujuan meningkatkan pertumbuhan mikroalga, tetapi juga mengevaluasi efektivitasnya sebagai agen bioremediasi limbah cair penyamakan kulit pada berbagai tingkat konsentrasi limbah (Lead & Compound, 2024).

2.6 Kultivasi Mikroalga

Kelimpahan sel *Tetraselmis chuii* diamati secara berkala selama periode kultivasi untuk mengevaluasi pola pertumbuhan mikroalga pada setiap variasi konsentrasi limbah cair penyamakan kulit. Pengamatan dilakukan pada setiap waktu pengambilan sampel untuk mengetahui respons pertumbuhan mikroalga terhadap perubahan kondisi media selama proses bioremediasi berlangsung. Sebelum dilakukan penghitungan, kultur mikroalga dihomogenkan secara perlahan menggunakan pengaduk steril agar distribusi sel dalam media menjadi merata dan tidak terjadi pengendapan biomassa yang dapat memengaruhi hasil pengamatan. Sampel kultur kemudian diambil menggunakan mikropipet sebanyak 10 μ L dan dimasukkan ke dalam ruang hitung *haemocytometer Neubauer Improved* yang telah dipasang kaca penutup (*cover glass*). Pengamatan dilakukan menggunakan mikroskop cahaya pada perbesaran yang sesuai hingga sel *Tetraselmis chuii* dapat diamati dengan jelas.

Perhitungan jumlah sel dilakukan pada lima kotak besar *haemocytometer* sesuai prosedur standar. Sel yang berada tepat pada garis batas atas dan kiri dihitung sebagai bagian dari kotak, sedangkan sel yang

berada pada garis batas bawah dan kanan tidak dihitung untuk menghindari terjadinya penghitungan ganda. Apabila kepadatan sel terlalu tinggi sehingga menyulitkan proses pengamatan, sampel terlebih dahulu diencerkan menggunakan air laut steril, kemudian hasil perhitungan dikalikan dengan faktor pengenceran. Setiap sampel diamati sebanyak tiga kali pengulangan, kemudian hasil pengamatan dirata-ratakan untuk memperoleh nilai kelimpahan sel yang lebih representatif serta meminimalkan kesalahan penghitungan akibat variasi distribusi sel di dalam media kultur (Borisova et al., 2025).

Kelimpahan sel dihitung berdasarkan jumlah sel yang teramat pada ruang hitung *haemocytometer* dengan memperhitungkan faktor pengenceran sesuai Persamaan (1).

$$N = \frac{N}{5} \times 10^4$$

dengan:

N = Jumlah sel yang terhitung;

FP = Faktor pengenceran;

n = Jumlah kotak besar yang diamati;

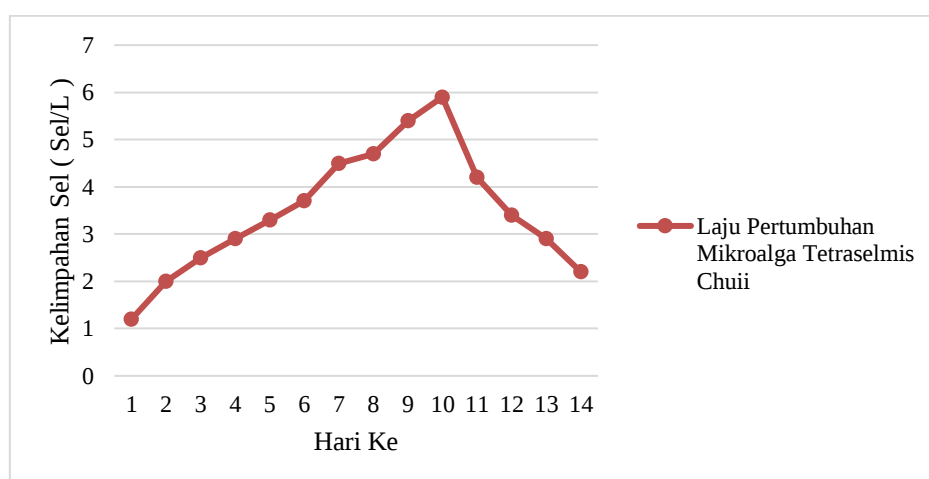
10⁴ = Faktor konversi volume ruang hitung *haemocytometer* menjadi satuan mL.

Data kelimpahan sel yang diperoleh selanjutnya digunakan untuk menyusun kurva pertumbuhan *Tetraselmis chuii* sehingga dapat diidentifikasi fase lag, fase eksponensial, fase stasioner, dan fase penurunan selama masa kultivasi. Selain digunakan untuk mengevaluasi dinamika pertumbuhan mikroalga, data tersebut juga menjadi parameter biologis utama dalam penelitian ini untuk menjelaskan hubungan antara pertumbuhan *Tetraselmis chuii* dengan kemampuan penyisihan COD, TSS, dan total kromium (Cr). Peningkatan kelimpahan sel mengindikasikan semakin aktifnya proses fotosintesis dan metabolisme sel yang berperan dalam pemanfaatan bahan organik, pembentukan biomassa, produksi *Extracellular Polymeric Substances* (EPS), serta mekanisme biosorpsi dan bioflokulasi (Marey et al., 2025).

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Proses pembiakan Mikroalga

Pada penelitian ini, proses seeding dilakukan sebagai tahap awal untuk memperoleh kultur *Tetraselmis chuii* yang memiliki kepadatan sel tinggi dan kondisi fisiologis yang optimum sebelum digunakan pada tahap aklimatisasi dan kultivasi limbah cair penyamakan kulit. Seeding dilakukan selama 14 hari menggunakan media air laut bersalinitas 20–30 ppt yang diperkaya dengan pupuk Walne sebagai sumber nutrisi. Selama proses kultur, mikroalga diaerasi secara kontinu untuk menjaga homogenitas media, meningkatkan ketersediaan karbon dioksida bagi proses fotosintesis, serta mencegah pengendapan sel sehingga pertumbuhan mikroalga dapat berlangsung secara optimal (Hadiyanto & Azim, 2016).



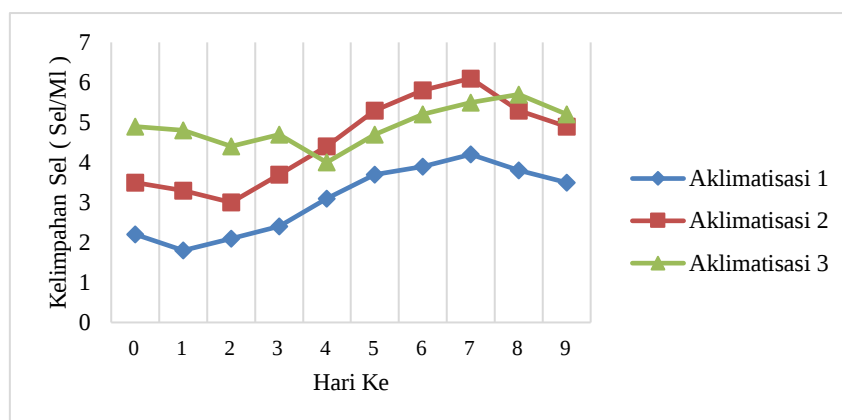
Gambar 1. Laju Pertumbuhan Mikroalga *Tetraselmis chuii* saat seeding

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa *Tetraselmis chuii* mampu tumbuh dengan baik selama proses seeding. Berdasarkan **Gambar 1**, kelimpahan sel meningkat secara bertahap dari sekitar $1,2 \times 10^6$ sel/mL pada hari pertama menjadi $5,9 \times 10^6$ sel/mL pada hari ke-10. Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa kondisi media kultur dan ketersediaan nutrisi mampu mendukung aktivitas metabolisme dan pembelahan

sel mikroalga. Pada awal kultivasi (hari ke-1 hingga hari ke-3), peningkatan kelimpahan sel masih berlangsung relatif lambat karena mikroalga berada pada fase adaptasi terhadap lingkungan kultur. Selanjutnya, mulai hari ke-4 hingga hari ke-10 terjadi peningkatan jumlah sel yang lebih cepat, menandakan bahwa mikroalga telah memasuki fase eksponensial dengan laju pertumbuhan yang tinggi (Hamidah et al., 2023).

3.2 Aklimatisasi Mikroalga

Pada penelitian ini, proses aklimatisasi dilakukan untuk meningkatkan kemampuan adaptasi *Tetraselmis chuii* terhadap limbah cair penyamakan kulit sebelum diaplikasikan pada tahap kultivasi. Aklimatisasi dilakukan secara bertahap selama 9 hari dengan meningkatkan proporsi limbah dalam media kultur secara bertahap, sehingga mikroalga dapat menyesuaikan diri terhadap perubahan kondisi lingkungan, terutama tingginya kandungan bahan organik, padatan tersuspensi, serta logam berat kromium (Cr). Keberhasilan proses aklimatisasi dievaluasi berdasarkan perubahan kelimpahan sel selama masa adaptasi, sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 2**.



Gambar 2. Laju Pertumbuhan Mikroalga *Tetraselmis chuii* saat Aklimatisasi

Berdasarkan **Gambar 2**, ketiga tahap aklimatisasi menunjukkan pola pertumbuhan yang berbeda. Pada aklimatisasi 1, kelimpahan sel mengalami penurunan dari sekitar $2,2 \times 10^6$ sel/mL pada hari ke-0 menjadi $1,8 \times 10^6$ sel/mL pada hari ke-1, kemudian meningkat secara bertahap hingga mencapai puncak sekitar $4,2 \times 10^6$ sel/mL pada hari ke-7 sebelum kembali menurun pada hari ke-8 dan ke-9. Penurunan pada awal aklimatisasi menunjukkan bahwa mikroalga mengalami stres akibat perubahan media kultur, sedangkan peningkatan pada hari-hari berikutnya mengindikasikan bahwa *Tetraselmis chuii* telah berhasil menyesuaikan aktivitas fisiologis dan metabolisme terhadap kondisi limbah.

Pola serupa juga terlihat pada aklimatisasi 2. Kelimpahan sel awal sebesar $3,5 \times 10^6$ sel/mL sempat menurun hingga sekitar $3,0 \times 10^6$ sel/mL pada hari ke-2, kemudian meningkat secara signifikan dan mencapai nilai maksimum sekitar $6,1 \times 10^6$ sel/mL pada hari ke-7. Setelah mencapai puncak pertumbuhan, kelimpahan sel kembali mengalami penurunan hingga hari ke-9. Peningkatan kelimpahan sel yang lebih tinggi dibandingkan aklimatisasi pertama menunjukkan bahwa mikroalga telah memiliki tingkat toleransi yang lebih baik terhadap kondisi limbah setelah melalui proses adaptasi sebelumnya.

Sementara itu, pada aklimatisasi 3, kelimpahan sel relatif stabil dengan nilai awal sekitar $4,9 \times 10^6$ sel/mL. Meskipun terjadi sedikit penurunan pada hari ke-2 hingga hari ke-4, kelimpahan sel kembali meningkat dan mencapai sekitar $5,7 \times 10^6$ sel/mL pada hari ke-8 sebelum mengalami penurunan ringan pada hari ke-9. Stabilitasnya pertumbuhan selama aklimatisasi ketiga menunjukkan bahwa *Tetraselmis chuii* telah mampu beradaptasi dengan kondisi limbah dan mempertahankan aktivitas metabolisme meskipun berada pada lingkungan dengan tekanan pencemar yang lebih tinggi.

Secara keseluruhan, hasil aklimatisasi menunjukkan bahwa *Tetraselmis chuii* mampu beradaptasi terhadap limbah cair penyamakan kulit secara bertahap. Penurunan kelimpahan sel pada awal setiap tahap aklimatisasi merupakan respons fisiologis terhadap perubahan kondisi media, sedangkan peningkatan kelimpahan sel pada hari-hari berikutnya menunjukkan bahwa mikroalga berhasil melakukan penyesuaian metabolisme dan melanjutkan pertumbuhannya. Keberhasilan proses aklimatisasi ini mengindikasikan bahwa kultur telah memiliki tingkat toleransi yang memadai terhadap limbah cair penyamakan kulit, sehingga siap digunakan pada tahap kultivasi untuk mengevaluasi kemampuan *Tetraselmis chuii* dalam menyisihkan COD, TSS, dan total kromium (Cr) (Cahyonugroho, 2023).

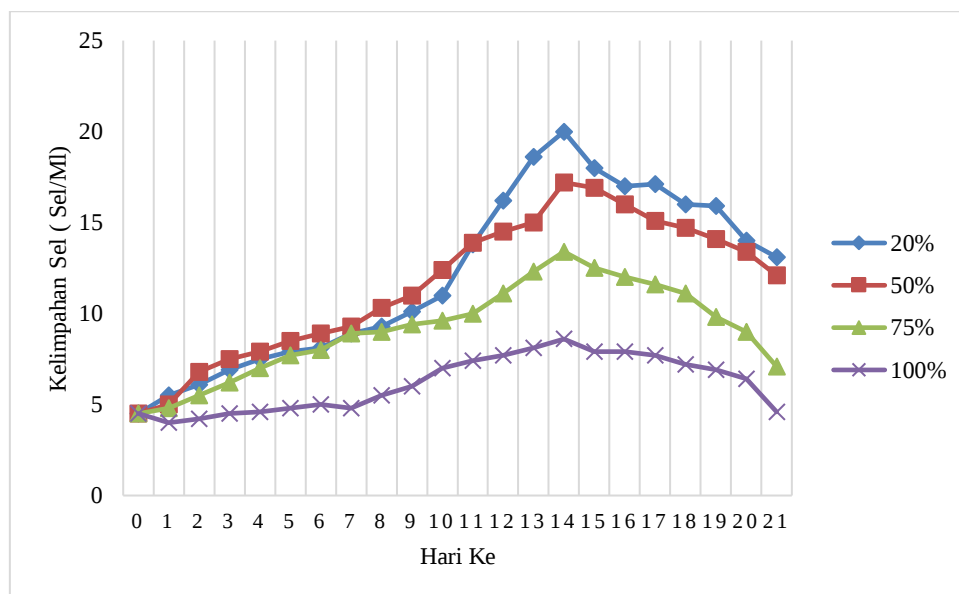
3.3 Pertumbuhan Mikroalga Dalam Berbagai Konsentrasi Limbah

Berdasarkan data pada **Tabel 1** terlihat bahwa jumlah sel mikroalga mengalami perubahan pada setiap konsentrasi limbah seiring bertambahnya waktu. Untuk memperjelas pola pertumbuhan tersebut, data disajikan dalam bentuk grafik pada **Gambar 3**.

Tabel 1. Laju Pertumbuhan Mikroalga *Tetraselmis chuii*

Pengamatan Kelimpahan Sel <i>Tetraselmis Chuii</i>		
Hari	Kelimpahan Sel	Satuan
1	$1,2 \times 10^4$	Sel/mL
2	2×10^4	Sel/mL
3	$2,5 \times 10^4$	Sel/mL
4	$2,9 \times 10^4$	Sel/mL
5	$3,3 \times 10^4$	Sel/mL
6	$3,7 \times 10^4$	Sel/mL
7	$4,5 \times 10^4$	Sel/mL
8	$4,7 \times 10^4$	Sel/mL
9	$5,4 \times 10^4$	Sel/mL
10	$5,9 \times 10^4$	Sel/mL
11	$4,2 \times 10^4$	Sel/mL
12	$3,4 \times 10^4$	Sel/mL
13	$2,9 \times 10^4$	Sel/mL
14	$2,2 \times 10^4$	Sel/mL

Sumber : Data Penelitian



Gambar 3. Laju Pertumbuhan Mikroalga *Tetraselmis chuii*

Berdasarkan **Tabel 1**, kelimpahan sel *Tetraselmis chuii* mengalami perubahan selama periode kultivasi pada seluruh variasi konsentrasi limbah cair penyamakan kulit. Perubahan jumlah sel yang diamati menunjukkan adanya respons pertumbuhan mikroalga terhadap kondisi media yang mengandung bahan organik, padatan tersuspensi, dan logam berat kromium. Secara umum, pola pertumbuhan yang terbentuk mengikuti fase pertumbuhan mikroalga, yaitu fase adaptasi (lag), fase eksponensial (log), fase stasioner, dan fase penurunan (*decline*) (Muria et al., 2023).

Pada hari ke-0 hingga hari ke-3, kelimpahan sel cenderung mengalami peningkatan yang relatif lambat. Kondisi ini menunjukkan bahwa *Tetraselmis chuii* masih berada pada fase adaptasi terhadap lingkungan baru yang mengandung berbagai senyawa pencemar dari limbah cair penyamakan kulit. Pada fase ini, mikroalga melakukan penyesuaian fisiologis terhadap kondisi media, termasuk konsentrasi bahan

organik, salinitas, dan keberadaan logam berat kromium. Proses adaptasi tersebut menyebabkan laju pembelahan sel belum berlangsung secara optimal (Lead & Compound, 2024).

Memasuki hari ke-7 hingga hari ke-14, kelimpahan sel menunjukkan peningkatan yang lebih signifikan pada seluruh perlakuan. Peningkatan ini mengindikasikan bahwa mikroalga telah berhasil beradaptasi dengan kondisi media sehingga proses fotosintesis dan pembelahan sel berlangsung lebih aktif. Pada fase ini, nutrisi yang tersedia dalam limbah masih mencukupi untuk mendukung pertumbuhan mikroalga. Selain itu, kandungan bahan organik dalam limbah dapat dimanfaatkan sebagai sumber nutrisi tambahan sehingga jumlah sel terus meningkat. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa *Tetraselmis chuii* memiliki kemampuan toleransi terhadap limbah cair penyamakan kulit hingga konsentrasi tertentu.

Puncak pertumbuhan umumnya terjadi pada pertengahan hingga akhir masa kultivasi yang ditandai dengan nilai kelimpahan sel tertinggi pada masing-masing perlakuan. Namun, besarnya peningkatan kelimpahan sel berbeda pada setiap konsentrasi limbah. Perlakuan dengan konsentrasi limbah yang lebih rendah menghasilkan jumlah sel yang lebih tinggi dibandingkan perlakuan dengan konsentrasi limbah yang lebih tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi limbah dapat memberikan tekanan lingkungan yang lebih besar terhadap pertumbuhan mikroalga akibat meningkatnya kandungan bahan pencemar dan logam berat dalam media kultivasi (Prasetyo et al., 2022).

Pada akhir periode pengamatan, kelimpahan sel mulai mengalami penurunan yang menunjukkan bahwa kultur memasuki fase stasioner dan fase kematian. Penurunan jumlah sel dapat disebabkan oleh berkurangnya ketersediaan nutrisi, meningkatnya kompetisi antar sel, serta akumulasi senyawa metabolit dalam media. Selain itu, paparan logam berat dalam jangka waktu yang lebih lama juga dapat menyebabkan stres fisiologis yang memengaruhi viabilitas sel mikroalga. Kondisi serupa juga dilaporkan oleh Urbina-Suarez et al. yang menunjukkan bahwa pertumbuhan *Tetraselmis chuii* pada media limbah mengalami penurunan setelah mencapai fase pertumbuhan maksimum akibat keterbatasan nutrisi dan meningkatnya tekanan lingkungan (Suwarsono et al., 2024).

Secara umum, hasil pengamatan menunjukkan bahwa *Tetraselmis chuii* mampu tumbuh pada seluruh variasi konsentrasi limbah cair penyamakan kulit. Meskipun demikian, pertumbuhan yang lebih baik diperoleh pada konsentrasi limbah yang lebih rendah, yang menunjukkan bahwa kondisi media masih berada dalam rentang toleransi optimum bagi mikroalga untuk melakukan aktivitas metabolisme dan pembelahan sel. Pertumbuhan *Tetraselmis chuii* pada konsentrasi limbah tertentu diduga dipengaruhi oleh ketersediaan nutrisi dan bahan organik yang masih dapat dimanfaatkan untuk metabolisme sel (Jannah et al., 2023).

3.4 Penurunan Konsentrasi COD

Chemical Oxygen Demand (COD) merupakan salah satu parameter penting yang digunakan untuk menggambarkan jumlah oksigen yang dibutuhkan untuk mengoksidasi senyawa organik yang terdapat dalam limbah. Tingginya nilai COD menunjukkan tingginya kandungan bahan organik yang berpotensi menurunkan kualitas perairan apabila dibuang langsung ke lingkungan. Dalam penelitian ini, pengukuran COD dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan *Tetraselmis chuii* dalam menyisihkan bahan organik pada limbah cair penyamakan kulit melalui proses aerasi dan bioflokulasi selama 21 hari kultivasi (Fitria et al., 2023).

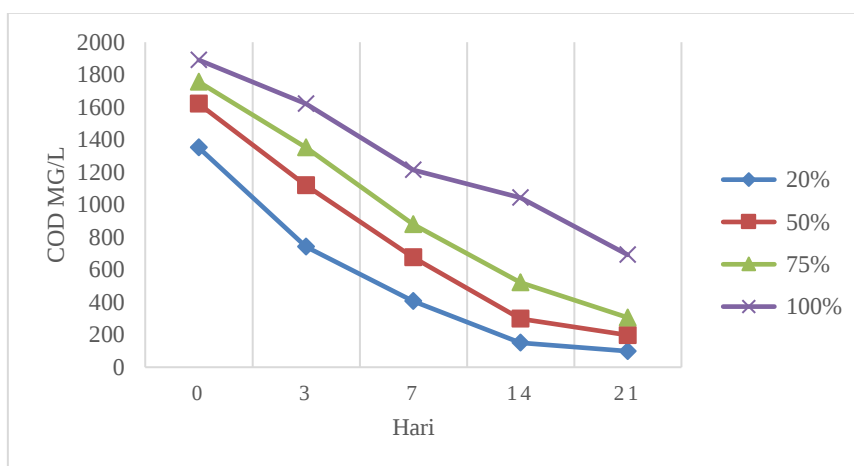
Konsentrasi COD diukur pada hari ke-0, 3, 7, 14, dan 21. Nilai pada hari ke-0 merupakan konsentrasi awal sebelum proses kultivasi dimulai, sedangkan nilai pada pengamatan berikutnya menunjukkan perubahan konsentrasi COD selama proses kultivasi berlangsung. Hasil pengukuran konsentrasi COD pada masing-masing perlakuan disajikan pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Pengukuran Konsentrasi Parameter COD

Hari	Konsentrasi Limbah (mg/L)			
	20%	50%	75%	100%
0	1350,2	1620,3	1755,3	1890,3
3	742,6	1118,9	1350,2	1620,3
7	405,1	675,1	877,6	1215,2
14	149,2	298,4	522,1	1044,3
21	98,8	197,5	305,5	691,4

Sumber : Data Penelitian, 2026

Hasil penelitian menunjukkan bahwa *Tetraselmis chuii* mampu menurunkan konsentrasi *Chemical Oxygen Demand* (COD) pada seluruh variasi konsentrasi limbah cair penyamakan kulit selama 21 hari masa kultivasi. Penurunan konsentrasi COD terjadi secara bertahap pada setiap waktu pengamatan, meskipun besarnya penyisihan berbeda pada masing-masing konsentrasi limbah. Secara umum, semakin rendah konsentrasi limbah yang digunakan, semakin besar penurunan COD yang diperoleh. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan beban organik pada konsentrasi limbah yang lebih tinggi dapat memengaruhi aktivitas metabolisme dan kemampuan mikroalga dalam memanfaatkan senyawa organik sebagai sumber nutrisi.



Gambar 4. Laju konsentrasi COD limbah menurut hari

Pada konsentrasi limbah 20%, konsentrasi COD mengalami penurunan dari 1.350,2 mg/L pada hari ke-0 menjadi 742,6 mg/L pada hari ke-3, kemudian terus menurun menjadi 405,1 mg/L pada hari ke-7, 149,2 mg/L pada hari ke-14, dan mencapai 98,8 mg/L pada hari ke-21. Pola penurunan yang relatif cepat menunjukkan bahwa kondisi media masih berada dalam kisaran optimum bagi pertumbuhan *Tetraselmis chuii*, sehingga proses asimilasi senyawa organik dan aktivitas metabolisme berlangsung secara efektif.

Pada konsentrasi limbah 50%, nilai COD juga mengalami penurunan secara bertahap dari 1.620,3 mg/L menjadi 1.118,9 mg/L pada hari ke-3, 675,1 mg/L pada hari ke-7, 298,4 mg/L pada hari ke-14, dan 197,5 mg/L pada hari ke-21. Meskipun penyisihan berlangsung secara konsisten, laju penurunan lebih rendah dibandingkan konsentrasi 20%, yang mengindikasikan bahwa peningkatan kandungan bahan organik mulai memberikan tekanan terhadap aktivitas pertumbuhan dan metabolisme mikroalga.

Pada konsentrasi limbah 75%, konsentrasi COD berkurang dari 1.755,3 mg/L pada awal penelitian menjadi 1.350,2 mg/L, 877,6 mg/L, 522,1 mg/L, dan 305,5 mg/L masing-masing pada hari ke-3, ke-7, ke-14, dan ke-21. Sementara itu, pada konsentrasi limbah 100%, penurunan COD terjadi dari 1.890,3 mg/L menjadi 1.620,3 mg/L pada hari ke-3, 1.215,2 mg/L pada hari ke-7, 1.044,3 mg/L pada hari ke-14, dan mencapai 691,4 mg/L pada hari ke-21. Penurunan yang lebih lambat pada kedua konsentrasi tersebut menunjukkan bahwa semakin tingginya beban organik menyebabkan mikroalga memerlukan waktu adaptasi yang lebih lama dan aktivitas penyisihan menjadi kurang optimal.

Secara keseluruhan, seluruh variasi konsentrasi limbah menunjukkan tren penurunan COD selama masa kultivasi. Namun, konsentrasi limbah 20% menghasilkan penyisihan COD yang paling tinggi, sedangkan konsentrasi 100% menunjukkan penyisihan paling rendah. Hasil ini mengindikasikan bahwa efektivitas *Tetraselmis chuii* dalam menurunkan COD dipengaruhi oleh besarnya beban organik dalam media, di mana konsentrasi limbah yang lebih rendah memberikan kondisi yang lebih mendukung bagi pertumbuhan mikroalga dan proses bioremediasi. Selanjutnya, mekanisme penyisihan COD pada masing-masing konsentrasi dibahas secara lebih rinci pada subbab berikutnya.

3.5 Penurunan Konsentrasi Total Suspended Solids (TSS)

Total Suspended Solids (TSS) merupakan parameter yang menunjukkan jumlah padatan tersuspensi yang terdapat dalam limbah cair. Keberadaan TSS yang tinggi dapat menyebabkan peningkatan kekeruhan, menghambat penetrasi cahaya ke dalam perairan, serta menurunkan kualitas lingkungan perairan. Dalam penelitian ini, pengukuran TSS dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan *Tetraselmis chuii* dalam menyisihkan partikel tersuspensi melalui mekanisme bioflokulasi selama proses kultivasi pada limbah cair penyamakan kulit.

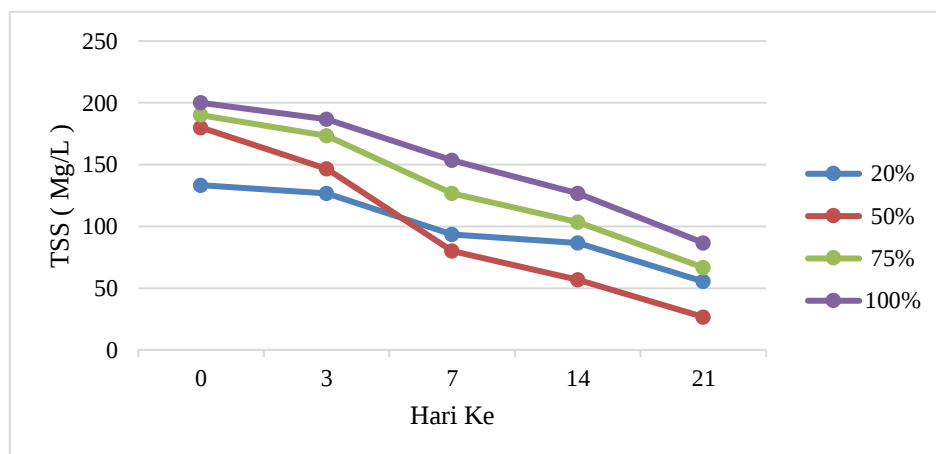
Perubahan konsentrasi TSS diamati pada setiap perlakuan konsentrasi limbah, yaitu 20%, 50%, 75%, dan 100% selama 21 hari pengamatan. Pengukuran dilakukan secara berkala untuk mengetahui efektivitas penyisihan padatan tersuspensi yang terjadi selama proses kultivasi. Hasil pengukuran konsentrasi TSS dan persentase penyisihannya pada masing-masing perlakuan disajikan pada Tabel

Tabel 3. Pengukuran Konsentrasi Parameter TSS

Hari	Konsentrasi Limbah (mg/L)			
	20%	50%	75%	100%
0	133,33	180	190	200
3	126,67	146,67	173,3	186,7
7	93,33	80	126,7	153,3
14	86,67	56,67	103,3	126,7
21	55,33	26,67	66,7	86,67

Sumber : Data Penelitian, 2026

Hasil penelitian menunjukkan bahwa *Tetraselmis chuii* mampu menurunkan konsentrasi *Total Suspended Solids* (TSS) pada seluruh variasi konsentrasi limbah cair penyamakan kulit selama 21 hari kultivasi. Penurunan konsentrasi TSS terjadi secara bertahap pada setiap waktu pengamatan, meskipun laju penyisihannya berbeda pada masing-masing konsentrasi limbah. Secara umum, semakin rendah konsentrasi limbah yang digunakan, semakin besar kemampuan mikroalga dalam menurunkan kadar TSS. Sebaliknya, peningkatan konsentrasi limbah menyebabkan penurunan TSS berlangsung lebih lambat karena tingginya beban padatan tersuspensi yang harus disisihkan selama proses kultivasi.



Gambar 5. Laju konsentrasi TSS limbah menurut hari

Pada konsentrasi limbah 20%, konsentrasi TSS mengalami penurunan dari 133,33 mg/L pada hari ke-0 menjadi 126,67 mg/L pada hari ke-3, kemudian terus menurun menjadi 93,33 mg/L pada hari ke-7, 86,67 mg/L pada hari ke-14, dan mencapai 55,33 mg/L pada hari ke-21. Penurunan yang berlangsung secara bertahap menunjukkan bahwa *Tetraselmis chuii* mampu mengurangi padatan tersuspensi secara efektif pada konsentrasi limbah yang relatif rendah.

Pada konsentrasi limbah 50%, kadar TSS menurun dari 180,00 mg/L pada awal penelitian menjadi 146,67 mg/L pada hari ke-3, 80,00 mg/L pada hari ke-7, 56,67 mg/L pada hari ke-14, dan mencapai 26,67 mg/L pada hari ke-21. Dibandingkan dengan konsentrasi lainnya, variasi 50% menunjukkan penurunan TSS yang paling besar hingga akhir masa kultivasi, yang mengindikasikan bahwa kondisi media masih mampu mendukung aktivitas bioflokulasi dan pengendapan partikel tersuspensi secara optimal.

Pada konsentrasi limbah 75%, konsentrasi TSS berkurang dari 190,00 mg/L menjadi 173,30 mg/L pada hari ke-3, 126,70 mg/L pada hari ke-7, 103,30 mg/L pada hari ke-14, dan 66,70 mg/L pada hari ke-21. Sementara itu, pada konsentrasi limbah 100%, kadar TSS mengalami penurunan dari 200,00 mg/L pada hari ke-0 menjadi 186,70 mg/L, 153,30 mg/L, 126,70 mg/L, dan 86,67 mg/L masing-masing pada hari ke-3, ke-7, ke-14, dan ke-21. Penurunan TSS pada kedua konsentrasi tersebut berlangsung lebih lambat dibandingkan konsentrasi 20% dan 50%, yang menunjukkan bahwa tingginya kandungan padatan tersuspensi dalam limbah dapat menghambat efektivitas proses penyisihan.

Secara keseluruhan, seluruh variasi konsentrasi limbah menunjukkan tren penurunan kadar TSS selama masa kultivasi. Namun, efektivitas penyisihan berbeda pada setiap konsentrasi limbah, di mana konsentrasi 50% menghasilkan konsentrasi TSS akhir terendah (26,67 mg/L), sedangkan konsentrasi 100% masih memiliki konsentrasi TSS tertinggi (86,67 mg/L) pada akhir penelitian. Hasil ini menunjukkan bahwa kemampuan *Tetraselmis chuii* dalam menyisihkan padatan tersuspensi dipengaruhi oleh besarnya beban padatan dalam media. Mekanisme penyisihan TSS pada masing-masing variasi konsentrasi selanjutnya dibahas secara lebih rinci pada subbab berikutnya melalui proses bioflokulasi, pembentukan *Extracellular Polymeric Substances* (EPS), dan pengendapan partikel tersuspensi.

3.6 Penurunan Konsentrasi Total Kromium

Total kromium merupakan salah satu logam berat yang banyak ditemukan dalam limbah cair industri penyamakan kulit dan bersifat toksik terhadap organisme hidup. Keberadaan Total kromium dalam perairan dapat menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan dan kesehatan karena memiliki sifat karsinogenik serta mudah terakumulasi dalam rantai makanan. Oleh karena itu, penyisihan total kromium menjadi salah satu parameter penting dalam pengolahan limbah cair penyamakan kulit (Jannah et al., 2023).

Pada penelitian ini, pengukuran konsentrasi total kromium dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan *Tetraselmis chuii* dalam menyisihkan logam berat melalui proses aerasi-bioflokulasi selama 21 hari kultivasi. Pengamatan dilakukan pada setiap variasi konsentrasi limbah, yaitu 20%, 50%, 75%, dan 100%. Hasil pengukuran konsentrasi total kromium dan persentase penyisihannya selama masa kultivasi disajikan pada **Tabel 4**.

Tabel 4. Penurunan Konsentrasi Parameter Total Kromium

Hari	Konsentrasi Limbah (mg/L)			
	20%	50%	75%	100%
0	15	17	18	20
3	9	12	15	18
7	6	10	12	14
14	2	6	8	9
21	0,4	0,6	4	6

Sumber : Data Penelitian, 2026

Hasil penelitian menunjukkan bahwa *Tetraselmis chuii* mampu menurunkan konsentrasi total kromium (Cr) pada seluruh variasi konsentrasi limbah cair penyamakan kulit selama 21 hari masa kultivasi. Penurunan konsentrasi Cr terjadi secara bertahap pada setiap waktu pengamatan, meskipun tingkat penyisihannya berbeda pada masing-masing konsentrasi limbah. Secara umum, semakin rendah konsentrasi limbah, semakin besar kemampuan mikroalga dalam menurunkan kadar Cr. Sebaliknya, pada konsentrasi limbah yang lebih tinggi, laju penyisihan Cr berlangsung lebih lambat karena meningkatnya beban logam yang harus diadsorpsi maupun diasimilasi oleh mikroalga. (Sbihi et al., 2024)

Pada konsentrasi limbah 20%, kadar total Cr mengalami penurunan dari 15 mg/L pada hari ke-0 menjadi 9 mg/L pada hari ke-3, kemudian terus menurun menjadi 6 mg/L pada hari ke-7, 2 mg/L pada hari ke-14, dan mencapai 0,4 mg/L pada hari ke-21. Penurunan yang signifikan ini menunjukkan bahwa *Tetraselmis chuii* mampu mengurangi kandungan kromium secara efektif pada konsentrasi limbah yang relatif rendah.

Pada konsentrasi limbah 50%, kadar total Cr juga mengalami penurunan secara bertahap dari 17 mg/L menjadi 12 mg/L pada hari ke-3, 10 mg/L pada hari ke-7, 6 mg/L pada hari ke-14, dan mencapai 0,6 mg/L pada hari ke-21. Hasil ini menunjukkan bahwa mikroalga masih mampu mempertahankan kemampuan penyisihan logam berat meskipun konsentrasi awal Cr lebih tinggi dibandingkan pada limbah 20%.

Pada konsentrasi limbah 75%, konsentrasi total Cr berkurang dari 18 mg/L pada awal penelitian menjadi 15 mg/L pada hari ke-3, 12 mg/L pada hari ke-7, 8 mg/L pada hari ke-14, dan 4 mg/L pada hari ke-21. Sementara itu, pada konsentrasi limbah 100%, kadar total Cr mengalami penurunan dari 20 mg/L menjadi 18 mg/L, 14 mg/L, 9 mg/L, dan 6 mg/L masing-masing pada hari ke-3, ke-7, ke-14, dan ke-21. Penurunan yang lebih lambat pada kedua konsentrasi tersebut menunjukkan bahwa tingginya kandungan kromium dalam limbah memberikan tekanan yang lebih besar terhadap mikroalga sehingga kapasitas penyisihan menjadi lebih terbatas.

Secara keseluruhan, seluruh variasi konsentrasi limbah menunjukkan tren penurunan kadar total Cr selama masa kultivasi. Penyisihan terbaik diperoleh pada konsentrasi limbah 20%, di mana kadar Cr berhasil diturunkan hingga 0,4 mg/L, sedangkan pada konsentrasi limbah 100% kadar Cr akhir masih sebesar 6 mg/L.

4. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa *Tetraselmis chuii* mampu tumbuh pada limbah cair penyamakan kulit dengan variasi konsentrasi 20%, 50%, 75%, dan 100% selama 21 hari kultivasi, meskipun laju pertumbuhannya menurun seiring meningkatnya konsentrasi limbah. Pertumbuhan terbaik diperoleh pada konsentrasi limbah 20%, dengan kelimpahan sel mencapai sekitar 20×10^6 sel/mL pada hari ke-14, sedangkan konsentrasi limbah yang lebih tinggi memberikan tekanan akibat tingginya kandungan bahan organik dan kromium sehingga menghambat aktivitas metabolisme dan pembelahan sel.

Tetraselmis chuii juga terbukti efektif sebagai agen bioremediasi dalam menurunkan parameter pencemar limbah cair penyamakan kulit. Penyisihan COD tertinggi diperoleh pada konsentrasi limbah 20%, yaitu dari 1350,2 mg/L menjadi 98,8 mg/L dengan efisiensi 92,68%. Penyisihan TSS terbaik terjadi pada konsentrasi limbah 50%, yaitu dari 180,0 mg/L menjadi 26,67 mg/L dengan efisiensi 85,18%, sedangkan penyisihan total kromium (Cr) tertinggi diperoleh pada konsentrasi limbah 20%, yaitu dari 15 mg/L menjadi 0,4 mg/L dengan efisiensi 97,33%.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan kelimpahan sel berkaitan dengan meningkatnya kemampuan penyisihan COD, TSS, dan total kromium. Semakin baik pertumbuhan *Tetraselmis chuii*, semakin tinggi aktivitas fotosintesis, asimilasi senyawa organik, biosorpsi logam berat, serta bioflokulasi yang berkontribusi terhadap penurunan konsentrasi pencemar. Dengan demikian, *Tetraselmis chuii* berpotensi diaplikasikan sebagai alternatif teknologi bioremediasi yang ramah lingkungan untuk pengolahan limbah cair penyamakan kulit, terutama pada limbah dengan konsentrasi pencemar rendah hingga sedang.

6. Referensi

- Almeida, C. (2023). Biotechnology Applications of Microalgae. In *Biotechnology Applications of Microalgae*. <https://doi.org/10.3390/books978-3-0365-6773-0>
- Borisova, J., Morshchinin, I. V., Nazarova, V. I., Molodkina, N., & Nikitin, N. O. (2025). *Low-Cost Microalgae Cell Concentration Estimation in Hydrochemistry Applications Using Computer Vision*. 1–29.
- Cahyonugroho, O. H. (2023). *Phycoremediation Using Microalgae Chlorella vulgaris and Nannochloropsis oculata to Remove Lead Heavy Metals*. 2(4), 703–711. <https://doi.org/10.55123/insologi.v2i4.2278>
- Fitria, K. A., Nurhayati, I., & Sutrisno, J. (2023). *Penurunan Chemical Oxygen Demand (COD) Dan Fosfat (PO₄ -P) Limbah Laundry Menggunakan EM 4 dan Mikroalga Spirulina sp.* 15, 31–44.
- Hadiyanto, & Azim, M. (2016). Dasar-dasar bioproses. In *Center of Biomass and Renewable Energy (C-BIORE)*.
- Hamidah, N., Elystia, S., & Sasmita, A. (2023). Analisis Penambahan Mikroorganisme Lokal (Mol) Terhadap Produktivitas Biomassa Dan Pengolahan Limbah Cair Tahu Menggunakan Rotary Algae Biofilm Reactor (Rabr). *Jurnal Teknologi Pertanian Andalas*, 27(2), 173–184.
- Jannah, M., Elystia, S., & Sasmita, A. (2023). *Pengolahan Limbah Cair Tahu Dengan Teknologi Rotary Algae Biofilm Reactor (RABR) Menggunakan Simbiosis Alga Bakteri Dengan Variasi Kecepatan*. 11(1), 59–70.
- Lead, W., & Compound, A. (2024). *Cell Density Of Microalgae Tetraselmis chuii, With Lead Acetate Compound (Pb(Ch₃COO)₂) at Different Concentrations*. 12(2), 58–65.
- Marey, R. S., Abo-shady, A. M., Khairy, H. M., & Shabaka, S. H. (2025). *The toxicological effects of low-density polyethylene microplastic particles (LDPE-MPs) on the growth and metabolic activities of the marine diatom Chaetoceros muellerii*. 1–23.
- Marques, D. M. C., Jabouille, M., Gusmão, A., Leite, M., Sanjuan-alberte, P., & Ferreira, F. C. (2025). *Microalgae-enriched (bio) inks for 3D bioprinting of cultured seafood Check for updates*. 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41538-025-00386-y>
- Muria, S. R., Shiddiq, F. M., Damayanti, I., & Purnama, I. (2023). *Kultivasi Mikroalga Chlorella sp . Secara Fed-Batch Menggunakan Limbah Cair Tahu Untuk Produksi Lipid*. *lim*(2019), 37–56.
- Prasetyo, L. D., Supriyantini, E., & Sedjati, S. (2022). *Pertumbuhan Mikroalga Chaetoceros calcitrans Pada Kultivasi dengan Intensitas Cahaya Berbeda*. 11(1), 59–70.

<https://doi.org/10.14710/buloma.v11i1.31698>

- Rafay, R., Uratani, J. M., Hernandez, H. H., & Rodríguez, J. (2020). *Growth and Nitrate Uptake in Nannochloropsis gaditana and Tetraselmis chuii Cultures Grown in Sequential Batch Reactors*. 7(February), 1–9. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00077>
- Sbihi, K., Elhamji, S., Lghoul, S., Aziz, K., Maallem, A. El, Mabrouki, J., El-sheekh, M., & Aziz, F. (2024). *Biosorption of Hexavalent Chromium by Freshwater Microalgae Craticula subminuscula from Aqueous Solutions*. Vi.
- Suwarsono, S. J., Kemer, K., Rumengan, A., Manengkey, H., Rumampuk, N., & Mamuaja, J. (2024). Profil Pertumbuhan Mikroalga Chlorella vulgaris Pada Media KW21. *Jurnal Pesisir Dan Laut Tropis*, 12(1), 18–25. <https://doi.org/10.35800/jplt.12.1.2024.55072>
- Na'imamah, N. I., Anwar, A., Murni, M., & Hamsah, H. (2024). Optimasi Media Kultur Menggunakan Limbah Cair Tahu Untuk Pertumbuhan Tetraselmis sp. *Octopus: Jurnal Ilmu Perikanan*, 13(1), 35–41.
- Xie, J., & Zhao, Q. (2025). Green extraction of active compounds in marine microalgae. *Blue Biotechnology*, 2(1), 30.