

Contents list available at journal.uib.ac.id**Journal of Civil Engineering and Planning**Journal homepage: <https://journal.uib.ac.id/index.php/jce>

Jurnal Penelitian

Karakteristik Bahan Organik yang Dilepaskan dari Lumpur Hasil Pengolahan pada Instalasi Pengolahan Air

Characteristics of Organic Matter Released from Water Treatment Sludge in Water Treatment Facilities

Sri Anggreini¹, Ade Jaya Saputra², LQ Parulian Sanjaya S³^{1,2,3}Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Internasional BatamEmail korespondensi: sri.anggreini@uib.ac.id

INFO ARTIKEL	ABSTRAK
Kata kunci : Bahan Organik Lumpur Hasil Pengolahan Air Inkubasi Anoksik Oksik	Lumpur hasil pengolahan air (Water Treatment Sludge/WTS) dari Instalasi Pengolahan Air (IPA) mengandung bahan organik (organic matter/OM) yang dapat terlepas selama penyimpanan sebelum proses <i>dewatering</i> karena pengaruh suhu dan oksigen. OM yang dilepaskan oleh WTS dapat menurunkan kualitas air jadi jika air hasil <i>dewatering</i> didaur ulang ke sistem IPA. Penelitian ini bertujuan menginvestigasi perubahan kualitas bahan organik dalam WTS selama masa penyimpanan pada suhu (20°C dan 40°C) dan kondisi oksigen (oksik dan anoksik) yang berbeda. Evaluasi karakteristik OM dilakukan melalui pengukuran karbon organik terlarut (DOC), serapan sinar ultraviolet pada panjang gelombang 260 nm (UV260), dan analisis fluoresensi menggunakan metode Excitation-Emission Matrix (EEM). Parameter Specific UV Absorbance (SUVA) juga dihitung untuk menilai kandungan senyawa aromatik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konsentrasi DOC tertinggi ditemukan pada kondisi anoksik suhu 40 °C (4,94 mg/L), yaitu 4,3 kali lebih tinggi dibandingkan nilai terendah yang ditemukan pada kondisi oksik suhu 20 °C (1,14 mg/L). Serapan UV260 tertinggi (13,55 m⁻¹) dan nilai SUVA tertinggi (2,74 m⁻¹/(mg/L)) juga ditemukan pada kondisi anoksik 40 °C, yang menunjukkan dominasi senyawa aromatik dan senyawa mirip humat banyak terbentuk pada kondisi tersebut. Analisis fluoresensi EEM mendeteksi tiga puncak utama yang merepresentasikan senyawa mirip protein, asam fulvat, dan asam humat. Senyawa mirip asam fulvat dan humat (fulvic acid-like and humic acid-like substances) lebih banyak dilepaskan pada kondisi anoksik dibandingkan dengan senyawa mirip protein (protein-like substances). Perbedaan kondisi oksigen dan suhu sangat berperan dalam menentukan karakteristik OM yang dilepaskan dari WTS. Inkubasi pada suhu tinggi tanpa oksigen menghasilkan akumulasi senyawa organik yang lebih sulit terurai dan berpotensi mempengaruhi proses pengolahan air berikutnya.
ARTICLE INFO	ABSTRACT
Keywords: Organic Matter Water Treatment	<i>Water treatment sludge (WTS) generated from water treatment plants (WTPs) contains organic matter (OM) that may be released during storage prior to the dewatering process due to the influence of temperature and oxygen. The release of OM from WTS can deteriorate the quality of treated water if the dewatering effluent is recycled back into</i>

Sludge Incubation Anoxic Oxic	<i>the WTP system. This study aims to investigate changes in the quality of OM in WTS during storage under varying temperatures (20°C and 40°C) and oxygen conditions (oxic and anoxic). The characteristics of released OM were evaluated by measuring dissolved organic carbon (DOC), ultraviolet absorbance at 260 nm (UV260), and fluorescence Excitation-Emission Matrix (EEM). The Specific UV Absorbance (SUVA) parameter was also calculated to assess the aromatic content of OM. The highest DOC concentration (4.94 mg/L) was observed under anoxic conditions at 40°C, which was 4.3 times higher than the lowest value found under oxic conditions at 20°C (1.14 mg/L). The highest UV260 absorbance (13.55 m^{-1}) and SUVA value ($2.74 \text{ m}^{-1}/(\text{mg/L})$) were also found under the anoxic 40°C condition, indicating a dominance of aromatic and humic-like substances formed during storage. EEM fluorescence analysis detected three main peaks representing protein-like, fulvic acid-like, and humic acid-like substances. Fulvic and humic acid-like substances were released more abundantly under anoxic conditions compared to protein-like substances. Differences in oxygen and temperature conditions play a significant role in determining the characteristics of OM released from WTS. Incubation at high temperatures in the absence of oxygen leads to the accumulation of more recalcitrant organic compounds, which may affect subsequent water treatment processes.</i>
--	---

1. Pendahuluan

Instalasi Pengolahan Air (IPA) menghasilkan limbah berupa lumpur yang dikenal sebagai lumpur hasil pengolahan air atau Water Treatment Sludge (WTS) selama proses pemurnian air baku. Lumpur ini mengandung berbagai kontaminan, termasuk padatan tersuspensi, bahan organik atau *Organic Matter* (OM), prekursor produk samping desinfeksi (DBP), bakteri, serta logam anorganik seperti besi (Fe), mangan (Mn), dan aluminium (Al) [1,2]. WTS terbentuk dari flok hasil proses koagulasi-flokulasi, sedimentasi, dan filtrasi pada IPA. Lumpur ini dialirkan ke dalam bak pengental untuk diendapkan selama periode tertentu tanpa perlakuan lanjutan. Namun, proses kimia dan aktivitas mikroorganisme dapat berlangsung selama pengendapan, bergantung pada suhu dan kondisi oksigen (baik oksik maupun anoksik). Setelah pengendapan, WTS melewati proses *dewatering* untuk memisahkan air dan padatan lumpur. Air hasil proses *dewatering* akan didaur ulang kembali ke sistem pengolahan sebagai air baku, sementara padatan lumpur akan didaur ulang untuk pembuatan bahan bangunan. Air dari proses daur ulang ini menimbulkan kendala utama pada IPA seperti konsentrasi OM yang dihasilkan WTS terlalu tinggi [3]. Beberapa penelitian sebelumnya yang meneliti dampak penggunaan air dari WTS dalam proses klorinasi menunjukkan bahwa air daur ulang secara signifikan meningkatkan pembentukan produk samping DBP, sehingga berpotensi meningkatkan risiko kesehatan [1,2]. Selain itu, fraksi OM yang dilepaskan dari WTS, seperti protein dan polisakarida, sulit dihilangkan melalui proses koagulasi, sehingga menyebabkan penurunan kualitas air hasil proses koagulasi [4]. Konsentrasi OM yang tinggi dapat menimbulkan berbagai permasalahan, baik selama proses pengolahan air maupun pada kualitas air jadi seperti: (1) perubahan warna, rasa, dan bau air; (2) pembentukan DBP yang bersifat toksik akibat reaksi OM dengan klorin; (3) serta peningkatan pertumbuhan mikroorganisme yang tidak diinginkan dalam sistem distribusi air.

Beberapa penelitian terdahulu menunjukkan bahwa peningkatan suhu secara signifikan mendorong akumulasi karbon organik terlarut (DOC) dan nitrogen organik terlarut (DON), serta meningkatkan jumlah mikroorganisme dalam lumpur limbah cair yang diproses melalui sistem oksik dan anoksik [4-9]. Namun, studi mengenai perubahan kualitas bahan organik dalam WTS selama proses penyimpanan pada kondisi suhu dan oksigen yang berbeda masih sangat terbatas. Sejauh ini, belum ditemukan studi yang secara spesifik meneliti pelepasan OM dari WTS dalam kondisi penyimpanan oksik dan anoksik pada dua suhu berbeda (20°C dan 40°C), terutama dalam konteks

pengolahan air minum di wilayah tropis. Berdasarkan kesenjangan pengetahuan tersebut, penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk menginvestigasi perubahan kualitas bahan organik dalam WTS selama masa penyimpanan pada dua kondisi suhu (20 dan 40°C) dan dua kondisi oksigen (oksik dan anoksik). Karakteristik OM yang dilepaskan dievaluasi menggunakan parameter serapan ultraviolet pada panjang gelombang 260 nm (UV260), karbon organik terlarut (DOC), dan analisis *Excitation-Emission Matrix (EEM) Fluorescence*. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi penting terhadap literatur ilmiah terkait perilaku bahan organik dalam WTS, serta memberikan dasar ilmiah untuk mengelola proses daur ulang air dan mencegah penurunan kualitas air minum akibat pelepasan bahan organik selama penyimpanan lumpur.

2. Tinjauan Pustaka

2.1 Lumpur Hasil Pengolahan Air

Instalasi pengolahan air (IPA) konvensional terdiri dari beberapa proses, antara lain koagulasi, flokulasi, sedimentasi, filtrasi, dan disinfeksi. Selama proses pengolahan tersebut, IPA menghasilkan residu yang dikenal sebagai lumpur hasil pengolahan air atau water treatment sludge (WTS). Volume lumpur WTS yang dihasilkan selama proses pengolahan air cukup besar, yaitu sekitar 2–10% dari total aliran air di IPA [10]. WTS terdiri dari berbagai jenis flok, seperti flok hasil koagulasi, flok yang mengendap di bak sedimentasi, dan flok yang tertahan pada filter pasir. Proses pengeringan lumpur DWTS semakin umum dilakukan di IPA, dan air hasil pengeringan tersebut biasanya didaur ulang kembali sebagai air baku.

Sifat-sifat lumpur WTS umumnya tergantung pada kualitas air baku dan metode pengolahan yang diterapkan. Jika air tanah yang biasanya memiliki kualitas yang stabil diolah, maka kuantitas dan kualitas WTS cenderung tidak banyak berubah. Sebaliknya, pengolahan air permukaan menyebabkan perubahan yang signifikan pada produksi lumpur, baik dari segi kualitas maupun kuantitas. Hal ini dapat terjadi karena perubahan kualitas air baku yang cukup besar dan/atau variasi sifat serta dosis bahan kimia yang digunakan selama proses pengolahan. WTS mengandung sejumlah besar senyawa anorganik, termasuk hidroksida dari koagulan berbasis aluminium atau besi, sedimen, dan mineral yang berasal dari proses geologi. Selain itu, DWTS juga mengandung fraksi organik yang berasal dari keberadaan alga dan bakteri, bahan humus yang berasal dari pembusukan tanaman, serta sejumlah kecil zat polimer ekstraseluler (*extracellular polymeric substances*) yang dihasilkan oleh bakteri [11]. Detail fisikokimia WTS disajikan pada tabel 2.1 sebagai berikut.

Tabel 2.1 Komposisi fisikokimia lumpur hasil pengolahan air (WTS)

Karakteristik fisik WTS kering	
pH	6.82
Moisture ^a (%)	2.35
Volatile matter ^b (%)	2.66
Ash content (%)	89.78
Loss on Ignition ^c (%)	8.96
Komposisi kimia lumpur WTS	
Components	%W/W
SiO ₂	52.78
Al ₂ O ₃	14.38
Fe ₂ O ₃	5.20
CaO	4.39
K ₂ O	3.62
MgO	3.08
NaO ₂	0.97

TiO ₂	0.61
P ₂ O ₅	0.17
MnO	0.08
ZnO	0.01

^aHeated at 105±5°C for 24 hours

^bCombusted at 550±5°C for 2 hours

^cFired at 1000±5°C for 2 hours

Sumber: Ahmad et al., 2016 [12]

2.2 Organic Matter

Bahan organik atau *Organic Matter* (OM) merupakan campuran kompleks senyawa organik yang sangat bervariasi tergantung pada kondisi lingkungan, letak geografis, dan kedalaman air [13]. Bahan organik alami dihasilkan melalui proses penguraian dan degradasi organisme oleh berbagai proses biologis dan fisik alami yang melibatkan hidrosfer, biosfer, dan geosfer [14]. Di sisi lain, bahan organik antropogenik masuk ke lingkungan melalui aktivitas manusia dan produk sampingan, seperti limbah domestik [13], sampah, serta hasil degradasi mikroplastik [15]. Selain berfungsi sebagai sumber karbon, OM juga berperan aktif dalam berbagai fungsi ekologi, seperti menjadi sumber energi bagi mikroba di tanah dan dalam rantai makanan perairan, serta sebagai hasil sampingan dari metabolisme biologis [16]. Bahan organik juga memiliki peran penting dalam kelarutan, toksisitas, ketersediaan hayati, mobilitas, dan distribusi polutan, melalui ikatan dengan logam berat dan/atau polutan organik persisten (POPs) [17].

Dalam lingkungan perairan, bahan organik didefinisikan sebagai campuran heterogen dari partikel dan molekul organik yang memiliki sifat fisik (misalnya ukuran dan porositas) serta sifat kimia (misalnya kandungan gugus fungsi dan kelarutan) yang bervariasi [18]. Bahan organik diklasifikasikan ke dalam dua fraksi berdasarkan ukuran pori penyaring, yaitu bahan organik terlarut (DOM) yang berukuran kurang dari 0,2 µm dan bahan organik partikulat (POM) yang berukuran lebih dari 0,2 µm. OM yang terdapat dalam perairan terdiri atas komponen hidrofobik dan hidrofilik. Bagian hidrofobik umumnya mengandung karbon aromatik, dengan struktur fenolik dan ikatan rangkap terkonjugasi, sedangkan OM hidrofilik kaya akan karbon alifatik dan senyawa nitrogen, seperti karbohidrat dan protein, gula, serta asam amino [13]. OM hidrofobik sering kali digambarkan sebagai zat humat yang terdiri atas asam humat atau Humic Acid (HA), asam fulvat atau Fulvic Acid (FA), dan humin. Zat humat ini diperkirakan menyumbang sekitar 25% dari total karbon organik atau total organic carbon (TOC) dan mencakup 50–75% dari karbon organik terlarut atau dissolved organic carbon (DOC) dalam perairan [19]. Oleh karena itu, zat humat memainkan peran penting dalam ekosistem sungai. HA didefinisikan sebagai fraksi zat humat yang tidak larut dalam air pada kondisi asam (pH < 2), tetapi larut pada pH yang lebih tinggi. FA bersifat larut dalam air pada semua kondisi pH. Sementara itu, humin tidak larut dalam air pada semua nilai pH maupun dalam basa [20]. Sampel FA memiliki berat molekul yang lebih rendah (1–18 kDa) dibandingkan dengan sampel HA (5–100 kDa) [10].

Pada instalasi pengolahan air, OM dapat menimbulkan berbagai bentuk permasalahan. OM dapat menyebabkan perubahan rasa, warna, dan bau pada air [18]. Selain itu, OM juga dapat berfungsi sebagai sumber nutrisi bagi pertumbuhan bakteri dalam sistem distribusi air [16]. Selama proses desinfeksi, OM dapat bereaksi dengan klorin dan membentuk produk samping desinfeksi (DBP) seperti trihalometana (THMs), asam haloasetat (HAAs), haloasetonitril, haloeton, haloaldehid, dan halogenated furanones [21]. Senyawa-senyawa ini diduga bersifat karsinogenik serta berpotensi menyebabkan kelainan bawaan (teratogenik) dan perubahan genetik (mutagenik) yang dapat

membahayakan kesehatan manusia. Oleh karena itu, penghilangan OM merupakan tahap penting dalam proses pengolahan air minum untuk menghasilkan air yang layak konsumsi.

3. Metode Penelitian

3.1 Pengambilan Sampel

WTS diperoleh dari IPA yang berlokasi di wilayah Jepang bagian tengah, dengan kapasitas produksi air bersih mencapai 220.300 m³/hari. IPA ini menggunakan proses pengolahan konvensional yang meliputi koagulasi-flokulasi, sedimentasi, filtrasi, dan disinfeksi, dengan sistem tertutup, di mana IPA mendaur ulang air dari WTS sebagai air baku. Sampel WTS diambil dari bak pengental dan segera dibawa ke laboratorium untuk dianalisis.

3.2 Percobaan Inkubasi

Sampel WTS diinkubasi di laboratorium dalam kondisi oksik (dengan oksigen) dan anoksik (tanpa oksigen) pada suhu 20 °C dan 40 °C. Lima sampel WTS disiapkan pada kondisi berbeda, yaitu anoksik pada suhu 40 °C (A-40), oksik pada suhu 40 °C (O-40), anoksik pada suhu 20 °C (A-20), oksik pada suhu 20 °C (O-20), dan tanpa inkubasi (TI). Setelah inkubasi selama 7 hari, dilakukan sentrifugasi pada 2.500 rpm selama 15 menit, kemudian supernatan disaring menggunakan membran asetat selulosa berpori 0,2 µm sebelum dianalisis. Setiap pengukuran dilakukan sebanyak tiga kali ulangan (triplikat) untuk memastikan keandalan dan konsistensi data. Parameter yang diukur meliputi *dissolved oxygen* (DO), *electrical conductivity* (EC), pH, and *oxidation-reduction potential* (ORP), yang diukur secara langsung dengan mencelupkan sensor alat ke dalam sampel menggunakan DO meter, EC meter, pH meter, dan ORP meter. Sebelum digunakan, alat dikalibrasi sesuai petunjuk pabrik, dan pembacaan dilakukan setelah nilai stabil untuk memastikan akurasi pengukuran. Konsentrasi OM dihitung sebagai karbon organik terlarut (DOC) dengan menggunakan *TOC Analyzer* dan serapan UV pada panjang gelombang 260 nm (UV260) menggunakan *Spectrophotometer*. Komposisi OM dianalisis menggunakan *Excitation-Emission Matrix (EEM) Fluorescence* dengan menggunakan *Fluorescence spectrophotometer*. Serapan ultraviolet spesifik (SUVA) dihitung sebagai perbandingan antara nilai UV260 dengan DOC.

4. Hasil dan Pembahasan

4.2 Bahan organik dinilai berdasarkan DOC, UV260, dan SUVA

Konsentrasi keseluruhan (DOC dan UV260) bervariasi pada dua jenis suhu dan dua kondisi oksigen yang berbeda, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.1. Nilai pH berkisar antara 6,80 hingga 7,16, dengan pH tertinggi ditemukan pada kondisi oksik 20°C. Secara umum, tidak terdapat perbedaan pH yang signifikan antar kondisi. Konsentrasi oksigen terlarut menunjukkan perbedaan mencolok antara kondisi anoksik dan oksik. Nilai DO tertinggi tercatat pada kondisi oksik 20°C sebesar 8,93 mg/L, sedangkan kondisi anoksik menunjukkan nilai yang jauh lebih rendah, mencerminkan keberhasilan penciptaan lingkungan tanpa oksigen. Selain itu, konduktivitas listrik tertinggi terjadi pada kondisi anoksik 40°C (19,10 mS/m), menunjukkan peningkatan ion terlarut dalam air akibat proses inkubasi. Nilai ORP menunjukkan perbedaan yang jelas antara kondisi anoksik dan oksik. Nilai negatif pada kondisi anoksik 40°C (-24 mV) menunjukkan kondisi reduktif, sedangkan nilai tertinggi pada kondisi tanpa inkubasi (251 mV) menunjukkan kondisi yang sangat oksidatif.

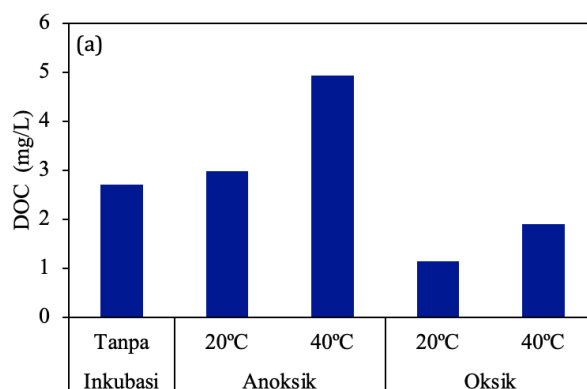
Table 4.1 Physicochemical characteristics of DWTS

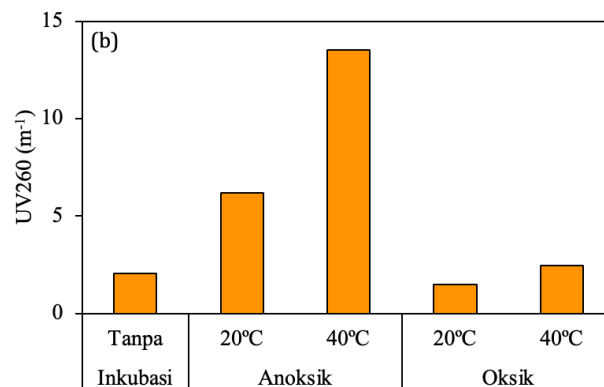
Parameter	Tanpa Inkubasi	Anoxic		Oxic	
		20 °C	40 °C	20 °C	40 °C

pH	6.81	6.90	6.80	7.16	6.91
DO (mg/L)	1.36	2.93	0.96	8.93	6.83
EC (mS/m)	13.23	16.10	19.10	11.20	18.10
ORP (mV)	251.00	39.00	-24.00	121.00	39.00

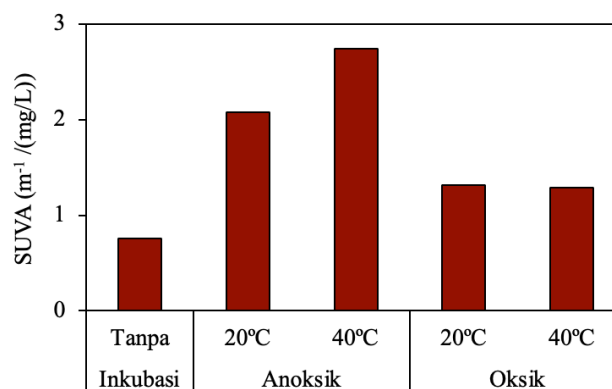
Konsentrasi DOC tertinggi terukur pada kondisi anoksik 40 °C (4,94 mg/L), sedangkan kondisi oksik 20°C menunjukkan nilai terendah (1,14 mg/L) seperti yang terlihat pada gambar 4.1a. Hal ini menunjukkan bahwa konsentrasi DOC pada kondisi anoksik dengan suhu 40 °C secara signifikan lebih tinggi dibandingkan dengan kondisi oksik, yaitu 4,3 kali lebih tinggi. Gambar 4.1b menunjukkan nilai UV260 tertinggi juga ditemukan pada kondisi anoksik 40 °C (13,55 m⁻¹) dibandingkan dengan kondisi oksik, mengindikasikan akumulasi senyawa aromatik dalam bahan organik. Nilai SUVA tertinggi terdapat pada kondisi anoksik 40 °C (2,74 m⁻¹/(mg/L)) seperti yang terlihat pada Gambar 4.2, mengindikasikan dominasi kandungan humat dalam bahan organik lebih besar. Sebaliknya, nilai SUVA terendah ditemukan pada sampel tanpa inkubasi (0,76 m⁻¹/(mg/L)).

Konsentrasi DOC yang tinggi pada kondisi anoksik 40 °C disebabkan oleh lambatnya proses degradasi serta tingginya laju pelepasan bahan organik terlarut (DOM) dari WTS. Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa inkubasi secara anoksik pada suhu tinggi menghasilkan kandungan organik yang lebih tinggi dibandingkan dengan inkubasi secara oksik, baik pada WTS maupun lumpur dari air limbah [4]. Keberadaan DOM yang resisten terhadap degradasi biologis juga berkontribusi terhadap tingginya kandungan DOM pada kondisi tanpa aerasi. DOM jenis ini sulit terurai secara biologis dan tetap berada dalam lumpur setelah proses inkubasi. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa konsentrasi oksigen memiliki pengaruh besar terhadap karakteristik DOM yang dilepaskan dari WTS. Keberadaan oksigen dapat mempercepat proses penguraian DOM, sehingga menghasilkan karbon dioksida sebagai produk akhir [2]. Hal ini dibuktikan dengan rendahnya konsentrasi DOC pada kondisi dengan oksik, yang mengindikasikan bahwa degradasi organik berlangsung lebih cepat dan sebagian senyawa organik telah teroksidasi menjadi karbon dioksida.





Gambar 4.1 Perubahan konsentrasi DOC dan UV260 pada lumpur hasil pengolahan air (WTS) dalam berbagai kondisi inkubasi: (a) DOC, (b) UV260

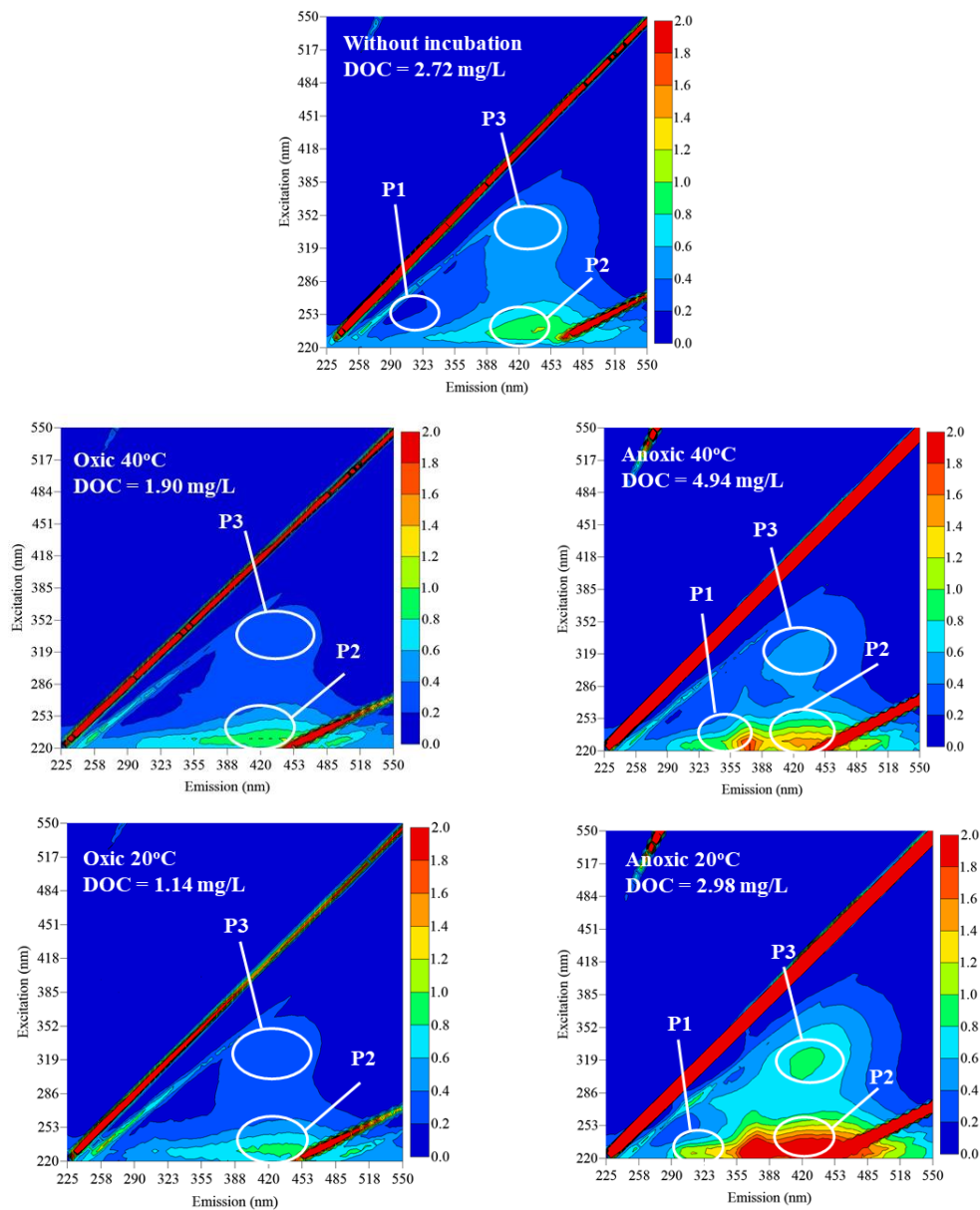


Gambar 4.2 Perubahan nilai SUVA pada lumpur hasil pengolahan air minum (DWTS) dalam berbagai kondisi inkubasi

Nilai SUVA terhitung lebih tinggi pada kondisi anoksik dibandingkan kondisi oksik, menunjukkan bahwa jumlah senyawa mirip humat atau humic-like (humic acid-like dan fulvic acid-like) yang terbentuk setelah inkubasi lebih besar pada kondisi anoksik. Sebaliknya, nilai SUVA yang lebih rendah pada kondisi oksik dikaitkan dengan dominasi senyawa non-aromatik, yang umumnya terdiri atas molekul organik bersifat hidrofilik [22].

4.2 Bahan organik dinilai berdasarkan *Fluorescence EEM*

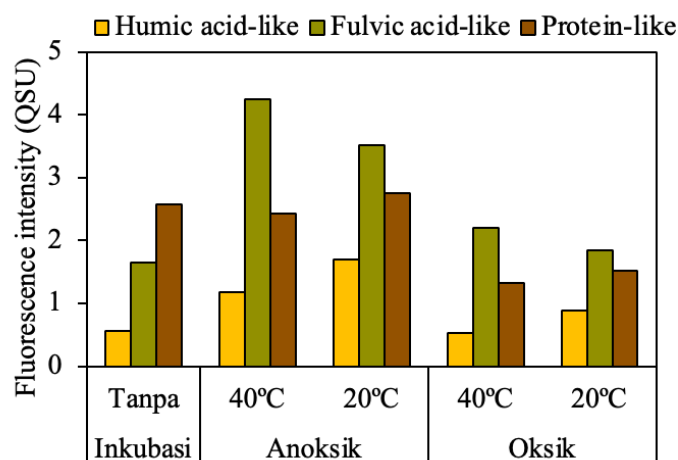
Komponen fluoresensi EEM (Excitation-Emission Matrix) dari WTS pada berbagai kondisi inkubasi disajikan pada Gambar 4.3. Terdeteksi tiga puncak utama, yaitu: P1 yang merepresentasikan senyawa mirip protein atau protein-like (*Emission 250–330 nm, Excitation 200–250 nm*), P2 yang merepresentasikan senyawa mirip asam fulvat atau fulvic acid-like (*Emission 380–550 nm, Excitation 200–250 nm*), dan P3 yang merepresentasikan senyawa mirip asam humat atau humic acid-like (*Emission 380–550 nm, Excitation 250–450 nm*) [23].



Gambar 4.3 Komponen fluoresensi EEM dari bahan organik (OM) dalam lumpur hasil pengolahan air (WTS)

Berdasarkan Gambar 4.3, intensitas fluoresensi senyawa mirip humat (humic acid-like dan fulvic acid-like) tampak lebih tinggi dibandingkan protein-like pada kondisi anoksik. Penjelasan lebih rinci disajikan pada Gambar 4.4, yang menunjukkan bahwa pada kondisi anoksik dengan suhu inkubasi 40 °C, intensitas humic acid-like, fulvic acid-like, dan protein-like masing-masing mencapai 1,18; 4,25; dan 2,43 QSU. Sebaliknya, pada kondisi oksik dengan suhu yang sama, intensitas ketiga komponen tersebut masing-masing tercatat lebih rendah, yaitu sebesar 0,52; 2,20; dan 1,32 QSU. Temuan ini mengindikasikan bahwa senyawa humic acid-like, fulvic acid-like, dan protein-like yang dilepaskan pada kondisi anoksik bersifat kurang atau tidak dapat terdegradasi secara biologis [24]. Hasil ini sejalan dengan nilai SUVA yang telah dijelaskan sebelumnya, di mana nilai SUVA yang lebih tinggi pada kondisi anoksik menunjukkan konsentrasi senyawa aromatik seperti humic-like yang lebih besar di dalam air. Inkubasi pada suhu 40 °C juga terbukti meningkatkan intensitas senyawa mirip protein dibandingkan dengan suhu 20 °C. Perubahan suhu ini menyebabkan terjadinya perubahan fisikokimia dan mikrobiologis dalam air, yang mempercepat proses lisis dan kerusakan mikroorganisme. Suhu

yang lebih tinggi mempercepat denaturasi protein serta meningkatkan permeabilitas membran sel, sehingga mempercepat pelepasan senyawa intraseluler [25].



Gambar 4.4 Komposisi komponen fluoresensi EEM dari bahan organik (OM) dalam lumpur hasil pengolahan air (WTS)

5. Kesimpulan

Inkubasi WTS dalam kondisi oksigen (oksik dan anoksik) dan suhu (20°C dan 40°C) yang berbeda telah di investigasi untuk mengetahui transformasi OM dalam WTS. Hasil penelitian menunjukkan bahwa inkubasi secara anoksik pada suhu tinggi menghasilkan konsentrasi DOC yang tinggi dengan nilai SUVA yang tinggi, yang mengindikasikan terbentuknya OM aromatik selama proses inkubasi. Analisis komposisi menggunakan fluoresensi EEM menunjukkan bahwa inkubasi secara anoksik menghasilkan lebih banyak senyawa yang bersifat humic-like dibandingkan dengan kondisi oksik. Peningkatan DOM pada suhu tinggi juga mempercepat proses humifikasi selama inkubasi anoksik, yang menunjukkan bahwa mayoritas OM yang terbentuk lebih terhumifikasi pada kondisi tersebut.

Penelitian ini mengindikasikan bahwa perlakuan inkubasi dengan kondisi oksik dapat mengurangi jumlah OM yang dihasilkan dari WTS. Pengoperasian inkubasi oksik dengan sistem aerasi bergantian juga berpotensi menekan produksi senyawa organik yang sukar terurai selama inkubasi. Selain itu, metode ini juga berpotensi meningkatkan kemampuan lumpur untuk dikeringkan. Sebagai saran praktis, pendekatan ini dapat dipertimbangkan sebagai strategi awal dalam pengelolaan WTS untuk mengurangi potensi gangguan terhadap kualitas air daur ulang yang akan digunakan kembali pada proses pengolahan air. Penelitian lanjutan direkomendasikan untuk memberikan bukti yang lebih komprehensif mengenai dampak penggunaan kembali air hasil inkubasi WTS dalam proses pengolahan air minum, khususnya terhadap efisiensi tahapan-tahapan penting dalam instalasi pengolahan air (IPA), seperti koagulasi-flokulasi, sedimentasi, filtrasi, dan klorinasi.

Daftar Rujukan

- [1] Y. Qian, Y. Chen, Y. Hu, D. Hanigan, P. Westerhoff, D. An, "Formation and control of C- and N-DBPs during disinfection of filter backwash and sedimentation sludge water in drinking water treatment," *Water Res.*, vol. 194, pp. 116964, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.116964>.
- [2] Y. Hu, Y. Qian, Y. Chen, J. Guo, J. Song, D. An, "Characteristics of trihalomethane and haloacetic

- acid precursors in filter backwash and sedimentation sludge waters during drinking water treatment," *Sci. Total Environ.*, vol. 775, pp. 145952, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145952>.
- [3] Z. Liu, Y. Xu, X. Yang, R. Huang, Q. Zhou, F. Cui, "Does the recycling of waste streams from drinking water treatment plants worsen the quality of finished water? A case assessment in China," *Water Supply*, vol. 17, no. 2, pp. 597–605, 2016, doi: <https://doi.org/10.2166/ws.2016.151>.
- [4] H. Du, F. Li, "Characteristics of dissolved organic matter formed in aerobic and anaerobic digestion of excess activated sludge," *Chemosphere*, vol. 168, pp. 1022–1031, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.10.108>.
- [5] K. Komatsu, T. Onodera, A. Kohzu, K. Syutsubo, A. Imai, "Characterization of dissolved organic matter in wastewater during aerobic, anaerobic, and anoxic treatment processes by molecular size and fluorescence analyses," *Water Res.*, vol. 171, pp. 115459, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115459>.
- [6] Y.A. Sari, A.I. Rifai, "Innovative Solutions for Sewage using Food Chain Reaction (FCR) in Indonesia," *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1655, pp. 012117, 2020, doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1655/1/012117>.
- [7] Y.A. Sari, A.I. Rifai, "Current Situation of Wastewater Treatment Plant for Sewage in Batam City," *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1351, pp. 012109, 2019, doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1351/1/012109>.
- [8] I. Indrastuti, A. Andriawan, L. Leany, "Analisis Waste Water Management pada Proyek Pembangunan Mega Super Blok Meisterstadt Batam Centre," *Journal of Civil Engineering and Planning*, vol. 2, no. 2, pp. 180–187, 2021, doi: <https://doi.org/10.37253/jcep.v2i2.731>.
- [9] A.R. Hidayat, M.K. Ilmi, "Study of Drinking Water Supply System Development Planning in Dusun Tuti, North Lombok Regency, Indonesia," vol. 4, no. 2, pp. 211–226, 2023, doi: <https://doi.org/10.37253/jcep.v4i2.8811>.
- [10] Y. Qian, Y. Hu, Y. Chen, D. An, P. Westerhoff, D. Hanigan, W. Chu, "Haloacetonitriles and haloacetamides precursors in filter backwash and sedimentation sludge water during drinking water treatment," *Water Res.*, vol. 186, pp. 116346, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116346>.
- [11] Z. Zhou, Y. Yang, X. Li, Y. Zhang, X. Guo, "Characterization of drinking water treatment sludge after ultrasound treatment," *Ultrason. Sonochem.*, vol. 24, pp. 19–26, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.11.007>.
- [12] T. Ahmad, K. Ahmad, M. Alam, "Characterization of Water Treatment Plant's Sludge and its Safe Disposal Options," *Procedia Environ. Sci.*, vol. 35, pp. 950–955, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.07.088>.
- [13] M. Sillanpää, M. C. Ncibi, A. Matilainen, M. Vepsäläinen, "Removal of natural organic matter in drinking water treatment by coagulation: A comprehensive review," *Chemosphere*, vol. 190, pp. 54–71, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.09.113>.
- [14] M. Zeeshan, V. Ingold, L. Saal, C. Hora, A. Kampfe, A.S. Ruhl, "Compositions and concentrations of dissolved organic matter, selected elements and anions in German drinking waters," *J. Environ. Manag.*, vol. 376, pp. 124459, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.124459>.
- [15] W. Tang, L. Sun, Y. Zhu, J.C. Ng, J. Huang, Z. Xu, H. Zhang, "Difference analysis of organic matter-mediated heavy metal pollution in the sediments of urban water bodies," *Sci. Total Environ.*, vol. 968, pp. 178747, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178747>.
- [16] L.E. Anderson, I. DeMont, D.D. Dunnington, P. Bjorndahl, D.J. Radden, M.J. Brophy, G.A. Gagnon,

- "A review of long-term change in surface water natural organic matter concentration in the northern hemisphere and the implications for drinking water treatment," *Sci. Total Environ.*, vol. 858, pp. 159699, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159699>.
- [17] L. Zeng, Z. Zhou, J. Zhang, C. Wang, C. Fang, X. Ren, M. Xiang, S. Chen, H. Li, "Selective degradation of organic pollutants in the aquatic environment by microplastic-derived dissolved organic matter through molecular photoresponse sequence transformation," *J. Chem. Eng.*, vol. 499, pp. 156676, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.156676>.
- [18] M. Derrien, S.R. Brogi, R. Gonçalves-Araujo, "Characterization of aquatic organic matter: Assessment, perspectives and research priorities," *Water Res.*, vol. 163, pp. 114908, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.114908>.
- [19] E. Lipczynska-Kochany, "Humic substances, their microbial interactions and effects on biological transformations of organic pollutants in water and soil: A review," *Chemosphere*, vol. 202, pp. 420-437, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.03.104>.
- [20] E. Lipczynska-Kochany, "Effect of climate change on humic substances and associated impacts on the quality of surface water and groundwater: A review," *Sci. Total Environ.*, vol. 640-641, pp. 1548-1565, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.376>.
- [21] Y. Wang, H. Xu, Z. Shen, C. Liu, M. Ding, T. Lin, H. Tao, W. Chen, "Variation of carbonaceous disinfectants by-products precursors and their correlation with molecular characteristics of dissolved organic matter and microbial communities in a raw water distribution system," *Chemosphere*, vol. 283, pp. 131180, doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131180>.
- [22] L.-C. Hua, S.-J. Chao, K. Huang, C. Huang, "Characteristics of low and high SUVA precursors: Relationships among molecular weight, fluorescence, and chemical composition with DBP formation," *Sci. Total Environ.*, vol. 727, pp. 138638, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138638>.
- [23] F.J. Rodríguez-Vidal, M. García-Valverde, B. Ortega-Azabache, A. González-Martínez, A. Bellido-Fernándezb, "Using excitation-emission matrix fluorescence to evaluate the performance of water treatment plants for dissolved organic matter removal. *Spectrochimica Acta Part A*, vol. 249, pp. 119298, doi: <https://doi.org/10.1016/j.saa.2020.119298>.
- [24] L. Pang, J. Ni, X. Tang, "Fast Characterization of soluble organic intermediates and integrity of microbial cells in the process of alkaline anaerobic fermentation of waste activated sludge," *Biochem. Eng. J.*, vol. 86, pp. 49-56, doi: <https://doi.org/10.1016/j.bej.2014.03.005>.
- [25] P. Nannipieri, G. Angst, C. Mueller, G. Pietramellara, "The role of death and lysis of microbial and plant cells in the formation of soil organic matter," *Soil Biol. Biochem.*, vol. 204, pp. 109750, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2025.109750>.