

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Karakteristik Air Limbah Farmasi

Air limbah farmasi merupakan hasil samping dari kegiatan di industri farmasi, laboratorium, rumah sakit, dan fasilitas kesehatan lainnya (Jang, 2019). Beberapa tahun terakhir selama masa pandemi Covid-19, terjadi peningkatan jumlah limbah farmasi yang disebabkan oleh peningkatan dalam konsumsi obat-obatan, akibatnya volume limbah farmasi melonjak (Nzediegwu and Chang, 2020; Zhao *et al.*, 2021). Kenaikan limbah farmasi perlu diikuti penanganan yang tepat karena limbah ini memiliki potensi dampak negatif serta risiko penyebaran penyakit jika dibuang langsung ke lingkungan.

Limbah farmasi mengandung bahan berbahaya seperti mikroorganisme patogen, virus, antibiotik, obat sitotoksik, dan logam berat (Wei *et al.*, 2021). Salah satu sumber pencemaran yang sering ditemui dari limbah farmasi di lingkungan adalah pembuangan obat yang rusak dan kadaluarsa yang sebelumnya tidak dikelola atau dikelola dengan kurang baik. Konsentrasi dari obat-obatan dalam limbah farmasi bervariasi dari ng/L hingga mg/L. Sifat farmakologi yang dimiliki dapat menimbulkan potensi ancaman terhadap lingkungan, baik dalam jangka pendek dan jangka panjang berupa toksisitas dan resistensi antibiotik dan mikroorganisme (Guyomard-Rabenirina *et al.*, 2017; Uluseker *et al.*, 2021). Akan tetapi, untuk saat ini kontaminan-kontaminan tidak diatur oleh Undang-Undang Lingkungan (Kosma *et al.*, 2020).

Standar kualitas untuk air limbah farmasi yang telah ditetapkan oleh Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan sebagaimana tercantum dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 5 tahun 2014, yaitu untuk Industri Farmasi dan Fasilitas Pelayanan Kesehatan. Pada baku mutu hanya terdapat 5 parameter yang menjadi acuan kualitas limbah, yaitu BOD, COD, TSS, Fenol, total-N, dan pH seperti yang ditunjukkan Tabel 2.1

Tabel 2. 1 Baku Mutu Air Limbah Farmasi

Parameter	Fasilitas Pelayanan Kesehatan	Industri Farmasi (Proses pembuatan Bahan Formula)	Industri Farmasi (Formulasi Pencampuran)
BOD	50 mg/L	100 mg/L	75 mg/L
COD	80 mg/L	300 mg/L	150 mg/L
TSS	200 mg/L	100 mg/L	75 mg/L
Total-N	-	30 mg/L	-
Fenol	0,5 mg/L	1 mg/L	-
pH	6-9	6-9	6-9 mg/L

Sumber: PERMENLHK No.5 Tahun 2014

2.2 Logam Berat

Logam berat (*heavy metals*) merupakan sekelompok material logam yang memiliki densitas kimia rendah dan dikategorikan berbahaya jika masuk ke dalam tubuh makhluk hidup (Tekaya *et al.*, 2013; Patle *et al.*, 2022). Logam berat memiliki massa atomik antara 63,5-200,6 g/mol. Logam berat memiliki densitas lebih dari 5 gr/cm³. Selain bersifat racun, logam berat juga tidak dapat terurai, dan mudah menyebar. Logam berat masuk dalam organisme makhluk hidup melalui rantai makanan sehingga dapat memperburuk kesehatan organisme yang memakannya (Turdean, 2011). Sifat beracun muncul akibat ikatan logam dengan gugus thiol dari protein sehingga ketika memasuki sel organisme, mampu mengubah siklus hidup

sel-sel dalam tubuh (Bagal-Kestwal *et al.*, 2008). Mekanisme toksisitas logam berat adalah melalui penghambatan kinerja enzim, stress oksidatif, dan mengganggu metabolisme antioksidan dari dalam tubuh (Gumpu *et al.*, 2015).

Logam-logam tertentu dapat sangat berbahaya jika ditemukan dalam konsentrasi tinggi. Namun, logam berat juga berguna dalam proses kehidupan. Beberapa logam berat seperti besi, kobalt, seng, copper, dan mangan dibutuhkan makhluk hidup dalam kondisi yang rendah (Hejna *et al.*, 2018). Logam berat seperti kadmium, timbal, arsen, merkuri dan kromium dianggap sebagai senyawa yang berbahaya walaupun hanya dalam konsentrasi yang rendah (Bagal-Kestwal *et al.*, 2008). Oleh karena itu terdapat regulasi yang mengatur batas ambang kandungan logam berat pada badan air yang diatur dalam Baku Mutu Air Nasional Peraturan Pemerintah RI No. 22 Tahun 2021 seperti yang ditunjukkan Tabel 2.2.

Tabel 2. 2 Batas Kandungan Logam Berat Berdasarkan Baku Mutu Air Nasional Peraturan Pemerintah RI No. 22 Tahun 2021

Logam Berat	Batas Kandungan Logam Terlarut (mg/L)			
	Kelas 1	Kelas 2	Kelas 3	Kelas 4
Barium(Ba)	1,0	-	-	-
Boron (B)	1,0	1,0	1,0	1,0
Mercuri (Hg)	0,001	0,002	0,002	0,005
Arsen (As)	0,05	0,05	0,05	0,10
Selenium (Se)	0,01	0,05	0,05	0,05
Besi (Fe)	0,3	-	-	-
Kadmium (Cd)	0,01	0,01	0,01	0,01
Kobalt (Co)	0 2	0,2	0,2	0,20
Mangan (Mn)	0,1	-	-	-
Nikel (Ni)	0,05	0,05	0,05	0,10
Seng (Zn)	0,05	0,05	0,05	2
Tembaga (Cu)	0,02	0,02	0,02	0,02
Timbal (Pb)	0,03	0,03	0,03	0,5
Kromium (Cr)	0 ,05	0 ,05	0 ,05	0,10

Sumber: Baku Mutu Air Nasional Peraturan Pemerintah RI No. 22 Tahun 2021

2.3 Fenomena Pencemaran Logam Berat dari Air Limbah Farmasi

Pencemaran logam berat dari air limbah farmasi menjadi salah satu isu lingkungan yang semakin mendapat perhatian luas, baik secara nasional maupun global. Limbah farmasi tidak hanya dihasilkan oleh industri farmasi, tetapi juga berasal dari berbagai aktivitas di fasilitas kesehatan, seperti rumah sakit, laboratorium farmasi, klinik, dan unit kesehatan lain. Dalam banyak kasus, air limbah yang dibuang ke lingkungan mengandung logam-logam berat berbahaya seperti merkuri (Hg), timbal (Pb), kadmium (Cd), nikel (Ni), kromium (Cr), tembaga (Cu), dan besi (Fe). Logam-logam ini bersifat toksik, sulit terurai di alam, dan dapat terakumulasi dalam tubuh organisme hidup, sehingga menimbulkan dampak jangka panjang bagi kesehatan manusia dan keseimbangan ekosistem.

Sumber kontaminasi logam berat dalam air limbah farmasi sangat beragam, mencakup penggunaan senyawa logam dalam formulasi obat, reagen laboratorium, bahan radiokontras, sisa proses sintesis bahan aktif farmasi, hingga kegiatan rutin seperti pencucian peralatan medis. Di Indonesia, kasus pencemaran telah teridentifikasi di berbagai lokasi. Di wilayah pesisir Gresik (Jawa Timur) yang berdekatan dengan industri farmasi, ditemukan bahwa ikan ketang (*S. argus*) mengandung arsen hingga 1,46 mg/kg, melampaui ambang batas nasional menurut SNI 7387:2009 tentang cemaran logam berat dalam pangan (Marchellina *et al.*, 2024). Fenomena serupa juga tercatat di Sungai Kaligarang, Semarang, di mana sedimen sungai mengandung logam berat dengan konsentrasi tinggi: Hg $4,433 \times 10^{-2}$ ppm, Cd 0,39 ppm, Cu 38,62 ppm, Zn 211,65 ppm, Cr 14,20 ppm, dan Pb 57,40 ppm. Kadar seng dan timbal di lokasi ini telah melampaui batas maksimum yang

ditetapkan oleh *Toxicant Default Guideline Values for Sediment Quality* (ANZECC), mengindikasikan pencemaran logam berat yang bersumber dari aktivitas industri farmasi di sekitar wilayah aliran sungai kaligarang (Susanti, Mustikaningtyas and Sasi, 2014).

Pencemaran logam berat dari air limbah farmasi juga bersumber dari fasilitas kesehatan. Studi di Rumah Sakit Daerah Idaman, Banjarbaru (Kalimantan Selatan), melaporkan bahwa air limbah dari saluran outlet rumah sakit mengandung berbagai logam berat seperti arsen (As), besi (Fe), kadmium (Cd), mangan (Mn), seng (Zn), timbal (Pb), tembaga (Cu), kobalt (Co), dan nikel (Ni) (Wardani *et al.*, 2024). Penelitian di wilayah aliran sungai sekitar Kota Malang menunjukkan akumulasi logam berat pada ikan nila hingga 0,25 mg/L, yang meningkat seiring kedekatan lokasi terhadap sumber pembuangan limbah rumah sakit (Berlianti *et al.*, 2025). Konsentrasi ini melewati ambang batas yang ditetapkan Badan Pengawas Obat dan Makanan (BPOM) untuk logam berat dalam produk perikanan, menunjukkan kontribusi signifikan limbah medis terhadap kualitas air dan keamanan pangan.

Fenomena ini ditemukan juga dalam berbagai laporan secara global. Di Nigeria, air pada saluran outlet dari industri farmasi di Kota Ibadan dilaporkan mengandung Fe hingga 13,79 mg/L dan Ni sebesar 2,00 mg/L, di mana nilai tersebut jauh melebihi standar *World Health Organization* (WHO) (Babatunde Ibigbami, 2016). Di India, Ramola dan Singh (2013) menemukan kadar Cd, Pb, Cr, dan Ni pada air di saluran outlet industri farmasi yang melebihi ambang batas aman (Ramola, 2013). Di Iran, tanah di sekitar lokasi pembuangan limbah farmasi menunjukkan kandungan Cd sebesar 9,879 mg/kg, hampir dua kali lipat dari batas

aman WHO dan *Environmental Protection Agency* (EPA) (Shokri, Ziarati and Mousavi, 2016). Di Pakistan, kandungan Ag dalam limbah farmasi herbal tercatat mencapai 3,91 mg/L (Aziz Ur Rahman, Muhammad Owais and Irfan Ansari, 2021), sedangkan konsentrasi Fe mencapai 10,86 mg/L (Bibi *et al.*, 2023). Bahkan di Yordania, kandungan Ni dalam limbah farmasi telah melampaui batas aman air irigasi menurut *Food and Agriculture Organization* (FAO) (Al-Samrraie *et al.*, 2022).

Rangkaian kasus ini menegaskan bahwa pencemaran logam berat dari limbah farmasi bukan hanya masalah lokal, tetapi telah menjadi isu lintas negara yang bersifat sistemik. Konsentrasi logam berat yang melampaui ambang batas nasional maupun internasional. menunjukkan lemahnya kontrol dan mitigasi terhadap limbah farmasi. Jika tidak diatasi secara serius, pembuangan limbah farmasi yang mengandung logam berat akan terus mencemari air permukaan, tanah, dan berisiko masuk ke dalam rantai makanan. Oleh karena itu, diperlukan upaya yang lebih komprehensif melalui penguatan teknologi deteksi untuk mitigasi dan juga pengolahan limbah yang berkelanjutan.

SEKOLAH PASCASARJANA

Tabel 2. 3. Kasus-Kasus Pencemaran Logam Berat dari Limbah Farmasi

No	Lokasi	Sumber	Logam Berat	Konsentrasi	Referensi
1	Gresik, Indonesia	Industri farmasi	As	1,46 mg/kg (dalam ikan <i>S. argus</i>)	(Marchellina <i>et al.</i> , 2024).
2	Semarang, Indonesia	Industri farmasi	Hg, Cd, Cu, Zn, Cr, Pb	Zn: 211,65 ppm; Pb: 57,40 ppm	(Susanti, Mustikaningtyas and Sasi, 2014).
3	Malang, Indonesia	Rumah sakit	Logam berat tidak dirinci	Akumulasi logam berat pada ikan nila: 0,25 mg/L	(Berlianti <i>et al.</i> , 2025).
4	Banjarbaru, Indonesia	Rumah sakit	As, Fe, Cd, Mn, Zn, Pb, Cu, Co, Ni	As: 0,0037; 0,199; 0,0034; 0,0361; 0,0194; 0,0030; 0,0324; 0,004; 0,0064 mg/L	(Wardani <i>et al.</i> , 2024)
5	Nigeria	Industri farmasi	Fe, Ni	Fe: 13,79 mg/L; Ni: 2,00 mg/L	(Babatunde Ibigbami, 2016)
6	India	Industri farmasi	Cd, Pb, Cr, Ni	Pb: 0,26 mg/L Cd: 0,55 mg/L Cr: 0,31 mg/L Ni: 0,12 mg/L	(Ramola, 2013)
7	Iran	Industri farmasi	Cd	9,879 mg/kg	(Shokri, Ziarati and Mousavi, 2016)
8	Pakistan	Industri farmasi herbal	Ag, Fe	Ag: 3,91 mg/L; Fe: 3,44 mg/L	(Aziz Ur Rahman, Muhammad Owais and Irfan Ansari, 2021),
9	Pakistan	Industri farmasi	Fe	10,86 mg/L	(Bibi <i>et al.</i> , 2023)
10	Yordania	Industri farmasi	Ni	1,14 mg/L	(Al-Samrraie <i>et al.</i> , 2022).

2.4 Antibiotik

Antibiotik adalah jenis obat yang digunakan untuk mengatasi penyakit yang disebabkan oleh infeksi bakteri atau jamur. Antibiotik ini dihasilkan dari berbagai jenis mikroorganisme, seperti bakteri, jamur, dan *actinomycota*, yang memiliki

kemampuan untuk menghambat pertumbuhan atau membunuh mikroorganisme lain (Zhuan and Wang, 2020). Umumnya antibiotik dapat dibagi menjadi beberapa kelas diantaranya makrolid, beta-lactam, kuinolon, Tetrasiklin, sulphonamides, arspenamines, polypeptides, aminoglycosides, amphenicols, lipopeptides, oxazolidinones, glycopeptides, streptogramins, ansamycins dan lincosamides (Wang, Wang and Yang, 2018).

Selama produksi dan proses aplikasi, antibiotik dapat masuk ke lingkungan secara langsung atau tidak langsung ke lingkungan melalui berbagai jalur. Antibiotik dapat dibuang ke lingkungan selama produksi melalui limbah industri farmasi atau fermentasi residu. Antibiotik yang berasal dari industri farmasi, rumah sakit, pabrik pengolahan air limbah, budidaya ternak adalah kontributor paling potensial yang menyebabkan antibiotik masuk ke lingkungan. Antibiotik masuk ke lingkungan melalui transfer di air baik itu air permukaan, air minum dan air tanah, sedimen, tanah serta melalui rantai makanan (Wang, Zhuan and Chu, 2019). Indonesia sebagai negara berkembang dengan penggunaan antibiotik sebesar 30%-80% dikonsumsi secara bebas tidak berdasarkan indikasi yang dialami oleh pasien. Diantara jenis antibiotik yang banyak dikonsumsi adalah Amoksisilin, Tetrasiklin dan Ciprofloxacin (Kurniawan, Mariadi and Huda, 2019).

Amoksisilin (AMX) dengan rumus kimia $C_{16}H_{19}N_3O_5S$ merupakan jenis antibiotik yang paling banyak digunakan karena sifat antibakterinya. Lebih dari 86% senyawa pada AMX tidak termetabolisme dan diekskresikan melalui urin tubuh manusia. AMX juga kini sudah terdeteksi di banyak sampel air, air limbah domestik dan industri serta air permukaan pada tingkat konsentrasi g/L (Kimosop

et al., 2016). AMX ditemukan sejumlah 10-60 mg/L pada permukaan badan air (Pourmoslemi *et al.*, 2016).

Tetrasiklin (TC) termasuk kelas utama antibiotik yang sering digunakan dalam pengobatan di rumah sakit karena aktivitas antibakterinya yang luas terhadap berbagai bakteri gram positif dan negatif (Grossman, 2016). Setelah pengobatan, lebih dari 70% TC dilepaskan dalam bentuk aktif ke lingkungan. Dalam beberapa tahun terakhir, kehadiran TC di air permukaan dan bahkan di air tanah hingga 20 mg/L dan setengah dari 139 sungai yang disurvei di AS telah mendeteksi keberadaan TC (Chang *et al.*, 2014). Konsentrasi rata-rata TC yang dilaporkan dalam air permukaan AS sebesar 1,34 mg/L (Safari *et al.*, 2015). Meskipun konsentrasinya relatif rendah, residu TC di lingkungan perairan menyebabkan polutan serius yang mengakibatkan resistensi patogen manusia, mempengaruhi kesehatan manusia dan merusak ekosistem (Nurhasanah *et al.*, 2020).

2.5 Dampak Antibiotik terhadap Lingkungan

Peningkatan konsumsi antibiotik telah membawa dampak serius pada ekosistem perairan yang terpapar oleh kontaminasi antibiotik. Hal ini terjadi karena sebagian besar antibiotik hanya sebagian kecil yang dapat diubah oleh organisme target. Sebagian besar antibiotik dan residunya sekitar 30-90% dari dosis yang dikonsumsi akan diekskresikan melalui urin dan tinja manusia, dan akhirnya mencapai instalasi pengolahan air limbah (IPAL) (Gupta, Kumar Verma and Kumar, 2023). Salah satu dampak dari penyalahgunaan antibiotik dan pencemaran antibiotik adalah peningkatan jumlah bakteri yang membawa Gen Resistensi Antibiotik (ARGs) di lingkungan. Resistensi antibiotik terjadi ketika bakteri

menjadi kebal terhadap antibiotik yang pada awalnya efektif untuk mengobati infeksi yang disebabkan oleh bakteri tersebut (Kementerian Kesehatan RI, 2017).

Menurut data dari WHO pada 2011, setiap tahunnya terdapat sekitar 440 ribu kasus baru *Tuberculosis-Multi Drug Resistance* (TB-MDR) yang menyebabkan 150 ribu kematian di seluruh dunia (WHO, 2011). Penelitian oleh Rukmini et al. (2019) melaporkan bahwa terdapat resistensi bakteri multi-obat yang membahayakan seperti *Staphylococcus aureus* yang tahan terhadap methicillin (MRSA) dan bakteri yang menghasilkan *Extended Spectrum Beta-Lactamases* (ESBL) di RSUD Dr. Soetomo dan RSUP Dr. Kariadi. Di RSUP H. Adam Malik, terdapat resistensi bakteri terhadap antibiotik seperti ampicillin, gentamicin, dan cefotaxime. Bakteri gram-negatif menjadi jenis bakteri yang paling umum mengalami resistensi antibiotik, dan spesies yang paling sering terpengaruh adalah *Staphylococcus sp*, *Pseudomonas sp*, dan *Enterobacter sp* (Rukmini, Siahaan and Sari, 2019).

Peningkatan resistensi antibiotik juga telah terjadi pada berbagai kelas antibiotik dalam lingkungan. Konsentrasi antibiotik dalam lingkungan dalam konsentrasi rendah mampu membunuh bakteri non-patogen. Paparan antibiotik pada lingkungan juga memengaruhi dinamika evolusi mikroba. Senyawa antibiotik yang ada dalam lingkungan, terus-menerus dan dalam jangka waktu tertentu, dapat menyebabkan beberapa mikroorganisme patogen menjadi persisten dan bertahan di lingkungan karena sulit diurai secara alami (Grenni, Ancona and Barra Caracciolo, 2018). Beberapa spesies bakteri dapat mengalami perubahan dalam respons terhadap jenis antibiotik tertentu karena perubahan gen atau sifat fisiologis mereka.

Oleh karena itu, antibiotik dapat mengurangi keragaman populasi mikroba dengan mendukung pertumbuhan garis keturunan mikroba yang resisten atau toleran terhadap antibiotik. Adanya cemaran antibiotik di lingkungan menyebabkan berkurangnya keragaman mikroba dalam perairan (Kraemer, Ramachandran and Perron, 2019).

Kehilangan keragaman mikroba dalam perairan mengakibatkan penurunan kinerja ekosistem perairan, yang memainkan peran penting dalam siklus air, siklus nutrisi, dekomposisi, dan produktivitas primer di berbagai lingkungan (Grenni, Ancona and Barra Caracciolo, 2018; Eckert *et al.*, 2019). Peran mikroba dalam siklus karbon dan produktivitas primer sangat penting dalam ekosistem perairan. Paparan antibiotik pada perairan juga dapat mengubah struktur komunitas mikroba dan mengakibatkan hilangnya biomassa serta pengurangan aktivitas mikroba termasuk nitrifikasi, denitrifikasi, dan respirasi (Thiele-Bruhn and Beck, 2005; Cycoń, Mrozik and Piotrowska-Seget, 2019). Paparan antibiotik pada perairan juga dapat mempengaruhi aktivitas enzim bakteri termasuk dehidrogenase, fosfatase, dan urease yang dianggap sebagai indikator penting dari aktivitas tanah dan air. Akibatnya, paparan antibiotik pada perairan berdampak pada peningkatan kelimpahan parasit dan patogen di lingkungan tanah dan air (Kraemer, Ramachandran and Perron, 2019).

2.6 Fenomena Pencemaran Antibiotik

Pencemaran antibiotik dapat dikelompokkan menjadi beberapa sumber utama, termasuk limbah dari rumah sakit dan industri farmasi, limbah dari sektor akuakultur dan peternakan, limbah perkotaan yang tidak diolah dengan baik, limbah

dari instalasi pengolahan air limbah (IPAL), dan limbah padat di tempat pembuangan sampah. Secara umum, konsentrasi antibiotik dalam lingkungan bervariasi luas, mulai dari ng/L hingga mg/L, dan tingkat konsentrasi ini bergantung pada sumber limbah antib (Anh *et al.*, 2021).

Di Indonesia, antibiotik telah terdeteksi dalam limbah perkotaan di daerah Jakarta, dengan konsentrasi berkisar antara 17 hingga 1489 ng/L, dengan rata-rata sekitar 607 ng/L. Senyawa-senyawa utama yang ditemukan meliputi sulfamethoxazole (SMX), lincomycin (LIN), erythromycin (ERY), dan tetramethylpiperidine (TMP) (Shimizu *et al.*, 2013). Pencemaran antibiotik juga terjadi dalam efluen IPAL pada salah satu rumah sakit di Palembang, Indonesia. Hasil penelitian melaporkan dari 126 jenis antibiotik yang dianalisis, terdapat lima antibiotik yang terdeteksi resisten, yaitu ciprofloxacin, lincomycin, metronidazole, netilmicin, dan ofloxacin/levofloxacin, dengan konsentrasi tertinggi ($9,00 \times 10^4$) (Kurniawan, Mariadi and Huda, 2019).

Penelitian yang dilaporkan Kristanto dan Koven (2019) mengidentifikasi kejadian resistensi antibiotik pada bakteri *E. Coli* di IPAL rumah sakit di Jakarta, Indonesia. Resistensi antibiotik melibatkan tiga jenis antibiotik, yaitu meropenem, ciprofloxacin, dan cefixime. Air dari IPAL tersebut mengandung $4,6 \times 10^4$ CFU *E. Coli*, dengan persentase resistensi antibiotik pada meropenem sekitar 3,8%, pada ciprofloxacin sekitar 53,8%, dan pada cefixime sekitar 56,3%. Pencemaran antibiotik di IPAL rumah sakit menjadi penyebab resistensi antibiotik, sehingga antibiotik tersebut kehilangan efektivitasnya dalam membunuh bakteri. Ringkasan kasus-kasus pencemaran antibiotik di Indonesia ditunjukkan oleh Tabel 2.4.

Tabel 2. 4 Kasus-Kasus Pencemaran Antibiotik di Indonesia

Lokasi	Temuan Antibiotik / Resistensi	Sumber
Pesisir teluk manado	Ditemukan bakteri resisten terhadap Ceftriaxone	(Pijoh, Palandeng and Ottay, 2021)
Sedimen pada Pantai Galesong – Takalar	Ditemukan bakteri resisten terhadap antibiotik	(Burhamzah, et al., 2019)
Pembuangan Rumah Sakit – Manado	Ditemukan bakteri <i>Streptococcus</i> spp., <i>Escherichia</i> spp. dan <i>Staphylococcus</i> spp. resisten terhadap Clindamycin	(Kusuma, Rombot and Palandeng, 2022)
Sungai Musi - Palembang	Ditemukan kandungan Ciprofloxacin dan Netilmicin	(Kurniawan and Mariadi, 2019)
Sungai Code - Yogyakarta	Potensi bakteri coli pembawa gen resisten antibiotik	(Hadi <i>et al.</i> , 2018)
Sungai Boyong - Sleman	Ditemukan kandungan Amoksisilin dan Streptomisin	(Sasongko, 2014)
Sungai Sekanak dan Sungai Baung – Palembang	Ditemukan <i>Escherichia Coli</i> resisten terhadap ampicilin, gentamicin, dan tobramycin.	(Tarigan, Muharni and Verawaty, 2019)
RPH-R Kota Bogor	Ditemukan <i>Escherichia Coli</i> resisten terhadap penisilin, amoksisilin, streptomisin, dan tetrasiklin	(Normaliska, Sudarwanto and Latif, 2019)
Air keran kampus Institut Sains dan Teknologi Nasional – Jakarta	Ditemukan <i>Escherichia Coli</i> resisten terhadap Amoksisilin	(Hamida <i>et al.</i> , 2019)

2.7 Metode Deteksi Logam Berat dan Antibiotik

Upaya mendeteksi suatu polutan dalam lingkungan bertujuan untuk kadar dan potensi dampak yang dapat ditimbulkan. Metode yang digunakan untuk mendeteksi kandungan logam berat dan residu antibiotik dibagi menjadi beberapa jenis yaitu, metode mikroba/*immunoassay*, metode kromatografi/ spektrometri massa, metode elektrokimia, dan metode penginderaan optik), seperti yang ditunjukkan Gambar 2.1. (Liu *et al.*, 2022).



Gambar 2. 1 Beberapa Metode Deteksi Antibiotik
(Pauter, Szultka-Młýnska and Buszewski, 2020)

1. Metode Mikroba / *Immunoassay*

Immunoassay merupakan sebuah metode bioanalitik yang bergantung pada reaksi antara antigen (analit) dan antibodi untuk tujuan kuantifikasi. Prinsip utama dari metode ini adalah interaksi antara analit dan antibodi yang menghasilkan kompleks imun. Kemudian, kompleks imun ini dipisahkan dan aktivitasnya dianalisis dengan mengukur beberapa parameter seperti radiasi, fluoresensi, atau aktivitas enzim (Darwish, 2006). Meskipun metode mikroba/*immunoassay* memiliki kelebihan, seperti biaya yang terjangkau, kemudahan penggunaan, dan hasil analisis yang mudah dipahami, tetapi metode ini juga memiliki kelemahan, seperti sensitivitas yang terbatas, selektivitas yang terbatas, waktu deteksi yang lama, dan persyaratan penyimpanan yang ketat (Liu *et al.*, 2022).

2. Metode Kromatografi

Kromatografi adalah sebuah metode yang memanfaatkan prinsip pemisahan molekul dalam sampel. Pada prinsipnya, molekul dalam campuran atau sampel diletakkan pada suatu permukaan atau fase diam yang stabil. Kemudian, dengan bantuan fase gerak, molekul-molekul ini akan terpisah satu sama lain saat bergerak melalui fase gerak (Coskun, 2016). Beberapa metode yang umum digunakan antara lain Kromatografi Lapis Tipis (TLC), Kromatografi Gas (GC), dan Kromatografi Cair (LC) (Pauter, Szultka-Młyńska and Buszewski, 2020). Dibandingkan dengan metode mikroba/*immunoassay*, metode kromatografi/spektrometri massa memiliki keunggulan berupa sensitivitas yang tinggi, kemampuan anti-interferensi yang kuat, dan akurasi deteksi yang tinggi. Metode kromatografi/spektrometri massa umumnya digunakan sebagai metode standar pemerintah untuk mendeteksi antibiotik pada kosmetik dan produk susu (Liu *et al.*, 2022).

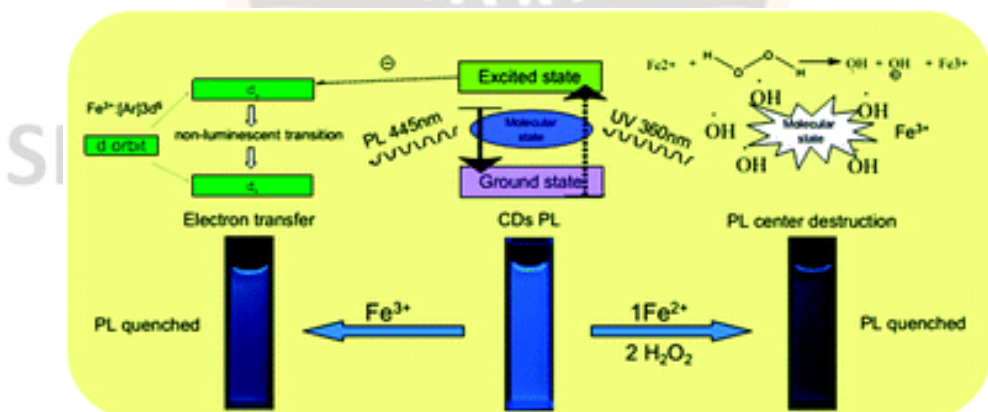
3. Metode Elektrokimia

Prinsip kerja metode elektrokimia adalah penginderaan yang dihasilkan oleh reaksi zat diukur dengan elemen tertentu kemudian diubah menjadi sinyal listrik yang dapat diidentifikasi. Besarnya sinyal sebanding dengan konsentrasi zat target melalui transduser dengan sistem instrumen deteksi elektrokimia dan elektrolit (Wang *et al.*, 2021). Keunggulan dari metode tersebut adalah dapat diamati secara visual, sensitivitas yang tinggi, memiliki limit deteksi yang kecil, dan selektivitas yang baik (Pollap and Kochana, 2019; Liu *et al.*, 2022).

4. Metode Penginderaan Optik

Metode - metode sebelumnya memiliki beberapa keunggulan yang sama yaitu selektivitas yang baik, sensitivitas yang tinggi, dan akurasi deteksi yang tinggi, akan tetapi metode tersebut juga memiliki kelemahan yaitu perlakuan sebelum uji yang rumit, biaya yang mahal, peralatan canggih, serta operator yang handal. Oleh karena itu hanya dapat dilakukan pada uji lab yang skalanya kecil. Maka dari itu, dikembangkan metode baru yaitu metode fluoresensi. Metode fluoresensi menggunakan *probes* berupa material fluoresens yang memiliki keunggulan karena pembuatan *probes* memiliki biaya lebih murah, fleksibel, dan dapat dilakukan baik di lab ataupun secara langsung (Ding *et al.*, 2022).

Mekanisme yang digunakan dalam deteksi residu polutan menggunakan Cdots adalah mekanisme turn off seperti yang ditunjukkan Gambar 2.2 Ketika Cdots berinteraksi dengan molekul pada antibiotik akan terjadi proses quenching, yaitu berkurangnya intensitas pendaran. Proses tersebut dikenal dengan mekanisme turn off. *Quenching* terjadi dikarenakan adanya proses donor elektron bebas ataupun proses intercep fluoresensi oleh residu antibiotik (Treto-Suárez *et al.*, 2021).



Gambar 2. 2 Mekanisme *Quenching* Cdots sebagai Detektor (Song *et al.*, 2014)

2.8 Teknologi Degradasi Air Limbah Farmasi

Air limbah farmasi apabila mencemari lingkungan dan dikonsumsi oleh makhluk hidup akan berbahaya bagi kesehatan. Diperlukan suatu upaya mendegradasi atau menghilangkan residu tersebut. Metode yang digunakan sebagai remediasi antibiotik dalam air diantaranya, proses biologis, proses AOP, proses adsorpsi, membran filtrasi, dan metode kombinasi (Godoy and Sánchez, 2020).

1. *Advanced Oxidation Process* (AOP)

AOP menggunakan prinsip reaksi antara molekul organik dari antibiotik yang direaksikan dengan hidroksil radikal. Hidroksil radikal tersebut kemudian mereduksi *chemical oxygen demand* (COD) dan *biological oxygen demand* (BOD) dengan cara memisahkan molekul organik dan anorganik yang dapat dioksidasi. Meskipun efektif untuk meremediasi air limbah farmasi dan antibiotik, AOP memiliki kekurangan seperti ketika digunakan dalam skala besar (Palacio, Aranda and Rivas, 2022; Yuju *et al.*, 2023).

2. Metode Fotokatalitik

Secara umum, proses fotodegradasi polutan organik oleh berbagai fotokatalis dapat diringkas secara singkat sebagai berikut. Elektron tereksitasi oleh fluks energi foton yang lebih besar dari celah pita semikonduktor, elektron (e^-) bermigrasi dari pita valensi (VB) ke pita konduksi (CB), meninggalkan lubang yang terfotogenerasi pada VB. Selanjutnya, pembawa muatan yang terpisah akan berdifusi ke dalam situs aktif katalitik dari antarmuka semikonduktor/ cairan dengan reaksi berikut:

1. *holes* dapat mengoksidasi antibiotik secara langsung menjadi beberapa produk sampingan;
2. *holes* bereaksi dengan H_2O membentuk radikal hidroksil (OH) dengan potensi oksidasi yang tinggi;
3. elektron dengan reduksi yang kuat dapat bereaksi dengan O_2 membentuk radikal superoksida (O_2^-).

Pada akhirnya, radikal oksidasi yang dihasilkan dapat mendegradasi antibiotik menjadi produk sampingan beracun atau tidak beracun, yang dapat terdegradasi lebih lanjut menjadi CO_2 dan H_2O dengan memperpanjang waktu reaksi (Yanxi Chen *et al.*, 2022).

2.9 Karbon Dots

Karbon dots atau biasa disebut Cdots merupakan karbon dengan ukuran kurang dari 10 nm. Cdots memiliki karakteristik luminesensi yang unik, fotostabilitas yang baik, mudah larut dalam air, tidak beracun, biokompabilitas, inert, dan biaya sintesisnya rendah. Cdots telah diaplikasikan pada banyak bidang, diantaranya bioimaging, penghantar obat, elektrokatalis, fotokatalis, penginderaan, hingga fotovoltaiik (Kurian and Paul, 2021).

1. Mekanisme fluoeresensi dan *quantum yield*

Sifat menarik dari Cdots kemampuannya menghasilkan floresensi atau fotoluminesensi. Fenomena fluoeresensi merupakan fenomena optik ketika suatu material mengemisikan cahaya karena menyerap foton yang datang dengan energi yang lebih besar dari energi band-gapnya. Ketika menyerap cahaya, elektron yang tereksitasi akan kembali ke keadaan dasar disertai dengan emisi

(Wang, Liu and Gao, 2019). Fluoresensi Cdots secara umum disebabkan oleh interaksi antara inti karbon dan gugus fungsi di sekitarnya (Yan *et al.*, 2019). Quantum yield (QY) adalah efisiensi emisi foton yang ditentukan oleh rasio jumlah foton yang dipancarkan dengan jumlah foton yang diserap (Villamena, 2017). Semakin tinggi nilai QY maka semakin tinggi dan semakin baik intensitas fluoresensinya.

2. Metode Sintesis Cdots

Sintesis Cdots dapat dilakukan dengan pendekatan *top-down* atau *bottom-up*. Pada pendekatan *top-down*, Cdots disintesis dengan cara menghancurkan struktur karbon dengan ukuran yang lebih besar seperti grafit, grafena, dan fulleren. Metode yang sering digunakan diantaranya *laser ablation*, *ultrasonic treatment*, dan *electrochemical oxidation*. Pendekatan *bottom-up* menggunakan reaksi dekomposisi, fusi, atau karbonisasi prekursor. Metode yang sering digunakan diantaranya metode *microwave irradiation*, *thermal decomposition*, *ultrasonic treatment*, dan *hydrothermal treatment* (Chu *et al.*, 2019).

3. Bahan Dasar Cdots

Melimpahnya material berkarbon memungkinkan Cdots disintesis dari bahan baku sintetis maupun alami. Penggunaan material sintetis menyebabkan masalah ekonomi dan lingkungan karena tingginya sifatnya toksik, prekursor yang mahal, dan tingginya energi ketika sintesis. Saat ini mulai dikembangkan sintesis Cdots dari bahan ramah lingkungan seperti biomassa (Kurian and Paul, 2021). Beberapa hasil penelitian menggunakan material tersebut diantaranya sepal tebu (Du *et al.*, 2014), limbah kulit jeruk (Hu *et al.*,

2021), dan membran telur (Wang *et al.*, 2012; Deng *et al.*, 2023). Cdots yang disintesis dengan bahan dasar sepag tebu memiliki ukuran rata-rata 1.8 nm dengan panjang gelombang fluoresensi 475 nm yang menandakan fluoresensi berwarna biru (Du *et al.*, 2014). Cdots dari bahan dasar kulit jeruk memiliki ukuran rata-rata 4.2 nm dengan puncak emisi fluoresensi pada 520 nm (Hu *et al.*, 2021). Cdots dengan bahan dasar membran telur puyuh memiliki emisi fluoresensi merah dengan puncak 632 nm (Deng *et al.*, 2023).

Pada penelitian ini Cdots akan disintesis dari kulit pisang. Pertimbangan bahan dipilih karena kandungan karbon tinggi, terutama dalam bentuk senyawa selulosa, hemiselulosa, lignin, dan senyawa aromatik seperti polifenol dan flavonoid. Senyawa-senyawa ini, ketika dikenai perlakuan termal melalui metode seperti hidrotermal, pirolisis, atau solvothermal, mengalami dehidrasi, karbonisasi, dan aromatisasi yang menghasilkan inti karbon (sp^2 hybridized carbon core) serta gugus-gugus fungsional permukaan (seperti -OH, -COOH, dan -NH₂) yang memberikan sifat fluoresen. Beberapa penelitian juga membuktikan bahwa kulit pisang dapat menghasilkan Cdots dengan efisiensi kuantum cukup tinggi serta ukuran partikel seragam antara 3–8 nm, yang sesuai dengan kriteria nano-karbon optik (Kunnath Parambil *et al.*, 2025). Dari perspektif rekayasa material dan keberlanjutan, sintesis Cdots dari limbah kulit pisang mencerminkan pendekatan biomimetik dan prinsip *green nanotechnology*.

2.10 Karbon Dots sebagai Detektor

Karbon dots memiliki sifat optik dan elektrokimia yang unik sehingga membuat karbon dots menjadi salah satu material yang menjanjikan diterapkan diberbagai aplikasi pengindraan, seperti deteksi logam berat dan antibiotik (Chu *et al.*, 2020). Pengaplikasian karbon dots sebagai sensor bekerja berdasarkan penurunan emisi fotoluminesensi (*quenching*) karbon dots ketika diberikan analit (Lin *et al.*, 2019).

1. Pemadaman Fluoresensi

Mekanisme karbon dots sebagai sensor didasarkan pada mekanisme *quenching* yang berbeda, seperti *static quenching*, dan *dynamic quenching* (Chu *et al.*, 2020; Molaei, 2020). Mekanisme *quenching* tersebut bergantung pada jenis analit dan interaksi antara karbon dots dan analit. *Static quenching* adalah mekanisme lain yang digunakan karbon dots untuk mendeteksi analit, seperti antibiotik dan pestisida. Mekanisme ini terjadi karena interaksi ikatan yang kuat antara karbon dots dengan analit melalui pembentukan kompleks keadaan dasar baru dari analit dan dapat mengubah spektrum serapan karbon dots (Chu *et al.*, 2020). *Dynamic quenching* adalah mekanisme lain yang digunakan oleh karbon dots untuk mendeteksi analit. Mekanisme ini terjadi melalui tabrakan antara keadaan tereksitasi karbon dots dan analit. Tabrakan menghasilkan transfer energi dari keadaan tereksitasi karbon dots ke analit yang mengarah pada penurunan fluoresensi. *Dynamic quenching* telah banyak digunakan untuk mendeteksi berbagai analit, termasuk logam berat dan antibiotik (Molaei, 2020).

2. *Limit of Detection (LOD)*

LoD adalah parameter analitik yang penting untuk menentukan konsentrasi atau kuantitas terendah dari analit yang dapat dideteksi secara andal dengan mekanisme penginderaan yang diberikan. LoD sangat penting untuk pengembangan dan validasi sensor berbasis karbon dots untuk berbagai aplikasi. LoD juga merujuk pada batas terkecil dari suatu alat atau instrumen untuk mengukur jumlah analit tertentu. Chu et al., (2020) melaporkan karbon dots telah digunakan untuk mendeteksi antibiotik dengan batas deteksi (LOD) 0,5 nM (Chu et al., 2020). Beberapa penelitian telah dilakukan mengenai penggunaan karbon dots untuk mendeteksi antibiotik dalam sampel air. Pada penelitian Lin et al., (2019) mengembangkan metode yang cepat dan sensitif untuk penentuan residu antibiotik dari air minum. Penelitian ini berhasil menerapkan nanopartikel karbon untuk menganalisis oxyTetrasiklin (OTC) dalam air minum dan menunjukkan bahwa pendekatan ini memiliki potensi besar untuk analisis molekul lainnya (Lin et al., 2019).

2.11 Karbon Dots untuk Remediasi

Mekanisme remediasi menggunakan karbon dots tergantung pada jenis polutan yang diberikan. Pada remediasi logam berat, karbon dots dapat membentuk ikatan kompleks dengan logam berat dan menghilangkannya dari air melalui adsorpsi. Dalam kasus polutan organik, karbon dots dapat mendegradasi polutan tersebut melalui fotokatalisis atau aktivitas antibakteri (Rahnama and Ramezani, 2018). Pada penelitian Huang et al., (2022) karbon dots yang disintesis memiliki aplikasi prospektif dalam penginderaan fluoresensi dan fotodegradasi tetrasiklin di

lingkungan air (Huang *et al.*, 2022). Karbon dots dapat digunakan untuk penginderaan dan remediasi polutan air organik dan anorganik melalui berbagai proses, termasuk adsorpsi, fotokatalisis, aktivitas antibakteri, dan penyaringan membrane (Tran *et al.*, 2023).

Karbon dots dapat digunakan untuk adsorpsi fotokatalitik untuk remediasi polutan yang menjadikannya material menjanjikan untuk fotodegradasi polutan dalam air (Akbar, Moretti and Vomiero, 2021). Sifat adsorpsi karbon dots dapat menghilangkan polutan dari larutan air berdasarkan fenomena adsorpsi karena luas permukaannya yang besar dan adanya gugus fungsi pada permukaannya. Fotokatalis karbon dots bertindak sebagai fotokatalis untuk mendegradasi polutan dibawah penyinaran cahaya, berdasarkan produksi radikal hidroksil (-OH) dan radikal bebas lainnya untuk menguraikan polutan sebagian atau seluruhnya. Karbon dots dapat meningkatkan efisiensi fotokatalitik dari nanokomposit yang dihasilkan, sebagian besar karena meningkatnya adsorpsi polutan organik dan meningkatkannya penyerapan dalam rentang cahaya tampak (*visible range*) (Sendão, Esteves da Silva and Pinto da Silva, 2022). Pada penelitian Sendão *et al.*, (2022) karbon dots dapat diaplikasikan dalam pengembangan nanokomposit TiO₂-karbon dots untuk menghilangkan fotokatalitik obat-obatan dan untuk menghilangkan fotokatalitik polutan air farmasi.

Kombinasi semikonduktor oksida/karbon dots pada penggunaan karbon dots untuk remediasi telah dieksplorasi dalam penelitian terbaru. Pada penelitian Smrithi *et al.*, (2020) tungsten oksida yang dimodifikasi dengan karbon dots telah digunakan untuk mengintegrasikan fungsi adsorptif dan fotokatalitik untuk

remediasi air. Kombinasi tungsten oksida dan karbon dots menghasilkan nanokomposit dengan aktivitas fotokatalitik yang ditingkatkan dan kapasitas adsorpsi untuk menghilangkan polutan organik dalam air (Smrithi *et al.*, 2020). Penelitian lain melaporkan karbon dots telah digunakan dalam pengembangan nanokomposit TiO₂-karbon dots untuk penghilangan fotokatalitik obat-obatan (Akbar, Moretti and Vomiero, 2021). Kombinasi ini telah menghasilkan nanokomposit dengan aktivitas fotokatalitik yang ditingkatkan dan kapasitas adsorpsi untuk menghilangkan polutan organik dan obat-obatan dalam air.

2.12 Teknik Deposisi Karbon Dots pada Substrat

Imobilisasi karbon dots dilakukan dengan mengacu pada proses melekatkan atau memasang karbon dots ke substrat film tipis. Beberapa metode yang digunakan untuk imobilisasi film tipis karbon dots, diantaranya adalah metode *layer by layer assembly*, metode *langmuir-shaefer*, metode elektrospinning, metode *blending-solvent-casting*, dan metode *spray coating*. Metode *layer by layer assembly* merupakan perakitan film tipis lapisan per lapisan dengan menyematkan karbon dots pada film tipis secara bergantian dengan polimer kationik (Gonçalves *et al.*, 2012). Metode *langmuir-shaefer* merupakan metode yang melibatkan penyimpanan karbon dots pada film tipis menggunakan film tunggal *graphene* (Kouloumpis *et al.*, 2017). Metode elektrospinning merupakan metode yang melibatkan penggunaan medan listrik untuk menyematkan karbon dots pada film tipis (Ng Hau Kwan *et al.*, 2020). Metode *blending-solvent-casting* merupakan metode yang melibatkan pencampuran karbon dots dengan larutan PVA sebelum menyematkan campuran ke dalam substrat (Ng Hau Kwan *et al.*, 2020). Metode *spray coating*

merupakan metode dengan teknik *spray* untuk menyematkan karbon dots ke dalam substrat (Chaudhary, 2016).

2.13 Response Surface Metodology

Response Surface Metodology (RSM) merupakan teknik yang digunakan untuk mengembangkan dan mengoptimasi suatu proses (Widayat, Hadiyanto and Satriadi, 2012). RSM seringkali digunakan sebagai perangkat dalam menentukan pengaruh beberapa variabel terhadap karakteristik atau kualitas suatu produk dari suatu proses. Fungsi RSM antara lain yaitu memetakan permukaan respons, pemilihan kondisi untuk mencapai spesifikasi hasil, dan optimasi. Keunggulan RSM yaitu dapat memberikan sejumlah besar informasi dari sejumlah kecil percobaan yang dilakukan, sehingga proses penelitian menjadi lebih efisien dan ekonomis.

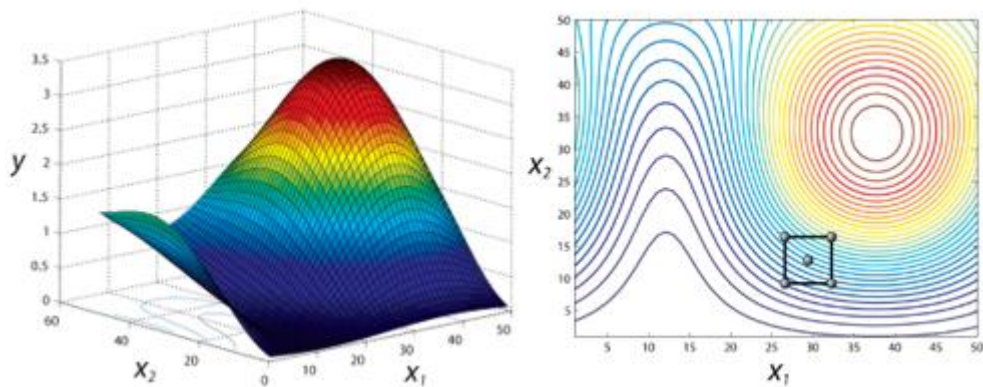
Central Composite Design (CCD) merupakan salah satu RSM untuk merancang suatu prosedur eksperimental (Indriyani *et al.*, 2019). Optimasi dilakukan dengan CCD dapat memungkinkan penyaringan berbagai parameter serta peran masing-masing faktor. CCD mampu mengevaluasi variabel tunggal dan efek kumulatif variabel terhadap suatu respon tertentu. Adapun langkah pertama dalam menentukan permukaan respon yaitu mencari hubungan antara respon dengan variabel independen melalui pendekatan yang sesuai. Pada umumnya hasil percobaan pertama akan membentuk orde ke 1 yang merupakan orde paling sederhana (*low-order polynomial*). Namun, jika bentuk hubungan variabel respon dengan variabel independen merupakan fungsi dari linier maka dilakukan pendekatan dengan menggunakan fungsi first order model Persamaan 1.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon_i \quad (1)$$

Jika, hasil percobaan menunjukkan bentuk hubungan merupakan kuadrat, maka melakukan pendekatan fungsi dengan derajat polynomial yang lebih tinggi yaitu *second order model* Persamaan 2 (Said, Yakub and Amin, 2015),

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \dots + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2)$$

Adapun gambaran umum bentuk grafik tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2. 3 Bentuk Grafik Plot Surface and Contour Area
(che.utah.edu/~tony/course/material)

2.14 Karakterisasi dan Pengujian

2.14.1 Spektrofotometer UV-Vis

Spektroskopi UV-Vis merupakan teknik analisis yang berkaitan dengan interaksi antara radiasi elektromagnetik di wilayah ultraviolet-visibel dan materi. Wilayah ultraviolet (UV) mencakup sekitar rentang spektrum elektromagnetik 10 – 380 nm yang dibagi menjadi tiga sub-wilayah utama, yaitu UVA pada 320 – 380 nm; UVB pada 280 – 320 nm; dan UVC pada 100 – 280 nm. Pada rentang 10 – 200 nm disebut sebagai ultraviolet vakum (VUV), sedangkan untuk wilayah tampak

(Vis) mencakup rentang spektral 380 – 750 nm (Picollo, Aceto and Vitorino, 2019). Spektroskopi UV-vis adalah salah satu teknik analisis paling sederhana dan efektif untuk mengukur serapan atau transmisi cahaya dalam fase cairan. Spektroskopi UV-Vis didasarkan pada transisi elektronik molekul organik yang menyerap cahaya dan merangsang elektron orbital molekul pada tingkat tertinggi ke orbital molekul tingkat terendah (Rocha *et al.*, 2018).

2.14.2 Spektrofotometer Fotoluminesensi

Spektrum Fotoluminesensi (PL) digunakan untuk mengkarakterisasi fluoresensi antarmuka material. Teknik ini memberikan informasi penting mengenai sifat optik dan fotokimia semikonduktor, struktur elektronik bahan, serta cacat titik di wilayah antarmuka (Erbe *et al.*, 2018). PL merupakan fenomena optik dimana semikonduktor mengeluarkan emisi cahaya dengan cara menyerap cahaya datang yang energinya lebih tinggi dari celah pita energi semikonduktor. Pada mekanisme PL, elektron tereksitasi yang dihasilkan oleh eksitasi optik akan kembali ke keadaan dasar disertai dengan emisi foton (Wang, Liu and Gao, 2019).

2.14.3 Spektrofotometer FTIR

FTIR (*Fourier Transform Infrared*) merupakan teknik yang digunakan untuk mengidentifikasi gugus fungsi dalam senyawa berdasarkan getaran ketika terkena cahaya dengan panjang gelombang tertentu. Proses ini menghasilkan spektrum FTIR, di mana getaran dan intensitasnya diplot terhadap frekuensi cahaya (Daéid, 2004). Alat ini menghasilkan radiasi inframerah (IR) yang dipancarkan dari sumber yang memancarkan radiasi termal. Saat sinar melewati interferometer, terjadi rekomposisi dari berkas-berkas yang memiliki lintasan panjang yang berbeda,

menciptakan interferensi konstruktif dan destruktif yang dikenal sebagai interferogram. Setelah itu, sinar masuk ke dalam kompartemen sampel, di mana sampel menyerap energi pada frekuensi tertentu, yang merupakan ciri khas unik dari sampel pada interferogram. Spektrum yang diinginkan diperoleh setelah interferogram secara otomatis mengurangi spektrum latar belakang dari spektrum sampel menggunakan perangkat lunak komputer transformasi Fourier (Mohamed *et al.*, 2017).

2.14.4 *Scanning Electron Microscopy* (SEM)

Scanning Electron Microscopy atau dikenal sebagai analisis SEM telah digunakan di seluruh dunia dan dianggap sebagai metode yang efektif dalam analisis bahan organik dan anorganik pada skala nanometer hingga mikrometer (μm). SEM bekerja pada perbesaran tinggi yang mencapai 300.000x bahkan 1000.000 (pada beberapa model modern) dalam menghasilkan gambar dengan sangat presisi dari berbagai macam material (Abdullah and Mohammed, 2019).

2.14.5 *Transmisoon Electron Microscopy* (TEM)

Transmisoon Electron Microscopy (TEM) merupakan instrumen analisis ukuran dan bentuk partikel beresolusi tinggi. Hasil citra TEM disebabkan oleh berkas elektron yang dipercepat pada tegangan tinggi dengan panjang gelombang efektif yang jauh lebih pendek, yaitu sekitar faktor 10^5 dari cahaya tampak. Pada prinsipnya, mikroskop elektron memiliki potensi untuk mencapai resolusi molekuler jika hanya mempertimbangkan pembatasan panjang gelombang (difraksi), namun, dalam prakteknya, terdapat faktor-faktor lain yang membatasi tingkat resolusi, termasuk sifat sampel itu sendiri. Keterbatasan lain dari mikroskop

elektron terletak pada keharusan bahwa sampel harus tipis, kering, dan mampu menghamburkan elektron dalam ruang hampa. Proses ini biasanya melibatkan fiksasi atau stabilisasi sampel, serta penggunaan noda logam berat untuk menciptakan kontras yang diperlukan untuk pencitraan elektron (Burghardt & Droleskey, 2006).

2.14.6 High-Performance Liquid Chromatography (HPLC)

High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) merupakan metode yang digunakan untuk pemisahan senyawa *natural product* yang efisien dalam campuran tanpa memerlukan persiapan sampel yang rumit. HPLC telah berkembang pesat selama bertahun-tahun dalam hal kenyamanan, kecepatan, pilihan *column stationary phases*, sensitivitas tinggi, penerapan pada beragam matriks sampel, dan kemampuan untuk menghubungkan metode kromatografi ke detektor spektroskopi (Wolfender, 2009). Pada penelitian ini HPLC akan digunakan untuk menganalisis kadar antibiotik sebelum dan sesudah perlakuan eksperimen.

2.14.7 X-Ray Fluorescence (XRF)

X-ray Fluorescence (XRF) merupakan metode spektroskopi yang digunakan secara luas untuk analisis unsur logam berat dalam berbagai jenis sampel, baik padat maupun semi-padat. Prinsip kerja XRF melibatkan eksitasi atom dalam sampel menggunakan sinar-X, yang kemudian menyebabkan atom memancarkan radiasi sekunder (fluoresensi). Spektrum fluoresensi yang dihasilkan bersifat unik bagi setiap unsur kimia, sehingga memungkinkan identifikasi dan kuantifikasi unsur logam berat seperti timbal (Pb), kadmium (Cd), arsenik (As), dan kromium (Cr). Kelebihan utama teknik ini adalah sifatnya yang non-destruktif, waktu analisis

yang cepat, serta kemampuan mendeteksi banyak unsur sekaligus dalam satu pengukuran. Dalam konteks pengujian logam berat pada material lingkungan dan nanomaterial seperti karbon dots, XRF menjadi alat yang sangat bermanfaat untuk mendeteksi kontaminasi atau mengukur kapasitas adsorpsi terhadap logam berat. XRF juga digunakan untuk menganalisis distribusi logam berat dalam limbah padat, tanah tercemar, atau residu biomassa.

2.14.8 Atomic Force Microscopy (AFM)

Atomic Force Microscopy (AFM) merupakan teknik analisis permukaan yang sangat fleksibel yang digunakan untuk memeriksa struktur mikro dan nano pada pelapis. AFM merupakan teknik yang fleksibel dan dapat digunakan untuk memperoleh gambar skala nano resolusi tinggi. Metode ini memungkinkan untuk memvisualisasikan dan menganalisis detail pada tingkat nanometer pada permukaan suatu sampel. AFM dapat digunakan dalam berbagai kondisi lingkungan. AFM konvensional digunakan untuk memeriksa sampel dalam lingkungan udara. Di sisi lain, AFM elektrokimia memungkinkan pengamatan dalam lingkungan cairan, seperti elektrolit (Aliofkhazraei & Ali, 2014).

2.14.9 X-Ray Photoelectron Spectroscopy (XPS)

Spektroskopi fotoelektron sinar-X atau *X-ray photoelectron spectroscopy* (XPS) adalah teknik kuantitatif untuk mengukur komposisi unsur pada permukaan suatu bahan, dan juga menentukan keadaan pengikatan unsur. XPS biasanya menyelidiki hingga kedalaman 10 nm dari permukaan sampel. Namun, karena XPS adalah teknik vakum ultra-tinggi, sampel yang akan dianalisis harus dievakuasi

terlebih dahulu untuk menciptakan lingkungan vakum yang sesuai untuk teknik ini (Mather, 2009).

2.14.10 Chemical Oxygen Demand (COD)

Uji *Chemical Oxygen Demand* (COD) pada umumnya memerlukan penggunaan oksidator kuat (kalium dikromat) dan asam (asam sulfat), dan prosesnya tidak selalu dapat diakses karena faktor-faktor tersebut. persyaratan keterampilan, peralatan, dan waktu yang signifikan. Keuntungan dari pengujian COD adalah tidak adanya gangguan dari bahan beracun, serta hanya membutuhkan waktu dua atau tiga jam untuk menyelesaikan pengujian, dibandingkan dengan lima hari untuk pengujian BOD. Uji COD sering digunakan bersamaan dengan uji BOD untuk memperkirakan jumlah bahan organik nonbiodegradable dalam air limbah. Dalam kasus bahan organik yang dapat terurai secara hayati, COD biasanya berkisar antara 1,3 hingga 1,5 kali BOD. Jika hasil uji COD lebih dari dua kali lipat hasil uji BOD, terdapat alasan kuat untuk mencurigai bahwa sebagian besar bahan organik dalam sampel tidak dapat terbiodegradasi oleh mikroorganisme biasa (Woodard & Curran, 2006).

2.14.11 Biochemical Oxygen Demand (BOD)

BOD atau *Biochemical Oxygen Demand* merupakan parameter yang digunakan untuk mengukur jumlah oksigen yang digunakan oleh mikroorganisme dalam proses menguraikan bahan organik dalam suatu sampel air. Secara umum, BOD dapat dianggap sebagai indikator sederhana dan praktis dari total kandungan organik yang dapat digunakan oleh organisme dalam air tertentu (Dodds & Whiles, 2010).

BOD dapat digunakan sebagai ukuran efektivitas instalasi pengolahan air limbah. Fungsi BOD mirip dengan COD, yaitu keduanya mengukur jumlah senyawa organik dalam air. Namun, COD kurang spesifik karena mengukur segala sesuatu yang dapat teroksidasi secara kimia, bukan hanya mengukur kadar bahan organik yang dapat terbiodegradasi (Li & Liu, 2019)

2.14.12 *Total Suspended Solids (TSS)*

TSS didefinisikan sebagai padatan dalam air yang dapat terperangkap oleh filter. Untuk mengukur TSS, sampel air disaring melalui filter yang telah ditimbang sebelumnya. Residu yang tertahan pada filter dikeringkan dalam oven pada suhu 103–105°C hingga berat filter tidak berubah lagi. Setelah pengeringan, filter yang telah mengandung padatan dikembalikan dan ditimbang kembali. Peningkatan berat filter setelah proses penyaringan dan pengeringan mencerminkan jumlah total padatan tersuspensi yang terdapat dalam sampel air. Nilai ini dinyatakan sebagai Total Suspended Solids (TSS) dalam sampel tersebut (Ismail et al., 2019).

2.14.13 *Total Plate Count*

Total Plate Count (TPC) merupakan metode mikrobiologis kuantitatif yang digunakan untuk menentukan jumlah total bakteri hidup dalam suatu sampel, biasanya dinyatakan dalam satuan koloni per mililiter (CFU/mL). Prosedurnya melibatkan penanaman sampel pada media *nutrient agar* dan inkubasi selama 24 jam pada suhu optimal pertumbuhan bakteri, umumnya 37°C. Setelah inkubasi, jumlah koloni bakteri yang tumbuh dihitung secara visual. Penurunan signifikan jumlah koloni dibandingkan kontrol mengindikasikan adanya aktivitas antibakteri.

Metode ini sangat cocok untuk mengukur efektivitas senyawa antibakteri yang bekerja secara langsung terhadap bakteri hidup (Cheng et al., 2024).



SEKOLAH PASCASARJANA