

Analisis Senyawa Organik Volatil di Perairan Sedati, Sidoarjo, Jawa Timur

Ade Yamindago*, Defri Yona, Amalia Izzy Farhaninur

Program Studi Ilmu Kelautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Brawijaya
Jl. Veteran, Ketawanggede, Kec. Lowokwaru, Kota Malang, Jawa Timur 65145 Indonesia
Email: adeydamago@ub.ac.id

Abstrak

Senyawa organik volatil atau *volatile organic compounds* (VOC) adalah kelompok senyawa yang sering ditemukan di lingkungan perairan yang memiliki dampak negatif pada ekosistem dan kesehatan manusia. Keberadaan VOC di perairan dapat disebabkan oleh produksi dan penggunaan senyawa ini secara berkepanjangan. Sungai Sedati terletak di daerah perkotaan telah menerima masukan senyawa ini dari kegiatan rumah tangga, bahan baku industri, pertanian dan budidaya perikanan. Pendeteksian VOC di badan dan muara Sungai Sedati dilakukan menggunakan *Solid Phase Microextraction* (SPME) dan *Gas Chromatography-Mass Spectrometry* (GCMS). Selain itu, penelitian ini juga mengevaluasi kualitas perairan berupa pH, DO, salinitas, suhu, dan arus. Total 39 senyawa diperoleh dari Perairan Sedati, dimana senyawa-senyawa tersebut digunakan sebagai bahan kimia industri, bahan kimia farmasi, produk pembersih, produk perawatan pribadi, *plasticizer*, dan pestisida. Penggunaan tertinggi sebanyak 17 senyawa digunakan sebagai bahan kimia industri dan tujuh senyawa sebagai pestisida. Cemaran VOC didominasi oleh fenol (2,4-di-tert-butilfenol; 3,5-di-tert-butilfenol). Analisis kualitas air menunjukkan bahwa kualitas Perairan Sedati masih dalam ambang batas baku mutu air sungai kelas III dan baku mutu air laut. Penelitian ini memberikan informasi mengenai potensi dampak VOC, dan pentingnya pengelolaan limbah perkotaan yang lebih berkualitas untuk ekosistem perairan dan kesehatan manusia.

Kata kunci : bahan kimia industri, senyawa pencemar air, pestisida, *volatile organic compound*, GCMS

Abstract

Analysis of Volatile Organic Compounds in Sedati Water, Sidoarjo, Jawa Timur

Volatile organic compounds (VOCs) are a group of chemicals that are frequently detected in aquatic environments, and show negative impacts on ecosystem and human health. The existence of VOCs in the waters may be obtained from their massive production and application. The Sedati River is located in an urban area that has received impacts from household activities, industrial raw materials, agriculture, and aquaculture. The detection of VOCs in the body and the river mouth of Sedati River was determined by Solid Phase Microextraction (SPME) and Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GCMS). Water quality of the Sedati River was evaluated, namely pH, DO, salinity, temperature, and water current. A total of 39 compounds were detected in the Sedati River. Most of them were used in industrial chemicals, pharmaceutical chemicals, cleaning products, personal care products, plasticizers, and pesticides. 17 compounds were highly used as industrial chemicals, whereas seven compounds were lowly used as pesticides. The phenol (2,4-Di-tert-butylphenol; 3,5-Di-tert-butylphenol) was a dominant compound in the Sedati River. The water quality was in agreement with the water quality standards. This study provides information about the impacts of VOC in the water and the importance of water quality treatments for healthy ecosystems and humans.

Keywords: industrial chemicals, aquatic pollution, pesticide, volatile organic compounds, GCMS

PENDAHULUAN

Keberadaan mikropolutan organik menjadi sumber polusi yang signifikan yang dapat

menimbulkan kekhawatiran bagi manusia dan kesehatan ekosistem (Wu *et al.*, 2019). Mikropolutan organik adalah kelompok bahan kimia dengan

*Corresponding author

DOI:10.14710/buloma.v13i2.53109

<http://ejournal.undip.ac.id/index.php/buloma>

Diterima/Received : 17-03-2023

Disetujui/Accepted : 21-03-2024

konsentrasi dalam kisaran $\mu\text{g/L}$ hingga ng/L (Pathak *et al.*, 2020). Kelompok senyawa kimia ini tidak terdapat pada peraturan kualitas air karena konsentrasinya sangat rendah, tetapi dianggap berpotensi menjadi ancaman bagi lingkungan (Arslan *et al.*, 2017). Sebagian besar mikropolutan organik berasal dari sumber rumah tangga yang dilepaskan dan memasuki ekosistem perairan (Gautam & Anbumani, 2020).

Senyawa organik volatil (*Volatile Organic Compound, VOC*) adalah salah satu polutan organik yang paling sering ditemukan di dalam air. Senyawa ini telah terdeteksi dalam perairan alami, air limbah, dan air minum (Dettenrieder *et al.*, 2020). Istilah VOC mengacu pada sekelompok bahan kimia dengan tekanan uap tinggi, bersifat lipofilik dan reaktivitasnya rendah (Anand *et al.*, 2014). Cemaran VOC dilepaskan ke lingkungan karena volume produksi tinggi dan penggunaan berbagai keperluan dalam produk rumah tangga dan industri, seperti cat, desinfektan, pestisida, karet sintesis, resin dan lainnya (Li *et al.*, 2021). Beberapa komponen VOC memiliki efek berbahaya bagi organisme akuatik dan manusia (Qin *et al.*, 2019). Polutan organik berlebih yang bersifat persisten dapat terakumulasi di lingkungan dan jaringan lemak, mempengaruhi perilaku, dan habitat bagi berbagai spesies (Chinnadurai *et al.*, 2021). Beberapa VOC bersifat mutagenik, genotoksik, neurotoksik, dan karsinogenik (Li *et al.*, 2021).

Informasi mengenai keberadaan polutan organik dapat diperoleh dengan teknik analisis yang tepat dan akurat. Salah satunya yaitu metode *Gas Chromatography Mass Spectrometry* (GCMS). Analisis GCMS sangat memerlukan teknik persiapan sampel untuk mengisolasi analit sampel (ekstraksi), menghilangkan senyawa (pembersihan), serta mengidentifikasi dan mengukur analit yang diinginkan (Salvatierra-stamp *et al.*, 2018). Beberapa teknik ekstraksi sampel yang telah dikembangkan, seperti *solid-phase extraction* (SPE), *stir bar sorptive extraction* (SBSE), maupun *solid-phase microextraction* (SPME). SBSE dan SPME dianggap sebagai alternatif yang baik dari SPE karena prosedurnya yang sederhana, bersih dan ramah lingkungan (Gilart *et al.*, 2013). Penggunaan metode GCMS dengan ekstraksi SPME sangat efektif dalam menganalisis kontaminan VOC dalam air.

Kekhawatiran mengenai keberadaan polutan organik di lingkungan perairan, terutama sungai menjadi permasalahan yang serius (Vlachogianni *et al.*, 2013). Kabupaten Sidoarjo memiliki beberapa

aliran sungai yang dimanfaatkan, salah satunya yaitu sungai yang berada di Kecamatan Sedati. Sepanjang sungai terdapat pemukiman, pertanian, industri, dan tambak. Pada bagian muaranya digunakan sebagai tempat tangkapan ikan dan kerang kupang.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kandungan senyawa kimia dan yang ditemukan di Perairan Kabupaten Sidoarjo beserta potensi pemanfaatannya. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk mengevaluasi kualitas air di perairan ini. Penelitian ini penting dilakukan mengingat Kabupaten Sidoarjo merupakan salah satu Satuan Wilayah Pengembangan (SWP) Gerbang Kertosusila dimana perkembangan pertumbuhan penduduk dan industri yang sangat pesat sehingga kawasan metropolitan ini berpotensi menghasilkan limbah domestik besar yang dapat mengganggu kelestarian ekologis (Santoso *et al.*, 2021). Masyarakat yang tinggal di sekitar sungai memanfaatkannya untuk kegiatan sehari-hari dan transportasi. Polusi dari pembuangan limbah kota, industri, dan pertanian di lokasi ini diduga menyebabkan degradasi lingkungan sungai. Berdasarkan permasalahan tersebut, perlu dilakukan penelitian ini untuk mengetahui tingkat pencemaran komponen polutan organik kelompok VOC menggunakan analisis GCMS SPME di daerah aliran sungai Kecamatan Sedati, Sidoarjo.

MATERI DAN METODE

Sampel air diambil dari dua stasiun yaitu di badan sungai (Stasiun 1) yang padat penduduk ($7^{\circ}21'56.5''\text{S}$ $112^{\circ}48'28.1''\text{T}$) dan muara sungai (Stasiun 2) ($7^{\circ}19'24.70''\text{S}$ $112^{\circ}50'23.60''\text{T}$), Kecamatan Sedati, Kabupaten Sidoarjo. Metode pengambilan sampel menggunakan uji gabungan tempat (*integrated sample*) (SNI 6989.59:2008) yaitu 1 liter sampel air dari 3 titik setiap stasiun disatukan, kemudian dimasukkan ke dalam botol kaca gelap serta dimasukkan ke dalam *cool box* untuk analisis dengan metode SPME-GCMS.

Analisis kualitas air dilakukan pada saat pengambilan sampel berlangsung. Kualitas air yang diukur antara lain suhu, pH, salinitas, DO dan arus sesuai Standar Nasional Indonesia (SNI) Tahun 2005. Sampel air yang telah diperoleh kemudian disentrifugasi (6000 rpm; 1 menit; suhu $24,5^{\circ}\text{C}$) dan dilanjutkan dengan filtrasi dengan membran filter (nylon; $0,22\ \mu\text{m}$). Sebanyak 5 mL sampel dan 2 g NaCl dimasukkan dalam vial yang tertutup rapat kemudian diaduk pada suhu $50 \pm 2^{\circ}\text{C}$ selama 30 menit. Setelah itu, sampel didiamkan pada suhu kamar selama 10 menit, selanjutnya dilakukan

absorpsi SPME selama 30 menit pada suhu ruang (Ming-Yue *et al.*, 2020). Desorpsi SPME dilakukan pada suhu 270°C selama 5 menit. Senyawa kimia yang teridentifikasi kemudian dikelompokkan berdasarkan grup senyawanya dan dianalisis sumber penggunaannya.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian kualitas perairan pada penelitian ini meliputi parameter fisika dan kimia. Hasil pengukuran kualitas air di badan sungai (Stasiun 1) dan muara sungai (Stasiun 2) terdapat pada Tabel 1.

Pengukuran parameter suhu air pada kedua stasiun menunjukkan bahwa tidak adanya perbedaan cukup jauh atau dapat dikatakan relatif stabil yakni rata-rata berkisar 31,63 ±0,3°C pada Stasiun 1 dan berkisar 30,5±0°C pada Stasiun 2. Temperatur air mempengaruhi secara langsung toksisitas banyaknya bahan kimia pencemar, pertumbuhan mikroorganisme, dan virus (Suryana, 2013). Peningkatan suhu air dapat menurunkan jumlah oksigen terlarut, mempercepat reaksi serta mengganggu kehidupan organisme (Ningrum, 2018).

Hasil pengukuran pH menunjukkan nilai rata-rata berkisar 7,2±0,1 pada Stasiun 1 dan 7,6±0 pada Stasiun 2. Hal ini dapat diketahui bahwa pH di Sungai Sedati masih dalam standar baku mutu. Nilai pH pada Stasiun 1 dan Stasiun 2 dipengaruhi terhadap masukan senyawa organik. Menurut Komala *et al.* (2019), penurunan pH menandakan adanya peningkatan aktivitas mikroba untuk menguraikan bahan organik sehingga O₂ menurun sementara CO₂ meningkat. Peningkatan CO₂ ini dapat menyebabkan pH turun.

Hasil pengukuran DO menunjukkan nilai rata-rata pada Stasiun 1 yaitu 5,7±0,2 mg/L dan Stasiun 2 sebesar 6,8±0,3 mg/L. Nilai DO di Stasiun 1 lebih rendah disebabkan karena lokasinya berada di kawasan penduduk dan terdapat banyak saluran drainase yang menuju sungai, sedangkan pada

Stasiun 2 nilai DO lebih tinggi dapat dikarenakan masukan bahan organik yang lebih rendah. Hal ini sesuai dengan pendapat Zammi *et al.* (2018) bahwa limbah organik dari aktivitas domestik dapat mempengaruhi nilai DO karena adanya proses degradasi dan dekomposisi oleh bakteri aerob menggunakan oksigen dalam air, sehingga oksigen terlarut menjadi berkurang.

Hasil pengukuran salinitas menunjukkan nilai rata-rata pada Stasiun 1 yaitu 2±0 ppt dan Stasiun 2 yaitu 14,3±0,6 ppt. Perbedaan nilai salinitas pada kedua stasiun ini karena perbedaan lokasi. Stasiun 1 merupakan area sungai sehingga nilai salinitas rendah karena masukan daratan lebih dominan, sedangkan Stasiun 2 merupakan daerah muara sungai sehingga pengaruh dari air laut lebih dominan. Menurut Sidabutar *et al.* (2019), salah satu faktor yang mempengaruhi nilai salinitas yaitu adanya pengaruh dari daratan seperti pencampuran dengan air tawar dari daratan.

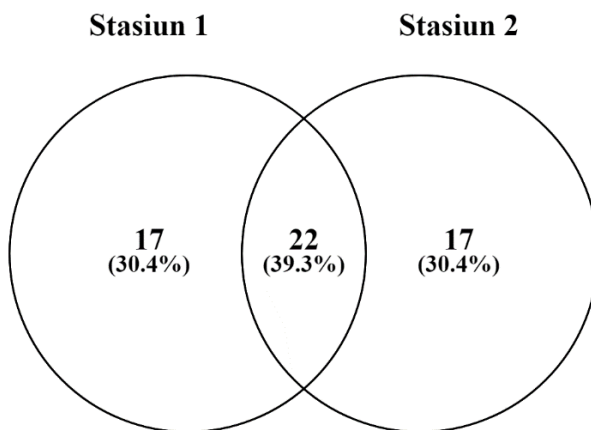
Hasil pengukuran kecepatan arus dari badan sungai (Stasiun 1) menuju ke muara sungai (Stasiun 2) cenderung melambat dikarenakan semakin menuju muara lebar sungai bertambah sehingga menyebabkan air tersebar merata dan arus cenderung lambat. Penyebabnya seperti dijelaskan oleh Sihalong (2018) bahwa arus dapat mempengaruhi perpindahan senyawa organik dalam perairan. Input bahan organik dimulai dari sungai yang memiliki aktivitas pemukiman penduduk yang padat, aktivitas perkotaan dan industri yang dibuang ke sungai dan terbawa oleh arus menuju muara.

Identifikasi Jenis *Volatile Organic Compound*

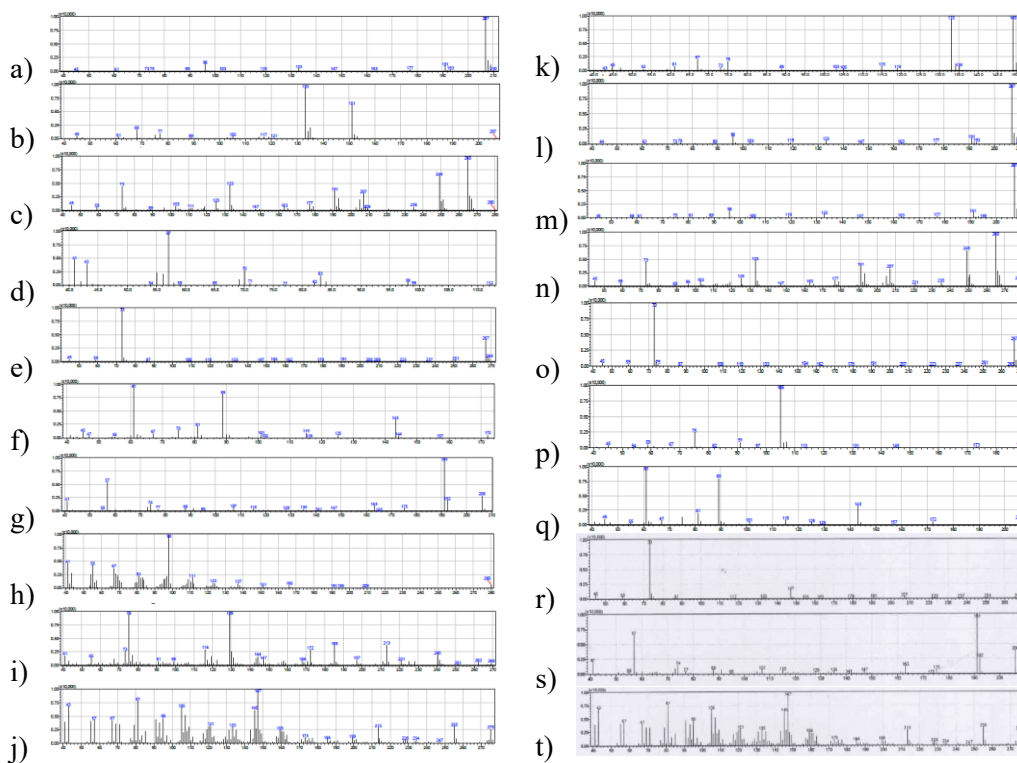
Analisis GCMS SPME telah mengidentifikasi sebanyak 39 senyawa kimia pada sampel air di masing-masing stasiun. Berdasarkan kedua stasiun tersebut, terdapat 22 (39,3%) senyawa kimia yang sama. Hasil identifikasi senyawa organik volatil di Stasiun 1 dan 2 terdapat pada Gambar 1.

Tabel 1. Parameter Kualitas Air di badan dan muara Sungai Sedati

No	pH	Salinitas (ppt)	Suhu (°C)	DO (mg/L)	Arus (m/s)
1a	7,2±0,1	2±0	31,6±0,3	5,7±0,2	0,1±0
2b	7,6±0	14,3±0,6	30,5±0	6,8±0,3	0,2±0
Ic	6-9	-	-	3	-
IId	7-8,5	34	32	>5	-



Gambar 1. Diagram Hasil Senyawa Organik Volatil di Badan (Stasiun 1) dan Muara (Stasiun 2) Sungai Sedati



Gambar 2. Data Kromatogram Persentase Similaritas 62 - 97%: (a) Cyclotrisiloxane; (b) Oxime methoxy phenyl; (c, n) Tetrakis; (d) 2-Ethylhexanol; (e, o) Cyclopentasiloxane; (f, q) 1-Bromocyclohexane; (g) 2,4-Di-tert-butylphenol; (h) 13-Hexyloxacyclotridec; (i) Androst-5-en-16-one; (j, t) 3-Bromocholest-5-ene; (k) 4-(Dimethoxymethyl); (l, m) Cyclotrisiloxane; (p) Silane; (r) 1,2-Bis(trimethylsilyloxy)ethane; (s) 3,5-Di-tert-butylphenol

Keseluruhan senyawa yang diperoleh terdapat 10 senyawa dominan di masing-masing stasiun. Senyawa dominan dilihat dari nilai persen area yang paling tinggi dari senyawa lain. Semakin

tinggi persen area, maka konsentrasi senyawa juga tinggi. Kromatogram senyawa kimia dominan terdapat pada Gambar 2. Kromatogram senyawa dominan telah dikonfirmasi berdasarkan *data base*

senyawa kimia dalam *mass spectrometer* dengan persentase similaritas sebesar 62-97%. Komponen senyawa kimia dari hasil analisis GCMS dapat diklasifikasikan sebagai senyawa yang dianggap berbahaya berdasarkan *material safety data sheet* (MSDS).

Cemaran *2,4-di-tert-butylphenol* merupakan senyawa yang cukup persisten di perairan, karena nilai biodegradabilitas yaitu 60% yang artinya tidak mudah terurai secara hayati. Senyawa ini dapat terakumulasi dalam ikan *Leuciscus idus* (*Golden orfe*), pengujian selama 3 hari dengan konsentrasi yang terakumulasi adalah 50 µg/L (Sigma-aldrich, 2021). Senyawa ini juga dapat terjadi secara alami di perairan dari reaksi metabolisme bakteri dan mikroorganisme laut. Meskipun demikian, *2,4-di-tert-butylphenol* yang berasal dari hasil sintesis laboratorium diduga berbahaya jika berada di lingkungan perairan. Senyawa fenol dan turunan fenolik adalah bahan kimia yang berpotensi sebagai *Endocrine Disrupting Chemical* (EDC) (Sari *et al.*, 2012).

Senyawa *2-Ethylhexanol* atau DEHP memiliki efek berbahaya dalam jangka panjang. Paparan DEHP pada manusia dapat mempengaruhi sistem reproduksi, perkembangan embrio dan bersifat karsinogenik. Efek DEHP dan metabolitnya berdampak pada organ vital seperti jantung, ginjal, dan sistem reproduksi pada hewan (Stamatelatos *et al.*, 2011). Potensi DEHP untuk terurai sebagian besar dalam periode 28 hari. Penelitian ekotoksikologi menunjukkan nilai LC₅₀ 48 jam pada ikan *Leuciscus idus* adalah 23 mg/l dengan nilai biodegradabilitas >60% (Interatlas, 2021).

Cemaran *1-Dodecanol* bersifat toksik bagi kehidupan akuatik dengan efek jangka panjang. Pengujian toksisitas oral akut dari *1-Dodecanol* terhadap ikan *Pimphales promelas* cukup rendah, LC₅₀ 96 jam adalah 1,01 mg/L. *1-Dodecanol* sangat beracun bagi sejumlah organisme akuatik pada konsentrasi 1 mg/l atau lebih rendah. Model Mackay I memprediksi besaran penyebaran senyawa ini yaitu udara 67,43%, air 1,51%, tanah 16,07% dan sedimen 15,00%. Konsentrasi terlarut senyawa ini terbatas karena cukup cepat terdegradasi dalam kondisi aerobik (Pasdaran *et al.*, 2016).

Senyawa non dominan lain tetapi tidak persisten adalah *1-Eicosanol*. Senyawa ini dapat terdegradasi sebesar 48% dalam 28 hari. *1-Eicosanol* memiliki potensi bioakumulasi yang rendah di lingkungan. Pengujian pada vertebrata

air menghasilkan nilai LC₅₀ 96 jam adalah 0,4 mg/L. Sifat fisik-kimia dari *1-Eicosanol* membuat konsentrasi terlarut dalam kolom air terbatas sehingga tidak menunjukkan efek dari pengujian toksisitas akut (EPA, 2020)

Diethyl phthalate atau DEP (nama IUPAC: *1,2-Benzenedicarboxylic acid, diethyl ester*) diperkirakan sekitar 1% berasal dari bahan plastik yang kontak langsung dengan air atau cairan lain yang dilepaskan ke perairan. *Diethyl phthalate* dapat diserap oleh lipid organisme akuatik. Waktu paruh DEP dalam jaringan ikan berkisar antara 1 hingga 2 hari. Biodegradasi aerobik dietil ftalat menunjukkan bahwa waktu paruh senyawa di perairan mulai dari beberapa hari sampai beberapa minggu (WHO, 2013).

Diethylhexyl adipate atau DEHA (nama IUPAC: *Hexanedioic acid, bis(2-ethylhexyl) ester*) sangat beracun bagi beberapa spesies, salah satunya ikan *Oncorhynchus mykiss* (rainbow trout) pada pengujian toksisitas akut 96 jam terkena konsentrasi DEHA mulai dari 54-420 mg/L dengan kematian 30-55%. Degradasi abiotik DEHA dapat terjadi melalui fotolisis maupun hidrolisis dan terjadi cukup cepat. Waktu paruh biodegradasi DEHA dalam air secara signifikan kurang dari 182 hari (CEPA, 2011)

Jenis VOC di Badan Sungai Sedati

Sebanyak 39 kontaminan di Stasiun 1 dianalisis secara kualitatif dan dikelompokkan. Hasil kontaminan VOC Stasiun 1 mengidentifikasi sebanyak 14 senyawa terdapat pada Tabel 2.

Golongan senyawa yang paling dominan di Stasiun 1 adalah *fatty alcohol*. Produksi *fatty alcohols* mencapai \$5,2 miliar pada tahun 2011 melalui hidrogenasi katalitik (Fillet *et al.*, 2015). *Fatty alcohol* digunakan secara luas sebagai bahan baku penting dalam industri kimia untuk produk konsumen seperti deterjen, pelumas, plastik dan kosmetik (Valoppi *et al.*, 2018). Golongan VOC lainnya yang dominan adalah *carboxylic acid*. Asam karboksilat dapat terjadi secara alami dalam siklus hidup (siklus Krebs organisme hidup; fermentasi, dan proses geologi) atau diproduksi di laboratorium (sintesis). Asam karboksilat berperan di bidang kedokteran, pertanian, farmasi, makanan, dan industri lainnya (Badea & Radu, 2018).

Komposisi senyawa kimia yang teridentifikasi di Stasiun 1 terdapat pada Gambar 3. Senyawa kimia dengan komposisi tertinggi adalah *phenol, 2,4-Bis(1,1-Dimethylethyl)* sebanyak 69,02%. Keberadaan senyawa fenol dapat terjadi

karena limbah pabrik di daerah sekitar seperti pabrik plastik dan tekstil yang berada di Kecamatan Waru. Penyebab lainnya adalah adanya aktivitas transportasi yang cukup tinggi. Buangan limbah rumah tangga di lokasi ini juga berperan penting dalam keberadaan bahan organik. Hal ini dapat dilihat dengan ditemukan senyawa *citronella*. *Citronella* merupakan senyawa kimia yang banyak digunakan dalam produk rumah tangga. Bahan kimia ini berasal dari hasil penyulingan tanaman rumput Asia dalam genus *Cymbopogon* untuk produk minyak sereh wangi seperti aromaterapi karena memberikan aromatik (bau menyenangkan) dan memiliki aktivitas antimikroba terhadap bakteri (Wany *et al.*, 2013). *Citronella* digunakan di kalangan masyarakat sebagai essential oil untuk produk obat anti nyamuk, flavoring agent, wewangian, obat-obatan serta bahan dasar kosmetik (Bota *et al.*, 2015).

Jenis VOC di Muara Sungai Sedati

Berdasarkan analisis keseluruhan senyawa, 14 kontaminan VOC yang dapat diidentifikasi. Senyawa kimia hasil analisis GCMS-SPME Stasiun 2 terdapat pada Tabel 3.

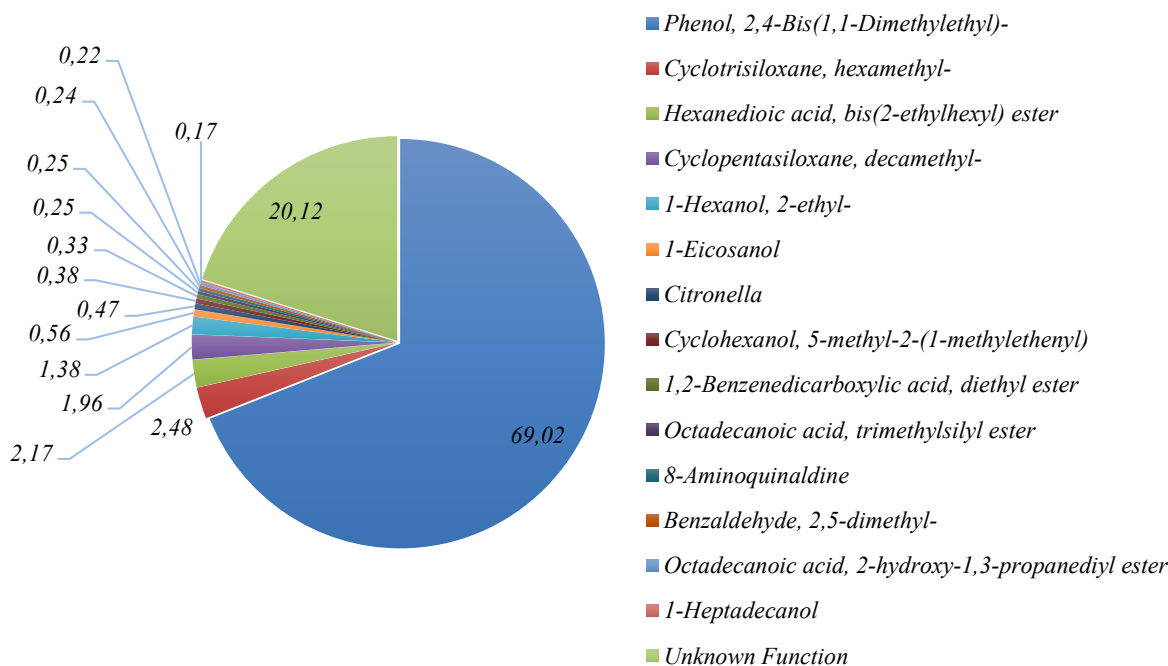
Golongan senyawa dominan di Stasiun 2 ialah fatty alcohol. Selain itu, golongan siloxane juga golongan yang dominan, seperti

Cyclopentasiloxane, Cyclotrisiloxane, dan Cyclotetrasiloxane. Siloxane adalah bahan kimia bervolume produksi tinggi sebesar 45.227 ribu ton di seluruh dunia, sehingga kemungkinan akan dibuang ke sistem pembuangan limbah dan berakhir di lingkungan perairan (Chavoshani *et al.*, 2020).

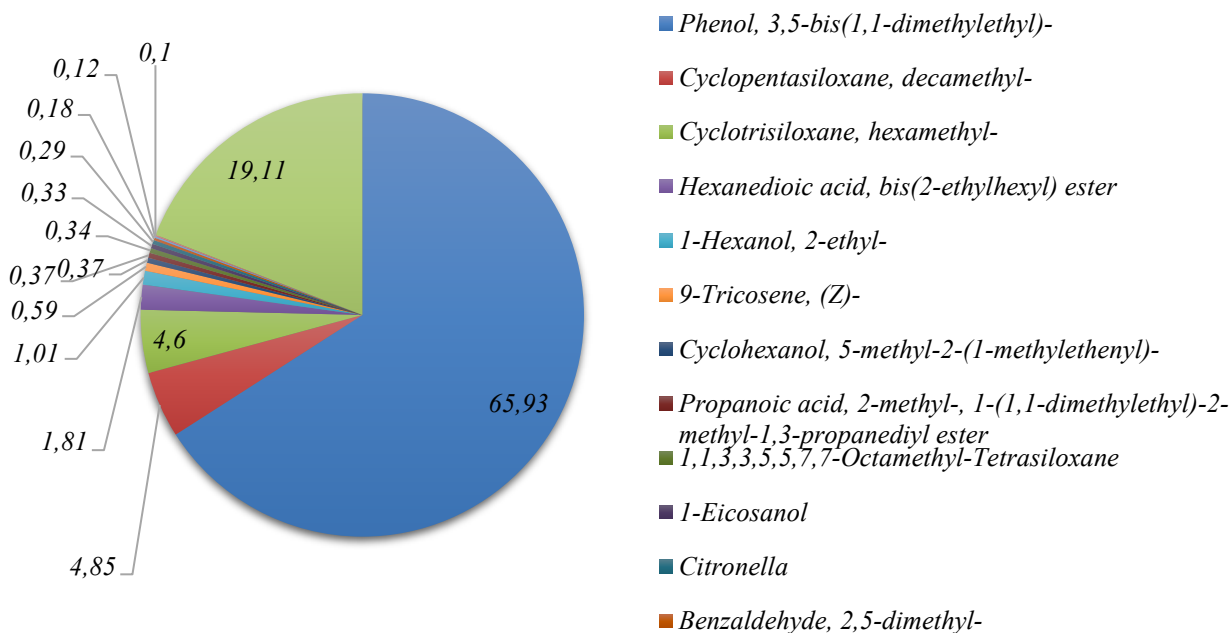
Komposisi senyawa kimia yang terdeteksi di Stasiun 2 ditunjukkan pada Gambar 4. Senyawa fenol juga ditemukan pada Stasiun 2, tetapi dalam struktur senyawa yang berbeda yaitu 3,5-*bis*(1,1-*dimethylethyl*) atau dikenal dengan nama 3,5-*Di-tert-butylphenol*. Hal ini dapat terjadi karena senyawa fenol dapat mengalami degradasi maupun transformasi. Degradasi fenol dapat terjadi secara alamiah oleh cahaya matahari (fotodegradasi), tetapi berlangsung lambat, sehingga mengakibatkan proses akumulasinya lebih cepat daripada proses degradasinya (Wijana *et al.*, 2020). Senyawa fenol dapat bertransformasi lebih berbahaya dari pada senyawa asli karena interaksinya secara fisika, kimia dan biologis atau faktor mikroba dalam air (Marganingrum *et al.*, 2013). Senyawa fenol telah dinyatakan sebagai polutan prioritas oleh US *Environmental Protection Agency* (EPA) dan *National Pollutant Release Inventory* (NPRI) Kanada (Villegas *et al.*, 2016).

Tabel 2. Kelompok Senyawa VOC di muara Sungai Sedati

Nama Senyawa	Kelompok
Phenol, 3,5- <i>bis</i> (1,1- <i>dimethylethyl</i>)-	Carbolic Acid
Cyclopentasiloxane, decamethyl-	Siloxanes
Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Siloxanes
Hexanedioic acid, <i>bis</i> (2-ethylhexyl) ester	Carboxylic Acid
1-Hexanol, 2-ethyl-	Fatty Alcohols
9-Tricosene, (<i>Z</i>)-	Hydrocarbons
Cyclohexanol, 5-methyl-2-(1-methylethenyl)-	Monoterpena
Propanoic acid, 2-methyl-, 1-(1,1- <i>dimethylethyl</i>)-2-methyl-1,3-propanediyl ester	Ester
1,1,3,3,5,5,7,7-Octamethyl-Tetrasiloxane	Siloxanes
1-Eicosanol	Fatty Alcohols
Citronella	Monoterpena
Benzaldehyde, 2,5-dimethyl-	Aldehydes
1-Dodecanol	Fatty Alcohols
1,2-Benzenedicarboxylic acid, <i>bis</i> (2-ethylhexyl) ester	Carboxylic Acid



Gambar 3. Diagram Komposisi VOC di Badan Sungai Sedati



Gambar 4. Diagram Komposisi VOC di Muara Sungai Sedati

Senyawa dengan komposisi terendah di Stasiun 2 sebesar 0,1% yaitu 1,2-Benzenedicarboxylic acid, bis(2-ethylhexyl) ester atau dikenal Diethylhexyl phthalate (DEHP)

merupakan ester ftalat, cairan berminyak yang tidak berwarna dengan sedikit bau (PubChem, 2021). Sekitar 95% DEHP yang dihasilkan digunakan sebagai plasticizer dalam resin polivinil

klorida (PVC) untuk membuat produk plastik lebih fleksibel (NTP, 2016). Berdasarkan informasi EPA (2019), volume produksi *di-ethylhexyl phthalate* dilaporkan telah mencapai 100 juta hingga 250 juta pound pada tahun 2015, sehingga senyawa ini ditetapkan sebagai zat prioritas tinggi pada bulan Desember 2019.

Sumber Penggunaan VOC

Keseluruhan kontaminan VOC dapat dikelompokkan berdasarkan sumber penggunaannya. Kelompok pemanfaatan VOC yang diidentifikasi dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 5.

Pestisida

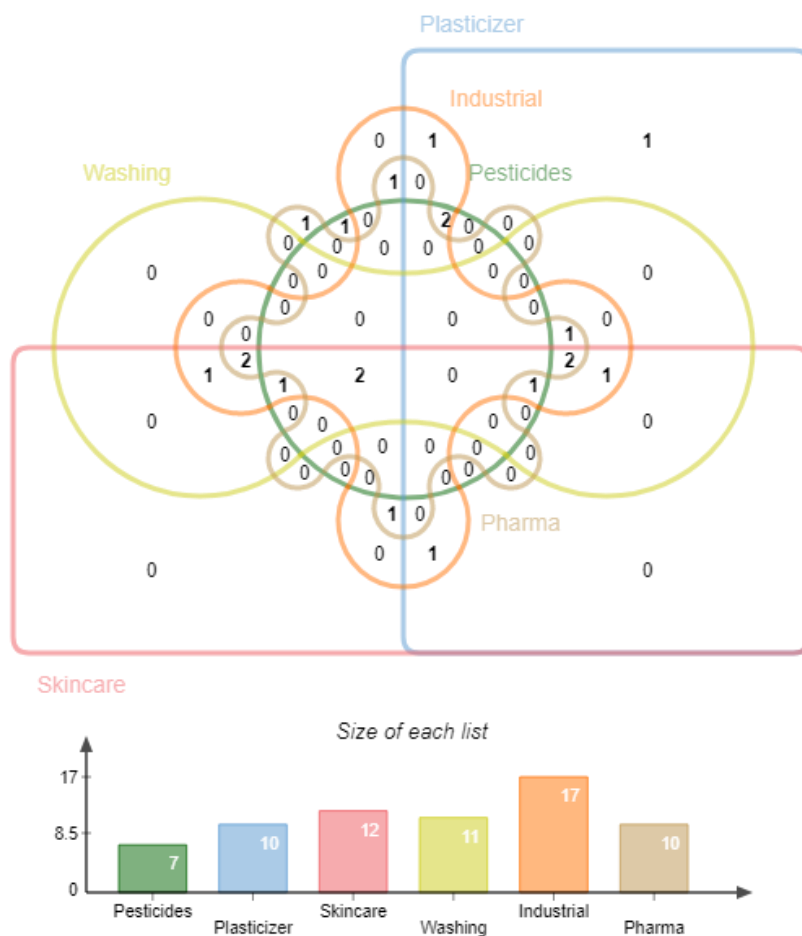
Senyawa kimia digunakan dalam aktivitas pertanian sebagai penyusun beberapa produk pengendalian hama. Senyawa tersebut antara lain, seperti *2,4-Di-tert-butylphenol*; *3,5-Di-tert-*

butylphenol; *Cyclopentasiloxane*; *1-Hexanol*, *2-ethyl*; *1-Eicosanol*; *9-Tricosene*, (*Z*); *1-Dodecanol* (Xue *et al.*, 2019; Guo *et al.*, 2020; Zeng *et al.*, 2020).

Senyawa tersebut berperan sebagai feromon atau penarik serangga pada produk seperti perangkap dan strip “kertas lalat” untuk menarik lalat jantan dan mencegah mereka kawin (EPA, 1994). Berdasarkan *Material Safety Data Sheet* (MSDS), beberapa senyawa tersebut diketahui sangat beracun bagi kehidupan akuatik pada efek jangka panjang seperti *1-Eicosanol* dan *1-Dodecanol*.

Plasticizer

Penambahan zat sintetis ini bertujuan untuk meningkatkan kinerja dan daya tahan produk, serta membantu menjaga fleksibilitas (Weaver *et al.*, 2020). Senyawa tersebut antara lain, seperti *2,4-Di-tert-butylphenol*; *3,5-Di-tert-butylphenol*; *Hexane-dioic acid*, *bis(2-ethylhexyl)* atau Dietilheksil



Gambar 5. Sumber Penggunaan VOC di Sungai Sedati

adipat (DEHA); 1-Hexanol, 2-ethyl; Cyclohexanol, 5-methyl-2-(1-methylethenyl); 1,2-Benzenedicarboxylic acid, diethyl ester atau Diethyl Phthalate (DEP); 1-Heptadecanol; 1,2 Benzenedicarboxylic acid, bis(2-ethylhexyl) ester atau diethylhexyl phthalate (DEHP); Propanoic acid, 2-methyl-, 1-(1,1-dimethylethyl)-2-methyl-1,3-propanediyl ester; Cyclotetrasiloxane.

Pada industri plastik, senyawa tersebut banyak digunakan dalam produk-produk *flexible polyvinylchloride* (PVC) seperti tas atau kemasan makanan (Canada, 2013). Produk plastik yang dihasilkan dengan bantuan zat sintetis ini antara lain pelapis furnitur, tirai *shower*, selang taman, pelapis kolam renang, jas hujan, tabung medis, dan kantong penyimpanan darah (PubChem, 2021).

Skincare, Kosmetik, Produk Perawatan Pribadi

Penambahan senyawa kimia bertujuan untuk mendapatkan kualitas produk yang diinginkan seperti lembap, tidak berbau, tidak berwarna, dan rasanya yang halus. Senyawa tersebut antara lain, seperti *Cyclotrisiloxane*; *Cyclotetrasiloxane*; *Cyclopentasiloxane*; *Hexanedioic acid, bis(2-ethylhexyl) ester*; 1-Hexanol, 2-ethyl; 1-Eicosanol; *Citronella*; 1,2-Benzenedicarboxylic acid, diethyl ester; *Octadecanoic acid, trimethylsilyl ester*; *Octadecanoic acid, 2-hydroxy-1,3-propanediyl ester*; 1-Heptadecanol; 1-Dodecanol (Johnson *et al.*, 2011; Magano *et al.*, 2008).

Senyawa tersebut berperan sebagai pelarut organik, agen pengkondisi, emolien (pelembab) dalam produk perawatan pribadi seperti *body lotion*, krim wajah, *make-up* wajah, deodoran, dan tabir surya (Zhen *et al.*, 2015). *Cyclic Siloxanes* (D3, D4, D5) umum digunakan karena memberikan kemudahan aplikasi, sifat sensorik yang diinginkan dan ketahanan. Bahan *siloxane* yang spesifik seperti *cyclopentasiloxane* menunjukkan bahwa bahan ini telah sengaja ditambahkan sebagai komponen untuk formulasi (Brothers *et al.*, 2017).

Produk Pembersih

Berbagai produk pembersih sering kali di produksi dengan penambahan berbagai zat sintetis. Senyawa tersebut antara lain seperti, *Cyclotrisiloxane*; *Cyclotetrasiloxane*; *Cyclopentasiloxane*; 1-Hexanol, 2-ethyl; 1-Eicosanol; *Citronella*; *Cyclohexanol, 5-methyl-2-(1-methylethenyl)*; 1,2-Benzenedicarboxylic acid, diethyl ester; *Octadecanoic acid, trimethylsilyl ester*; 1-Heptadecanol; 1-Dodecanol (Johnson *et*

al., 2011). Salah satu senyawa yang ditemukan adalah 1-Hexanol, 2-ethyl berperan dalam produk rumah tangga seperti sabun toilet, perlengkapan mandi, pembersih rumah tangga dan deterjen. 1-Heptadecanol berperan sebagai zat antibakteri dan digunakan dalam produk sabun dan cairan pembersih (Aminingsih *et al.*, 2012).

Bahan Kimia Industri

Penambahan senyawa kimia sangat umum dilakukan dalam kegiatan industri. Senyawa tersebut antara lain, seperti 2,4-Di-*tert-butylphenol*; 3,5-Di-*tert-butylphenol*; *Cyclotrisiloxane*; *Cyclotetrasiloxane*; *Cyclopentasiloxane*; *Hexanedioic acid, bis(2-ethylhexyl) ester*; 1-Hexanol, 2-ethyl; 1-Eicosanol; *Citronella*; *Cyclohexanol, 5-methyl-2-(1-methylethenyl)*; 1,2-Benzenedicarboxylic acid, diethyl ester; *Octadecanoic acid, trimethylsilyl ester*; *Benzaldehyde, 2,5-dimethyl*; *Octadecanoic acid, 2-hydroxy-1,3-propanediyl ester*; 1-Heptadecanol; 1-Dodecanol; 1,2-Benzene-dicarboxylic acid, bis(2-ethylhexyl) ester (EPA, 2020; Zeng *et al.*, 2020; SiseinEboh dan Robert, 2022).

Beberapa bahan kimia ditambahkan sebagai *finishing agents* di industri tekstil dan kulit, *sealant* dalam pembuatan perekat, produk tinta cetak, pewarna, cat, pelumas, serta produk karet. Zat sintetis dalam kegiatan industri sangat tinggi dan berkelanjutan, sehingga dapat mencapai batas konsentrasi dan menimbulkan dampak buruk (Greve *et al.*, 2014).

Produk Farmasi

Beberapa senyawa yang ditemukan digunakan untuk aplikasi biomedis dan juga telah disetujui sebagai bahan aktif dan non-aktif dalam obat-obatan. Produk medis lainnya seperti pelapis enterik pada tablet dan bahan cetak gigi (Yuniarsih *et al.*, 2023). Senyawa tersebut antara lain, seperti *Cyclotetrasiloxane*; *Cyclopentasiloxane*; *Cyclohexanol, 5-methyl-2-(1-methylethenyl)*; 1,2-Benzenedicarboxylic acid, diethyl ester; *Octadecanoic acid, trimethylsilyl ester*; 8-Aminoquinoline; *Citronella Benzaldehyde, 2,5-dimethyl*; *Octadecanoic acid, 2-hydroxy-1,3-propanediyl ester*; 1-Dodecanol.

Salah satu senyawa yang ditemukan adalah *Cyclohexanol, 5-methyl-2-(1-methylethenyl)* atau *isopulegol* sebagai senyawa antara dalam pembuatan *menthol* dan digunakan di dunia *green medicine* (Nuryanti *et al.*, 2019). Selain itu terdapat *Octadecanoic acid, 2-hydroxy-1,3-propanediyl*

ester atau *Glyceryl 1,3-distearate* sebagai produksi tablet dan krim (Drugs, 2020). Senyawa obat 8-*Aminoquinoline* adalah kelompok senyawa *aminoquinoline* sebagai antimalaria sintetik pertama yang diperkenalkan ke dunia kedokteran (Aronson, 2016).

KESIMPULAN

Sebanyak 39 VOC ditemukan pada masing-masing stasiun. Senyawa fenol merupakan senyawa dominan yang ditemukan di Sungai Sedati dan Muara Sungai Sedati. Pengelompokan VOC menunjukkan sumber penggunaan tertinggi sebagai bahan kimia industri, sementara sumber penggunaan terendah sebagai pestisida. Penelitian ini memberikan informasi bahwa pengolahan limbah industri yang menggunakan senyawa VOC tidak dilakukan dengan baik sehingga mencemari perairan.

DAFTAR PUSTAKA

- Anand, S.S., Philip, B.K. & Mehendale, H.M., 2014. Volatile organic compounds. *Encyclopedia of Toxicology*, pp.967-970. doi: 10.1016/B978-0-12-386454-3.00358-4.
- Arslan, M., Ullah, I., Müller, J.A., Shahid, N. & Afzal, M., 2017. Organic micropollutants in the environment: ecotoxicity potential and methods for remediation. *Enhancing Cleanup of Environmental Pollutants: Volume 1: Biological Approaches*, pp.65-99. doi: 10.1007/978-3-319-55426-6.
- Badea, G.-I., & Radu, G. L. 2018. *Carboxylic Acid: Key Role in Life Sciences*. IntechOpen.
- Bota, W., Martosupono, M., & Rondonuwu, F.S. 2015. Potensi Senyawa Minyak Sereh Wangi (*citronella oil*) dari Tumbuhan *Cymbopogon nardus L.* sebagai Agen Antibakteri. *Prosiding Seminar Nasional dan Teknologi*, 17 November 2015. STR001,1-8.
- Brothers Jr, H. M., Boehmer, T., Campbell, R. A., Dorn, S., Kerbleski, J. J., Lewis, S., Mund, C., Pero, D., Saito, K., & Wieser, M. 2017. Determination of Cyclic Volatile Methylsiloxanes in Personal Care Products by Gas Chromatography. *International Journal of Cosmetic Science*, 39(6): 580–588.
- Canada. 2013. *Asam heksanedioat, bis(2-ethylheksil) ester (DEHA)*. <https://www.canada.ca/en/healthcanada/services/chemical-substances/challenge/batch-11/deha.html>.
- CEPA. 2011. *Screening Assessment for the Challenge Hexanedioic acid, bis(2-ethylhexyl) ester (DEHA)*. <https://www.ec.gc.ca/ese-ees/default.asp?lang=En&n=39958D25-1>.
- Chavoshani, A., Hashemi, M., Amin, M.M. & Ameta, S.C., 2020. Personal care products as an endocrine disrupting compound in the aquatic environment. *Micropollutants and Challenges; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands*, pp.91-144. doi: 10.1016/B978-0-12-818612-1.00003-9.
- Chinnadurai, K., Prema, P., Veeramanikandan, V., Kumar, K.R., Nguyen, V.H., Marraiki, N., Zaghoul, N.S. and Balaji, P., 2021. Toxicity evaluation and oxidative stress response of fumaronitrile, a persistent organic pollutant (POP) of industrial waste water on tilapia fish (*Oreochromis mossambicus*). *Environmental Research*, 204: p.112030. doi: 10.1016/j.envres.2021.112030.
- Dettenrieder, C., Türkmen, D., Mattsson, A., Österlund, L., Karlsson, M. & Mizaikoff, B., 2020. Determination of volatile organic compounds in water by attenuated total reflection infrared spectroscopy and diamond-like carbon coated silicon wafers. *Chemosensors*, 8(3), p.75. doi: 10.3390/chemosensors8030075
- EPA. 1994. Reregistration Eligibility Decision (RED) (Z)-9-Tricosene. <https://archive.epa.gov/pesticides/reregistration/web/pdf/4112.pdf>
- EPA. 2019. Risk Evaluation for Di-ethylhexyl phthalate. Assessing and Managing Chemicals under TSCA.
- EPA. 2020. Supporting Information for Low-Priority Substance 1-Eicosanol (CASRN 629-96-9).
- Fillet, S., Gibert, J., Suárez, B., Lara, A., Ronchel, C., & Adrio, J. L. 2015. Fatty alcohols production by oleaginous yeast. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 42(11): 1463–1472. doi: 10.1007/s10295-015-1674-x.
- Gautam, K. & Anbumani, S., 2020. Ecotoxicological effects of organic micropollutants on the environment. *Current developments in biotechnology and bioengineering*, pp. 481-501. Elsevier.
- Gilart, N., Miralles, N., Marcé, R. M., Borrull, F., & Fontanals, N. 2013. Novel Coatings for Stir Bar Sorptive Extraction to Determine Pharmaceuticals and Personal Care Products

- in Environmental Waters by Liquid Chromatography and Tandem Mass Spectrometry. *Analytica Chimica Acta*, 774: 51–60.
- Greve, K., Nielsen, E., & Ladefoged, O. 2014. Siloxanes (D3, D4, D5, D6, HMDS). *Danish Ministry of The Environment*, pp.1–82.
- Guo, R., Yu, F., Wang, C., Jiang, H., Yu, L., Zhao, M. & Liu, X., 2020. Determination of the volatiles in fermented bamboo shoots by head space–solid-phase micro extraction (HS-SPME) with gas chromatography–olfactory–mass spectrometry (GC-O-MS) and aroma extract dilution analysis (AEDA). *Analytical Letters*, 54(7): 1162-1179.
- Interatlas. 2021. *Safety Data Sheet 2-Ethylhexanol*. <https://www.interatlaschemical.com/src/pdf/ETHYLHEXANOL.pdf>.
- Johnson Jr, W., Bergfeld, W.F., Belsito, D.V., Hill, R.A., Klaassen, C.D., Liebler, D.C., Marks Jr, J.G., Shank, R.C., Slaga, T.J., Snyder, P.W. & Andersen, F.A., 2011. Safety assessment of cyclomethicone, cyclotetrasiloxane, cyclopentasiloxane, cyclohexasiloxane, and cycloheptasiloxane. *International journal of toxicology*, 30(6): 149S-227S.
- Komala, P.S., Nur, A., & Nazhifa, I. 2019. Pengaruh Parameter Lingkungan Terhadap Kandungan Senyawa Organik Danau Maninjau Sumatera Barat. *Seminar Nasional Pembangunan Wilayah Dan Kota Berkelanjutan*, 1(1): 265-272.
- Li, A.J., Pal, V.K. & Kannan, K., 2021. A review of environmental occurrence, toxicity, biotransformation and biomonitoring of volatile organic compounds. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, 3: 91-116. doi: 10.1016/j.enceco.2021.01.001.
- Magano, S.R., Thembo, K.M., Ndlovu, S.M. & Makhubela, N.F.H., 2008. The anti-tick properties of the root extracts of *Senna italica* subsp. *arachoides*. *African Journal of Biotechnology*, 7(4): 476-481.
- Marganingrum, D., Roosmini, D., Pradono, P., & Sabar, A. 2013. Diferensiasi Sumber Pencemar Sungai Menggunakan Pendekatan Metode Indeks Pencemaran (IP)(Studi Kasus: Hulu DAS Citarum). *RISSET Geologi Dan Pertambangan*, 23(1): 41–52.
- Ming-Yue, Y.U., Xiao-Qiu, Y., Rong, F.A.N., Zheng, Y.K., Jian-Bo, S.H.I., & Zheng, Q. 2020. Non-target Screening Analysis of Volatile Organic Compounds in Drinking Water by Headspace-solid Phase Microextraction Gas Chromatography-Mass Spectrometry. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 48(9): 1228–1235.
- Ningrum, S.O. 2018. Analisis Kualitas Badan Air dan Kualitas Air Sumur di Sekitar Pabrik Gula Rejo Agung Baru Kota Madiun. *Jurnal Kesehatan Lingkungan*, 10(1): 1–12.
- NTP. 2016. Report on Carcinogens, Fourteenth Edition.; Research Triangle Park, NC. U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service.
- Pasdarani, A., Hamed, A., & Mamedov, N.A. 2016. Antibacterial and Insecticidal Activity of Volatile Compounds of Three Algae Species of Oman Sea. *International Journal of Secondary Metabolite*, 3(2): 66–73.
- Pathak, N., Tran, V.H., Merenda, A., Johir, M.A.H., Phuntsho, S. & Shon, H., 2020. Removal of organic micro-pollutants by conventional membrane bioreactors and high-retention membrane bioreactors. *Applied Sciences*, 10(8): p.2969. doi: 10.3390/app10082969.
- PubChem. 2021. Compound Summary for CID 8343, Bis(2-ethylhexyl) phthalate. National Center for Biotechnology Information.
- Qin, P., Cao, F., Lu, S., Li, L., Guo, X., Zhao, B., Wan, Z. & Bi, B., 2019. Occurrence and health risk assessment of volatile organic compounds in the surface water of Poyang Lake in March 2017. *RSC advances*, 9(39): 22609-22617. doi: 10.1039/C9RA02450F.
- Salvatierra-stamp, V., Muñiz-Valencia, R., Jurado, J. M., & Ceballos-Magaña, S.G. 2018. Hollow Fiber Liquid Phase Microextraction Combined with Liquid Chromatography-Tandem Mass Spectrometry for the Analysis of Emerging Contaminants in Water Samples. *Microchemical Journal*, 140: 87–95.
- Santoso, E.B., Aulia, B.U., Handayani, K.D.M.E., & Aninditya, D.N. 2021. Ecological Sustainability of Gerbangkertosusila Region Based on Ecological Footprint Approach for the Land Use Controlling. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 724(1): p.12060. doi: 10.1088/1755-1315/724/1/012060.
- Sari, A.H.W., Risjani, Y., & Mahendra, A.P.W. 2012. Efek Konsentrasi Sublethal Fenol Terhadap Total Haemocyte Count (THC) dan Histologi Insang Kepiting Bakau (*Scylla serata*). *The Journal of Experimental Life*

- Science*, 2(2): 82–88.
- Sidabutar, E.A., Sartimbul, A., & Handayani, M. 2019. Distribusi Suhu, Salinitas dan Oksigen Terlarut terhadap Kedalaman di Perairan Teluk Prigi Kabupaten Trenggalek. *Journal of Fisheries and Marine Research*, 3(1): 46–52.
- Sigma-aldrich. 2021. Safety Data Sheet 2,4-Di-tert-butylphenol for Synthesis. file:///C:/Users/Amaliaizzy/Downloads/820422_SDS_IE_EN.PDF
- Sihalono, E. 2018. Kandungan Bahan Organik Pada Air dan Sedimen di Perairan Pantai Cermin Kabupaten Serdang Bedagai Provinsi Sumatera Utara. *Jurnal Universitas Riau Pekanbaru*, pp.1–10.
- SiseinEboh, A. & Robert, F.O., 2022. GC-MS bioactive compounds in Ocimum gratissimum methanol and hexane extracts a comparative study. *World*, 2(02): 076-081.
- Stamatelatos, K., Pakou, C., & Lyberatos, G. 2011. 6.37 - Occurrence, Toxicity, and Biodegradation of Selected Emerging Priority Pollutants in Municipal Sewage Sludge (M. B. T.-C. B. (Second E. Moo-Young (ed.); pp. 473–484). doi: 10.1016/B978-0-08-088504-9.00496-7.
- Suryana, R. 2013. Analisis Kualitas Air Sumur Dangkal di Kecamatan Biringkanayya Kota Makassar. *Skripsi Universitas Hasanuddin Makassar*.
- Valoppi, F., Calligaris, S., & Marangoni, A. G. (2018). *Chapter 9 - Stearyl Alcohol Oleogels* (A. G. Marangoni & N. B. T.-E. O. (Second E. Garti (eds.); pp. 219–234). AOCS Press. doi: 10.1016/B978-0-12-814270-7.00009-5.
- Villegas, L.G.C., Mashhadi, N., Chen, M., Mukherjee, D., Taylor, K.E., & Biswas, N. 2016. A Short Review of Techniques for Phenol Removal from Wastewater. *Current Pollution Reports*, 2(3): 157–167. doi: 10.1007/s40726-016-0035-3.
- Vlachogianni, T., Thomais, Valavanidis, & Valavanidis, A. 2013. Pharmaceuticals and Personal Care Products as Contaminants in the Aquatic Environment. A Category of Organic Wastewater Pollutants with Special Characteristics. *Pharmakeftiki*, 25: 16–23.
- Wany, A., Jha, S., Nigam, V., & Pandey, D.M. 2013. Chemical analysis and therapeutic uses of citronella oil from *Cymbopogon winterianus*: A short review. *International Journal of Advanced Research*, 1:504–521.
- WHO. 2013. Concise International Chemical Assessment Document (Diethyl Phthalate). <https://www.who.int/ipcs/publications/cicad/en/cicad52.pdf>
- Wijana, I., Ernawati, N., & As-syakur, A. 2020. Status Mutu Air Sungai Ayung Berdasarkan Data Pemanuan Kualitas Air Tahun 2014–2018. *Ecotrophic*, 14(2): 143–153.
- Wu, D., Zhou, Y., Lu, G., Hu, K., Yao, J., Shen, X., & Wei, L. 2019. The Occurrence and Risks of Selected Emerging Pollutants in Drinking Water Source Areas in Henan, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(21): p.4109.
- Xue, J., Liu, C.L., Luo, M.J., Bao, Y.X., Jiang, Y.F., Rohani, S., Li, P. & Yu, J.G., 2019. Recovery of potassium hydroxide from strong potassium aluminate solutions using solvent extraction with alkyl phenols. *Hydrometallurgy*, 184: 183–191.
- Yuniarsih, N., Kurniawati, I., Mudrikah, S., Amelia, T., Bintang, I., Pranata, F. & Sukandar, D., 2023. Literature Review Artikel Pengaruh Penyalutan Tablet Terhadap Stabilitas Obat. *Innovative: Journal Of Social Science Research*, 3(2): 1072-1083.
- Zammi, M., Rahmawati, A., & Nirwana, R.R. 2018. Analisis Dampak Limbah Buangan Limbah Pabrik Batik di Sungai Simbangkulon Kab. Pekalongan. *Walisongo Journal of Chemistry*, 1(1): 1–5.
- Zeng, M., Heine, N. & Wilson, K.R. 2020. Evidence that Criegee intermediates drive autoxidation in unsaturated lipids. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(9): 4486–4490.
- Zhen, Z., Xi, T.F. & Zheng, Y.F., 2015. Surface modification by natural biopolymer coatings on magnesium alloys for biomedical applications. In *Surface modification of magnesium and its alloys for biomedical applications* (pp. 301–333). Woodhead Publishing. doi: 10.1016/B978-1-78242-078-1.00011-6.